

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Металлические и деревянные конструкции»

РАСЧЕТ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ТКП EN

Учебно-методическое пособие
по металлическим конструкциям
для студентов специальности 1-70 02 01
«Промышленное и гражданское строительство»

Учебное электронное издание

М и н с к 2010

УДК 624.014 (075.8)

А в т о р ы :

А.Н. Жабинский, А.Г. Рябов

Р е ц е н з е н т ы :

Г.Г. Круглов, заведующий кафедрой «Гидротехническое и энергетическое строительство» БНТУ, кандидат технических наук, доцент;

В.Ф. Зверев, заведующий кафедрой «Железобетонные и каменные конструкции» БНТУ, кандидат технических наук, доцент

В учебно-методическом пособии изложены некоторые вопросы расчета балок на прочность балочных площадок по Еврокоду 3. Приведены примеры решения задач для самостоятельной работы. Пособие предназначено для студентов специальности 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство», а также может быть использовано студентами других специальностей строительного профиля.

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел. (017)292-77-52 факс (017)292-91-37
Регистрационный № БНТУ/СФ68-1.2010

© БНТУ, 2010

© Жабинский А.Н., 2010

© Жабинский А.Н., компьютерный дизайн, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	4
1.1 Условные обозначения размеров и осей элементов	4
1.2 Основные положения по расчету	6
2 КЛАССИФИКАЦИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ.....	7
3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	11
3.1 Определение эффективной длины при эффекте сдвигового запаздывания.....	11
3.2 Определение эффективной ^s ширины при сдвиговом запаздывании в упругой стадии работы	13
3.3. Распределение напряжений при учете эффекта сдвигового запаздывания.....	14
3.4 Определение эффективной площади сечения сжатых элементов балки при действии нормальных напряжений	15
3.5 Определение эффективного сечения сжатого пояса при учете эффекта сдвигового запаздывания и потери устойчивости	17
3.6 Эффективное поперечное сечение	19
4 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	21
4.1 Основные положения	21
4.2 Расчет на действие поперечной силы.....	22
4.3 Расчет на сдвиг в пластической стадии	22
4.4 Расчет на сдвиг в упругой стадии.....	23
4.5 Расчет несущей способности на сдвиг (4 класс сечений)	24
4.6 Элементы, подверженные действию изгибающего момента и поперечной силы	29
5. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ ПО УСТОЙЧИВОСТИ	30
5.1 Кривые потери устойчивости плоской формы изгиба. Общий случай ...	30
5.2 Кривые потери устойчивости плоской формы изгиба для прокатных или эквивалентных сварных поперечных сечений	32
6. ПРИМЕРЫ РАСЧЁТА ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ТКП EN	34
Пример 1. Поперечное сечение класса 1 и 2	34
Пример 2. Поперечное сечение класса 3.....	35
Пример 3. Поперечное сечение класса 4.....	37
ЛИТЕРАТУРА	43

ВВЕДЕНИЕ

Методическое пособие предназначено для студентов специальности 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство» при изучении дисциплины «Металлические конструкции» и направлено на оказание помощи студентам при изучении основных положений расчета изгибаемых элементов стальных конструкций по Европейским правилам расчета Еврокоду 3 «Проектирование стальных конструкций».

В методическом пособии приведены необходимые сведения по расчету балок поперечных сечений класса 1, 2, 3 и 4, а также приведены числовые примеры определения несущей способности балок. В методическом пособии даны обозначения принятые в соответствии с ТКП EN 1991-1-1-2009 «Проектирование стальных конструкций. Общие правила и правила для зданий».

Обозначения:

f_y – предел текучести;

f_u – предел прочности;

N_{Ed} , M_{Ed} , V_{Ed} – соответственно расчетные значения осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы;

N_{Rd} , M_{Rd} , V_{Rd} – соответственно расчетные значения несущей способности по продольной силе, изгибающему моменту и поперечной силе.

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Условные обозначения размеров и осей элементов

В соответствии с ТКП EN 1991-1-1-2009 приняты следующие условные обозначения осей элементов:

$x - x$ — продольная ось элемента;

$y - y$ — поперечная ось элемента;

$z - z$ — поперечная ось элемента.

Символы, используемые для обозначения размеров и осей прокатных профилей, показаны на рисунке 1.1.

Геометрические характеристики сечений относительно главных осей обычно обозначаются как $y - y$ и $z - z$. Индекс в обозначении момента обозначает ось, относительно которой действует момент.

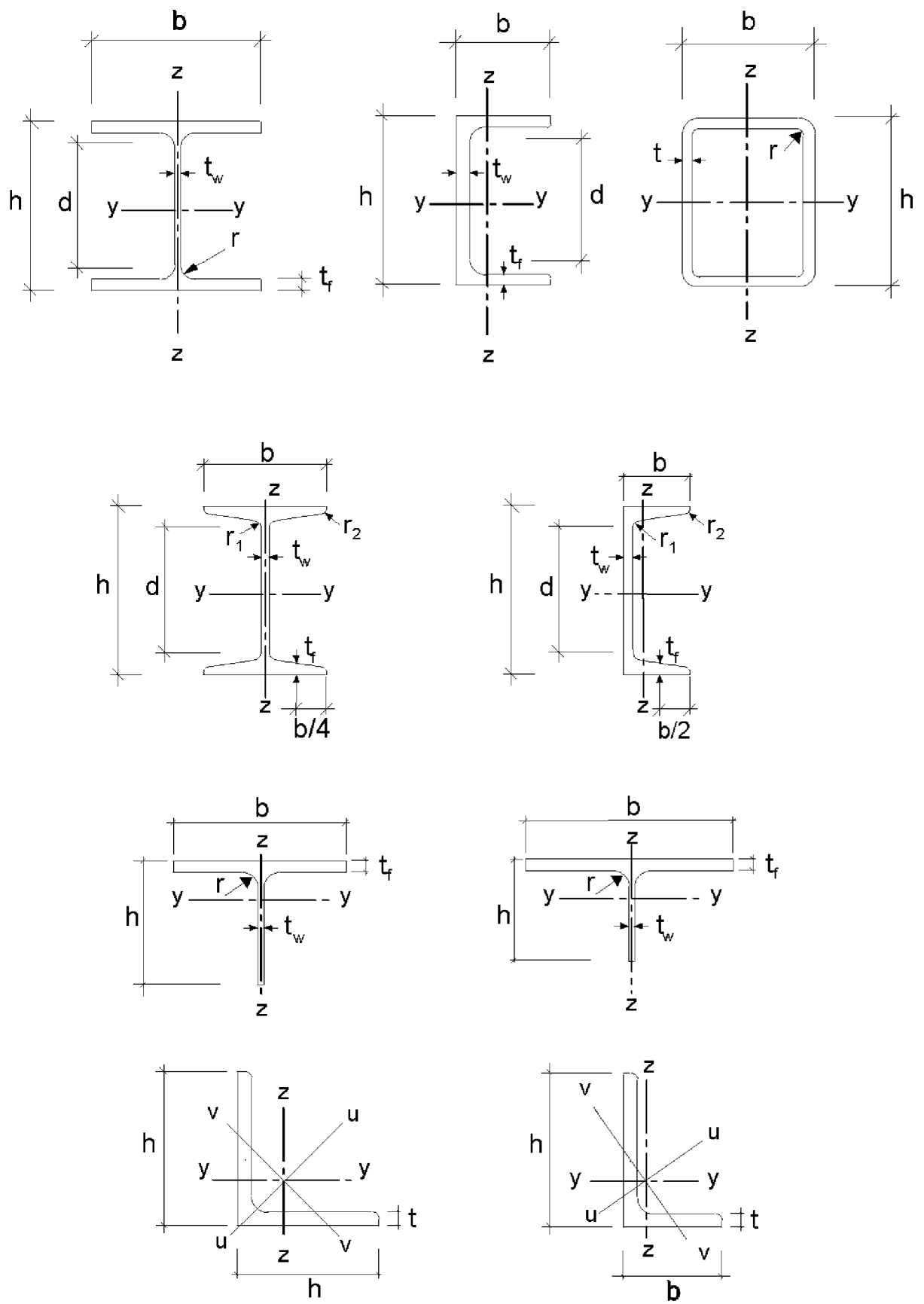


Рисунок 1.1 — Размеры и оси сечений

1.2 Основные положения по расчету

Расчет стальных конструкций следует выполнять по методу предельных состояний с использованием частных коэффициентов безопасности, приведенных в ТКП EN 1991-1-1-2009.

К различным нормативным значениям несущей способности применяют следующие *частные коэффициенты безопасности* γ_m при определении:

— несущей способности поперечных сечений по прочности независимо от класса — γ_{M0} ;

— несущей способности элемента по устойчивости — γ_{M1} ;

— несущей способности поперечных сечений по прочности, определяемая с использованием временного сопротивления стали — γ_{M2} .

Значения частных коэффициентов безопасности для зданий, в соответствии с национальным приложением ТКП EN 1991-1-1-2009, следует принимать равными:

$$\gamma_{M0} = \gamma_m / \gamma_c ;$$

$$\gamma_{M1} = \gamma_m / \gamma_c ,$$

где γ_m — коэффициент безопасности по материалу, равный 1,025 для проката, поставляемого по ГОСТ 27772 или другим ТНПА, в которых используется процедура контроля свойств проката по ГОСТ 27772, и равный 1,050 — для остального проката;

γ_c — коэффициент условий работы, принимаемый по приложению А.

$$\gamma_{M2} = \gamma_u ,$$

где γ_u — коэффициент надежности для элементов, рассчитываемых на прочность с использованием расчетных сопротивлений R_u , установленных по временному сопротивлению стали.

Примечание — Кроме перечисленных выше коэффициентов в расчетах следует учитывать коэффициент надежности по ответственности γ_n . Классификация объектов по уровням ответственности и значения коэффициента γ_n приведены в ГОСТ 27751.

2 КЛАССИФИКАЦИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ

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. Различают четыре класса поперечных сечений:

Поперечные сечения класса 1 – те, в которых может образоваться пластический шарнир с вращательной способностью, требуемой для расчета в пластической стадии и достигаемой без снижения несущей способности.

Поперечные сечения класса 2 – те, в которых могут развиваться пластические деформации, но в которых ограничена вращательная способность вследствие потери местной устойчивости.

Поперечные сечения класса 3 – те, в которых напряжение в крайних сжатых волокнах стального элемента при упругом распределении напряжений может достигнуть предела текучести, но потеря местной устойчивости препятствует развитию пластических деформаций.

Поперечные сечения класса 4 – те, в которых потеря местной устойчивости наступает до достижения предела текучести в одной или более зонах поперечного сечения.

Классификация поперечных сечений зависит от отношения ширины к толщине частей сечения, расположенных в его сжатой зоне. Сжатые зоны включают все части поперечного сечения, которые полностью или частично сжаты под действием рассматриваемого сочетания нагрузок.

Различные сжатые части в поперечном сечении (такие как стенка или полка) могут, вообще, относиться к различным классам.

Поперечное сечение классифицируется по наивысшему (наименее благоприятному) классу его сжатых частей.

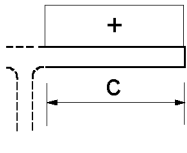
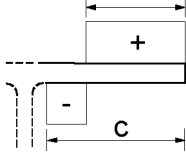
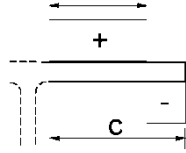
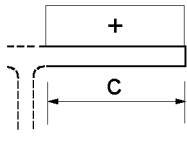
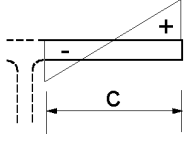
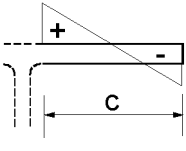
Альтернативно классификация поперечного сечения может быть установлена с учетом классификации как полки, так и стенки.

Предельные отношения c/t для сечений классов 1, 2 и 3 следует принимать по таблице 2.1. Часть сечения, которая не соответствует предельным отношениям для сечения класса 3, должна быть отнесена к сечению класса 4.

Таблица 2.1 – Максимальные отношения ширины к толщине для сжатых частей сечения

Сжатые внутренние части						
				Ось изгиба		
				Ось изгиба		
Класс	Часть, подвергнутая изгибу	Часть, подвергнутая сжатию	Часть, подвергнутая изгибу и сжатию			
Распределение напряжений в частях (сжатие положительно)						
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	при $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ при $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	при $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ при $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Распределение напряжений в частях (сжатие положительно)						
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	при $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ при $\psi \leq -1^*$: $c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
* $\psi \leq -1$ для тех случаев, когда или сжимающее напряжение $\sigma \leq f_y$, или деформация растяжения $\varepsilon_y > f_y/E$						

Продолжение таблицы 2.1

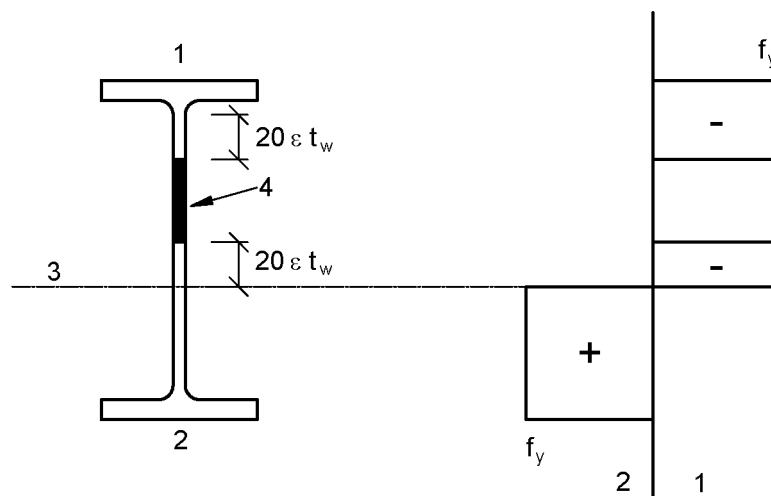
Свесы полок						
Прокатные профили		Сварные профили				
Класс	Часть, подвергнутая сжатию	Часть, подвергнутая изгибу и сжатию				
		Сжатие на конце		Растяжение на конце		
Распределение напряжений в частях (сжатие положительно)						
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Распределение напряжений в частях (сжатие положительно)						
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ k_σ см. ЕН 1993-1-5				
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Окончание таблицы 2.1

Дополнительно см. «Свесы полок»		Угловые профили		Не применяется при непрерывном контакте уголков с другими деталями		
						
Класс	Сечение, подвергнутое сжатию					
Распределение напряжений во всем сечении (сжатие положительно)						
3	$h/t \leq 15\varepsilon : \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$					
		Трубчатое сечение				
						
Класс	Сечение, подвергнутое изгибу и/или сжатию					
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\varepsilon^2$ Для $d/t > 90\varepsilon^2$ см. ЕН 1993-1-6.					
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

Сечения класса 4 могут быть отнесены к классу 3, если c/t меньше значения, вычисленного для сечения класса 3 по таблице 3.1 при $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{\sigma_{com,Ed} \cdot \gamma_{M0}}}$, где $\sigma_{com,Ed}$ — максимальное расчетное сжимающее напряжение.

Поперечные сечения со стенкой класса 3 и полками класса 1 или 2 могут быть классифицированы как поперечные сечения класса 2 с эффективной стенкой согласно рисунку 2.1, тогда **при определении геометрических характеристик эффективного сечения в пластической стадии** сжатая часть стенки должна быть заменена частью высотой $20\varepsilon t_w$ и примыкающей к сжатой полке и другой частью высотой $20\varepsilon t_w$, примыкающей к нейтральной оси, в соответствии с рисунком 2.1.



1 — сжатие; 2 — растяжение;
 3 — нейтральная ось в пластической стадии; 4 — исключаемая часть стенки

Рисунок 2.1 — Эффективная стенка класса 2

Если стенка воспринимает только поперечные силы и, следовательно, не повышает несущую способность 1 поперечного сечения по моменту и продольной силе, то поперечное сечение может быть рассчитано как сечение класса 2, 3 или 4 в зависимости только от полки.

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

3.1 Определение эффективной длины при эффекте сдвигового запаздывания

При расчете балок с широкими и тонкими полками необходимо учитывать эффект сдвигового запаздывания напряжений по сечению поясов. На рисунке 3.1 показана эффективная длина балок при определении эффективной ширины поясов.

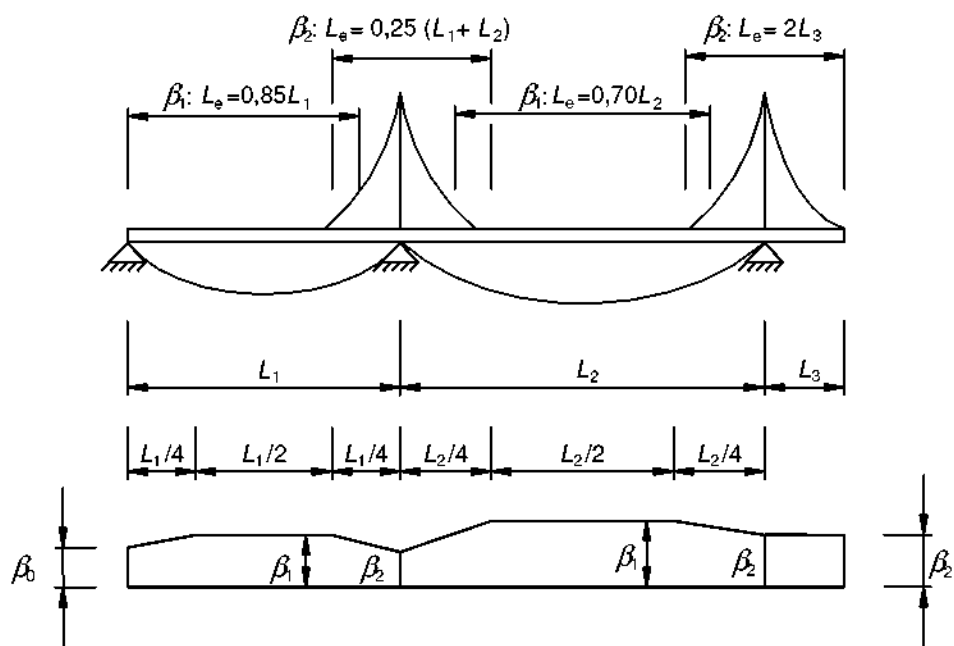
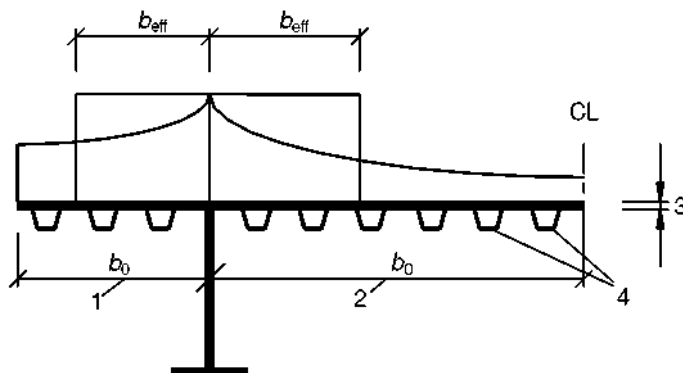


Рисунок 3.1 — Эффективная длина L_e для неразрезных балок и распределение эффективной^s ширины

На рисунке 3.2 приведено распределение нормальных напряжений при эффекте сдвигового запаздывания.



1 — свес пояса при опирании на одну сторону; 2 — свес пояса при опирании на две стороны; 3 — толщина листа t ; 4 — продольные элементы жесткости с $A_{sl} = \sum A_{sli}$

Рисунок 3.2 — К определению эффективной ширины

В поясах допускается не учитывать эффект сдвигового запаздывания, если выполнено условие $b_0 < L_e/50$. Для частей поясов с односторонней опорой ширина пояса b_0 соответствует имеющейся ширине пояса, для частей пояса с двухсторонней опорой b_0 равняется половине ширины пояса.

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 3.1. В других случаях L_e оценивают как расстояние между двумя нулевыми точками действующих моментов.

Если указанное условие ($b_0 < L_e/50$) для b_0 не выполняется, как правило, при оценке несущей способности и усталостной прочности материала необходимо учитывать влияние сдвигового запаздывания поясов, для этого определяют эффективную^s ширину согласно подразделу 3.2 и используют распределение напряжения согласно рисунку 3.3.

3.2 Определение эффективной^s ширины при сдвиговом запаздывании в упругой стадии работы

Эффективную^s ширину пояса b_{eff} при учете сдвигового запаздывания в упругой стадии работы (рисунок 3.3), как правило, определяют по формуле

$$b_{eff} = \beta b_0. \quad (3.1)$$

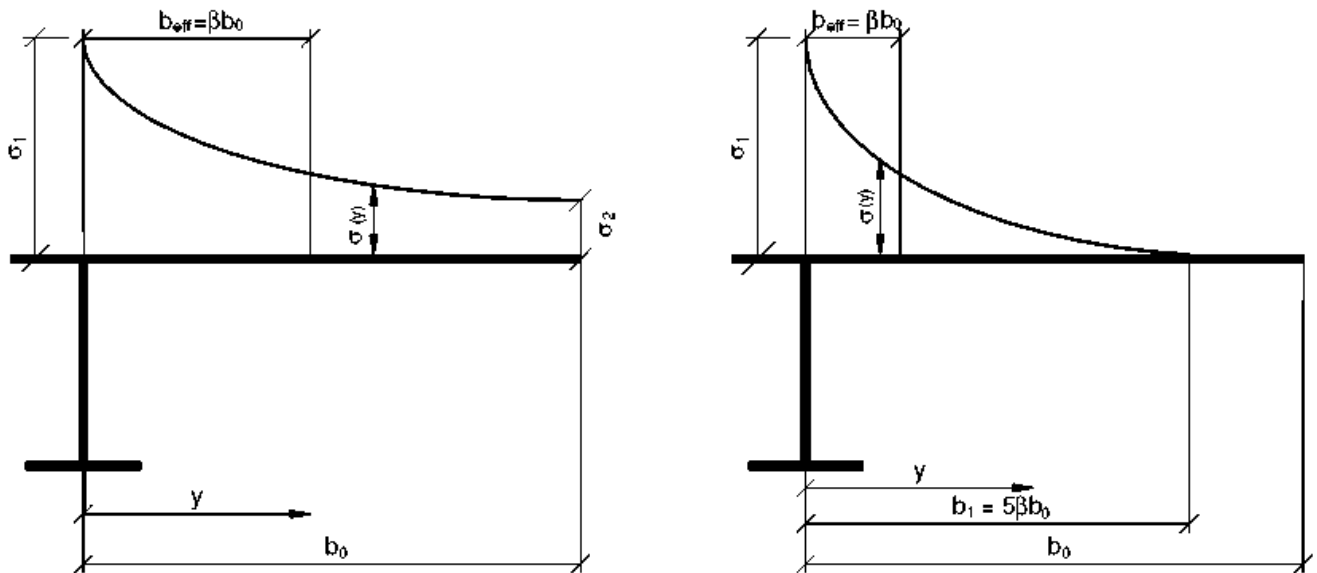
Коэффициент β указан в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Коэффициент β для эффективной^s ширины

k	Место расположения	Значение β
$k \leq 0,02$		$\beta = 1,0$
$0,02 < k \leq 0,70$	В пролете балки	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4k^2}$
	У опоры балки	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \cdot \left(k - \frac{1}{2500k} \right) + 1,6k^2}$
$>0,70$	В пролете балки	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9k}$
	У опоры балки	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6k}$
Все k	Концевая опора балки	$\beta_0 = (0,55 + 0,025 / k) \cdot \beta_1, \beta_0 < \beta_1$
Все k	Консоль балки	$\beta = \beta_2$ — на опоре и на конце консоли
$k = \alpha_0 b_0 / L_e \text{ при } \alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 t}},$		
<p>где A_{sl} — площадь сечения всех продольных элементов жесткости в пределах ширины b_0. Другие буквенные обозначения указаны на рисунках 4.1 и 4.2.</p>		

3.3. Распределение напряжений при учете эффекта сдвигового запаздывания

Для учета эффекта сдвигового запаздывания, как правило, применяют распределение нормальных напряжений в поясе согласно рисунку 3.3.



$$\beta > 0,20:$$

$$\sigma_2 = 1,25 \cdot (\beta - 0,20) \cdot \sigma_1;$$

$$\sigma(y) = \sigma_2 + (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot (1 - y/b_0)^4$$

$$\beta \leq 0,20:$$

$$\sigma_2 = 0;$$

$$\sigma(y) = \sigma_1 \cdot (1 - y/b_1)^4$$

σ_1 — определяют с применением эффективной^s ширины b_{eff} верхнего пояса;
 y — координата для определения σ_y

Рисунок 3.3 — Распределение напряжений с учетом эффекта сдвигового запаздывания

Если эффективная ширина пояса b_{eff} при сдвиговом запаздывании будет отличаться от значений, определенных согласно таблице 3.1 при потере устойчивости, в расчете необходимо учитывать одновременном воздействии сдвигового запаздывания и потери устойчивости (выпучивания) пластин.

3.4 Определение эффективной площади сечения сжатых элементов балки при действии нормальных напряжений

Эффективные^p площади пластин сжатых элементов с двухсторонним закреплением по краям (стенка балки) должны определяться, используя таблицу 3.2, а для пластин с односторонним закреплением (свесы листа пояса) — таблицу 3.3. Эффективная^p площадь сжатой зоны листа с поперечной площадью сечения брутто A_c , как правило, определяется по формуле

$$A_{c,eff} = \rho A_c, \quad (3.2)$$

где ρ — понижающий коэффициент при потере устойчивости пластины.

При этом ρ допускается принимать по формулам:

— для сжатой пластины с двухсторонним закреплением (стенка):

$$\begin{aligned} \rho &= 1,0 && \text{для } \bar{\lambda}_p \leq 0,673; \\ \rho &= \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 && \text{для } \bar{\lambda}_p > 0,673, \text{ где } (3 + \psi) \geq 0; \end{aligned} \quad (3.3)$$

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

$$\begin{aligned} \rho &= 1,0 && \text{для } \bar{\lambda}_p \leq 0,748; \\ \rho &= \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 && \text{для } \bar{\lambda}_p > 0,748, \end{aligned} \quad (3.4)$$

где $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$,

где ψ — отношение напряжений, определяемых согласно таблицам 3.2 и 3.3;

\bar{b} — расчетная ширина пластины принимается следующей (обозначения см. EN 1993-1-1, таблица 5.2):

b_w — для стенки;

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 3.2 или таблице 3.3;

t — толщина листа;

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

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y [\text{Н/мм}^2]}}.$$

Для поясов I-сечений и коробчатых балок коэффициент отношения напряжений ψ , принятый в таблицах 3.2 и 3.3, 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 таблице 3.2 с учетом распределения напряжений, которое определяется по эффективной ширине сжатого пояса и сечения брутто стенки.

Таблица 3.2 — Сжатые пластины с двухсторонним закреплением по краям (стенка)

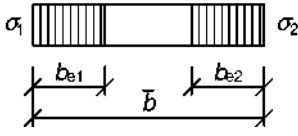
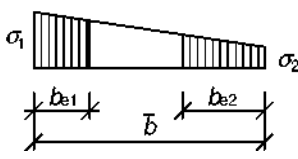
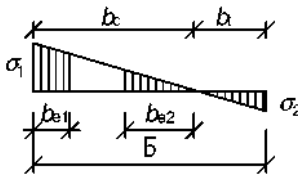
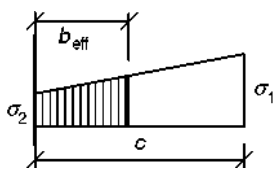
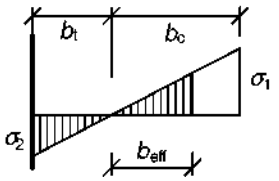
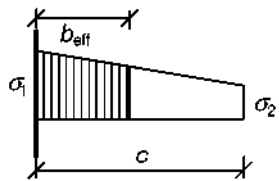
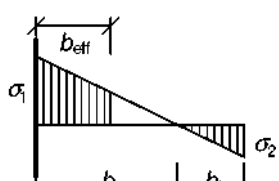
Распределение напряжения (сжатие положительное)				Эффективная ширина b_{eff}		
				$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b};$ $b_{e1} = 0,5b_{eff}, b_{e2} = 0,5b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b},$ $b_{e1} = \frac{2}{5-\psi} b_{eff}, b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi),$ $b_{e1} = 0,4b_{eff}, b_{e2} = 0,6b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Коэффициент потери устойчивости k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 \cdot (1 - \psi)^2$

Таблица 3.3 — Сжатые пластины с односторонним закреплением (свес пояса)

Распределение напряжения (сжатие положительное)		Эффективная ширина b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Коэффициент потери устойчивости k_σ	$0,43$	$0,57$	$0,85$	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Коэффициент потери устойчивости k_σ	$0,43$	$0,578 / (\psi + 0,34)$	$1,70$	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	$23,8$

3.5 Определение эффективного сечения сжатого пояса при учете эффекта сдвигового запаздывания и потери устойчивости

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

- а) воздействие эффекта сдвигового запаздывания в упругой стадии работы при определении несущей способности и усталостной прочности;
- б) при одновременном воздействии сдвигового запаздывания и потери устойчивости (выпучивания) пластин;
- с) при упругопластической работе материала воздействие эффекта сдвигового запаздывания допускается при учете ограничения пластических деформаций.

Примечание 1 — Одновременное действие потери устойчивости пластины и сдвигового запаздывания допускается рассчитывать с учетом эффективной площади сечения A_{eff} по формуле:

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{c,eff}} \beta_{\text{ult}}, \quad (3.5)$$

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

Эффективная^р площадь сжатой зоны листа с поперечной площадью сечения брутто A_{c} , как правило, определяется по формуле:

$$A_{\text{c,eff}} = \rho A_{\text{c}},$$

где ρ — понижающий коэффициент при потере устойчивости пластины (см. подразделы 4.4 и 4.5 [2]);

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

$$\alpha_0^* = \sqrt{\frac{A_{\text{c,eff}}}{b_0 t_f}}, \quad (3.6)$$

где t_f — толщина пояса.

Примечание 2 — При упруго-пластической работе материала воздействие эффекта сдвигового запаздывания с учетом ограничения пластических деформаций допускается учитывать посредством эффективной площади сечения A_{eff} по формуле

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{c,eff}} \beta^k \geq A_{\text{c,eff}} \beta, \quad (3.7)$$

где β и k принимаются согласно таблице 3.1.

Формулу (3.5) допускается применять также для поясов, работающих на растяжение, в этом случае $A_{\text{c,eff}}$, как правило, заменяют на площадь сечения брутто растянутого пояса.

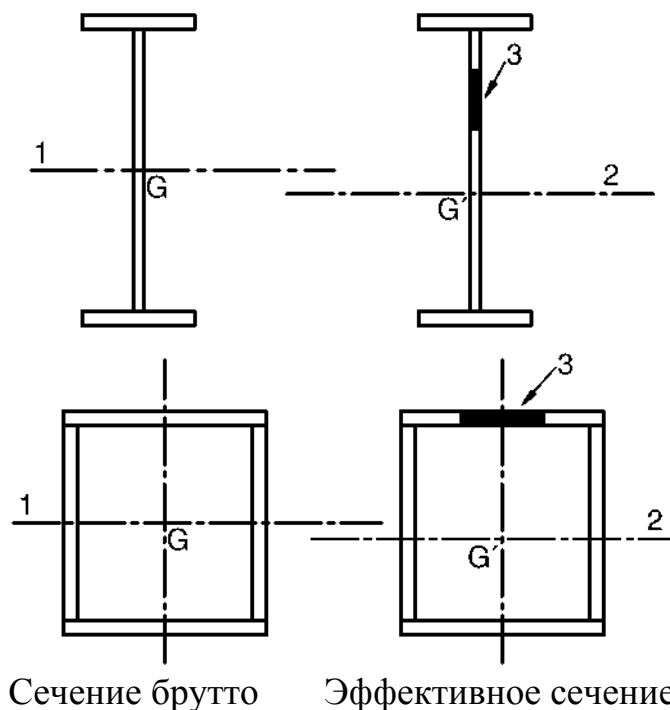
3.6 Эффективное поперечное сечение

При определении нормальных напряжений, как правило, необходимо учитывать эффект сдвигового запаздывания и потери устойчивости (выпучивания) пластин, используя эффективные площади сечений, приведенные в подразделе 3.4.

Характеристики эффективного поперечного сечения конструкции, как правило, определяются по эффективным площадям сжатых элементов и эффективным площадям растянутых элементов вследствие эффекта сдвигового запаздывания.

Момент сопротивления эффективного сечения W_{eff} , как правило, определяют, считая, что поперечное сечение подвергается только напряжениям от изгибающего момента M_{Ed} (рисунок 3.4). При действии изгибающих моментов в двух главных плоскостях, как правило, определяют моменты сопротивления эффективного сечения относительно двух главных осей.

Напряжения в поясах определяют с использованием упругого момента сопротивления относительно середины листа пояса.



- G — центр тяжести сечения брутто; G' — центр тяжести эффективного сечения;
1 — ось центра тяжести сечения брутто;
2 — ось центра тяжести эффективного сечения;
3 — неэффективные участки сечения (участки сечения, для которых местная устойчивость не обеспечена)

Рисунок 3.4 — Сечения класса 4 — воздействие изгибающих моментов

В таблицах 3.4 и 3.5 показан порядок определения эффективной площади поперечного сечения поясов и стенки для балки, приведенных в подразделах 3.2–3.5.

Таблица 3.4 – Определение эффективной площади поперечного сечения поясов

№ п/п	Воздействие	Эффективная площадь пояса	Определение параметров	Примечание
1	При учете эффекта сдвигового запаздывания (для сжатого и растянутого пояса)	Эффективная ^s площадь $A_{eff} = 2 b_{eff} t_f$, где $b_{eff} = \beta b_0$, $b_0 = b_f/2$	$\beta \Rightarrow$ по таблице 3.1 в зависимости от k $k = \alpha_0 b_0 / L_0$, где $\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{st}}{b_0 t}}$	рисунок 3.1, или рисунок 3.2. [2], таблица 3.1. [2]
2	При потере устойчивости сжатого пояса от действия нормальных напряжений	Эффективная ^p площадь $A_{c,eff} = \rho A_c$, где ρ – понижающий коэффициент при потере устойчивости; A_c – площадь пояса брутто.	при $\lambda_p \leq 0,748 \Rightarrow \rho = 1$; при $\lambda_p > 0,748 \Rightarrow$ $\rho = \frac{\lambda_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1$, где $\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}}{28,4 t \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}$, k_σ принимают в зависимости от $\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$, если $\sigma_1 = \sigma_2$, то $k_\sigma = 0,43$, таблица 3.3.	Таблица 3.3, или 4.4 [2] и таблица 4.2 [2]
3	При одновременном воздействии сдвигового запаздывания и потери устойчивости пластины (для сжатого пояса)	Эффективная площадь $A_{eff} = A_{c,eff} \beta_{ult}$, где $A_{c,eff}$ – при потере устойчивости пояса от действия нормальных напряжений (2)	$\beta = \beta_{ult}$, где $\beta \Rightarrow$ по таблице 3.1 в зависимости от $k = \alpha_0 b_0 / L_0$ с заменой α_0 на $\alpha_0^* = \sqrt{\frac{A_{c,eff}}{b_0 t_f}}$ 3.5 и таблица 3.1	см. подраздел 3.3 [2], таблица 3.1. [2]

Таблица 3.5 – Определение эффективной площади поперечного сечения стенки

№ п/п	Воздействие	Эффективная площадь стенки	Определение параметров	Примечание
1	При потере устойчивости и стенки от действия нормальных сжимающих напряжений	<p>Эффективную^p высоту сжатой зоны стенки</p> $b_{eff} = \rho b_c = \rho c_w / (1 - \psi)$ <p>где ρ - понижающий коэффициент при потере устойчивости; b_c - высота сжатого участка стенки, а $b_{e1} = 0,4b_{eff}$, $b_{e2} = 0,6b_{eff}$ (см. таблицу 4.1(2)); $C_w = h_w - 2k_f$</p>	<p>при $\lambda_p \leq 0,673 \Rightarrow \rho = 1$;</p> <p>при $\lambda_p > 0,673 \Rightarrow$</p> $\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$ <p>где</p> $\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}}{28,4t\epsilon\sqrt{k_\sigma}},$ <p>k_σ принимают в зависимости от $\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$, таблица 3.2</p>	см. подраздел 4.4 [2] и таблица 4.1 [2];

4 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

4.1 Основные положения

Расчетное значение изгибающего момента M_{Ed} в каждом поперечном сечении должно удовлетворять условию:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0, \quad (4.1)$$

где $M_{c,Rd}$ определяется с учетом наличия в сечении отверстий.

Расчетное значение несущей способности на изгиб относительно одной из главных осей поперечного сечения определяется следующим образом:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{для поперечных сечений классов 1 и 2;}$$

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{для поперечных сечений класса 3;}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{для поперечных сечений класса 4,}$$

где $W_{el,min}$ и $W_{eff,min}$ соответствуют волокнам с максимальным напряжением в упругой стадии.

Отверстия для болтов в растянутой полке можно не учитывать, если для нее выполняется условие

$$\frac{A_{f,net} 0,9f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (4.2)$$

где A_f — площадь растянутой полки;

$A_{f,net}$ — площадь сечения нетто растянутой полки;

γ_{M2} — частный коэффициент безопасности при расчете по временному сопротивлению.

Отверстия в растянутой части стенки учитывать не следует, если неравенство (4.2) удовлетворяется полностью для растянутой зоны, включая растянутую полку и часть растянутой стенки.

Отверстия для болтов, за исключением отверстий с большим припуском и овальных отверстий, расположенных в сжатой зоне сечения, не учитываются, если в отверстия установлены болты.

4.2 Расчет на действие поперечной силы

Расчетное значение поперечной силы V_{Ed} в каждом поперечном сечении должно удовлетворять условию:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0, \quad (4.3)$$

где $V_{c,Rd}$ — расчетное значение несущей способности на сдвиг.

Отверстия для болтов не учитываются при проверке несущей способности на сдвиг, за исключением проверки прочности на сдвиг зон сопряжения, как указано в ТКП EN 1993-1-8.

4.3 Расчет на сдвиг в пластической стадии

При отсутствии кручения расчетное значение несущей способности на сдвиг в пластической стадии равно:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}, \quad (4.4)$$

где A_v — площадь сдвига.

Площадь сдвига A_v может приниматься следующим образом:

- для прокатных двутавровых сечений, если нагрузка параллельна стенке $A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$, но не менее $\eta h_w t_w$;
- для прокатных швеллерных сечений, если нагрузка параллельна стенке:

$$A - 2bt_f + (t_w + r)t_f;$$

- для сварных двутавровых и коробчатых сечений, если нагрузка параллельна стенке:

$$\eta \Sigma(h_w t_w);$$

- для прямоугольных замкнутых сечений из листового проката постоянной толщины:

- если нагрузка параллельна высоте сечения:

$$Ah/(b+h);$$

- если нагрузка параллельна ширине сечения:

$$Ab/(b+h),$$

где A — площадь поперечного сечения;

b — ширина сечения;

h — высота сечения;

h_w — высота стенки;

r — радиус сопряжения полки со стенкой;

t_f — толщина полки;

t_w — толщина стенки (если толщина стенки не постоянна, то t_w следует принимать равной минимальной толщине);

η — значение $\eta = 1,20$ рекомендуется для марок стали с пределом текучести до 460 МПа, для более прочных сталей рекомендуется применять $\eta = 1,0$.

4.4 Расчет на сдвиг в упругой стадии

Для проверки прочности стенки на сдвиг в упругой стадии (3 класс сечений) $V_{c,Rd}$ можно применять следующее условие для критической точки поперечного сечения, если только обеспечена местная устойчивость согласно разделу 5 ТКП EN 1993-1-5:

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y / (\sqrt{3} \gamma_{M0})} \leq 1,0, \quad (4.5)$$

где $\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} S}{I t}$,

V_{Ed} — расчетное значение усилия сдвига;

S — статический момент сдвигаемой части сечения относительно центральной оси;

I — момент инерции поперечного сечения;

t — толщина сечения в рассматриваемой точке.

Для двутавровых сечений при $A_f/A_w \geq 0,6$ касательные напряжения в стенке можно принимать равными:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_w},$$

где A_f — площадь одной полки;

A_w — площадь стенки.

4.5 Расчет несущей способности на сдвиг (4 класс сечений)

В соответствии с [2] для стенки балки без элементов жесткости с отношением $h_w/t > \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$ и для стенки с элементами жесткости с отношением

$h_w/t > \frac{31}{\eta} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}$ должна производиться проверка несущей способности на срез и

на опорах должны быть предусмотрены поперечные элементы жесткости,

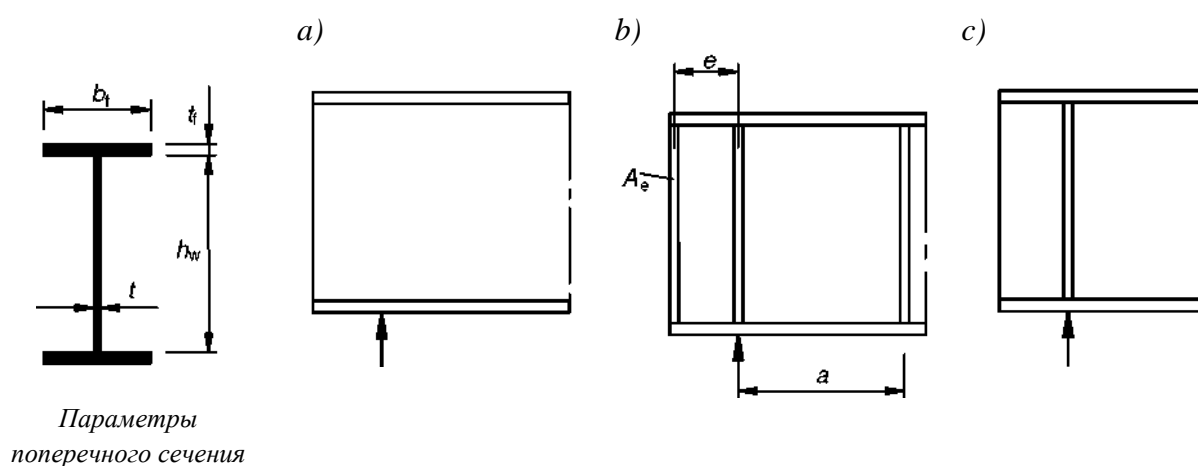
где $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y [\text{Н/мм}^2]}}$;

h_w — высота стенки (см. рисунок 4.1);

k_τ — коэффициент, учитывающий потерю устойчивости при сдвиге;

η — см. 4.3.

Элементы жесткости должны соответствовать требованиям подраздела 9.3 [2], а сварные швы следует выполнять согласно подразделу 9.3.5 [2].



Параметры поперечного сечения

Рисунок 4.1 — Конструктивные решения опорных частей балок:

- a) без элементов жесткости на опоре;
- b) с жесткой опорной частью;
- c) с гибкой опорной частью

Несущей способностью стенки на сдвиг определяется следующим образом:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}, \quad (4.6)$$

где $V_{bw,Rd}$ — составляющая несущей способности стенки;

$V_{bf,Rd}$ — составляющая несущей способности поясов.

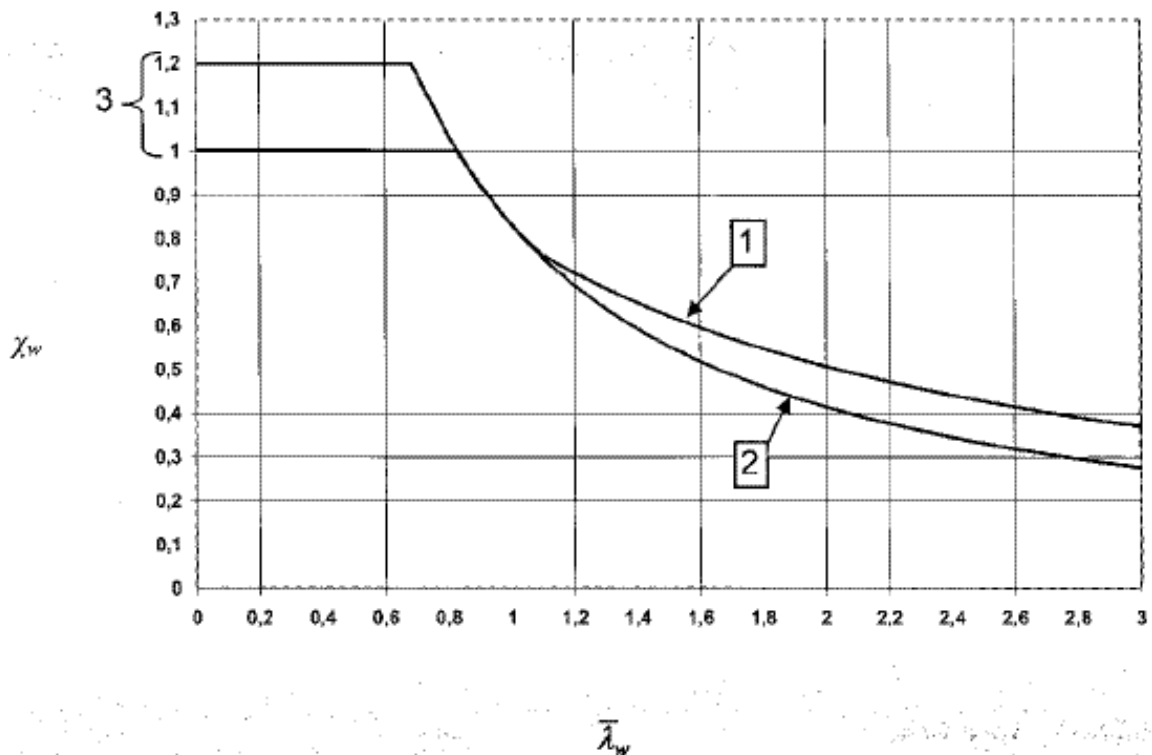
Составляющая несущей способности стенки определяется по формуле:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}. \quad (4.7)$$

В стенках с поперечными элементами жесткости только на опорах и для стенок с промежуточными поперечными и продольными элементами жесткости или при их одновременной установке, при определении несущей способности коэффициент χ_w , **учитывающий потерю устойчивости стенки при работе на срез**, должен определяться согласно таблице 4.1 или графически по рисунку 4.2 в зависимости от условной гибкости стенки $\bar{\lambda}_w$.

Таблица 4.1 – Коэффициент χ_w при определении несущей способности стенки на срез при потере устойчивости

Условная гибкость стенки	Жёсткая опорная часть	Гибкая опорная часть
$\bar{\lambda}_w < 0,83/\eta$	η	η
$0,83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83/\bar{\lambda}_w$	$0,83/\bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37/(0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83/\bar{\lambda}_w$



1 – жесткая опорная часть; 2 – гибкая опорная часть;
3 – зона рекомендуемых значений для η

Рисунок 4.2 – Параметр χ_w потери устойчивости при срезе

Условная гибкость стенки $\bar{\lambda}_w$, приведенная в таблице 4.1 и на рисунке 4.2 должна определяться как:

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}}, \quad (4.8)$$

где $\tau_{cr} = k_\tau \cdot \sigma_E$,

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E t^2}{12(1-\nu^2)h^2} = 190000 \left(\frac{t}{h}\right)^2 \text{ в МПа;}$$

a) для опор только с поперечными элементами жесткости

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4t\varepsilon}; \quad (4.9)$$

b) для опор с поперечными элементами жесткости и промежуточными поперечными или продольными элементами жесткости или с теми и другими при их одновременной установке

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4t\varepsilon\sqrt{k_\tau}}, \quad (4.10)$$

где k_τ — наименьшее значение коэффициента, учитывающего потерю устойчивости стенки панели при работе на срез, принимается по А.3 (приложение А) [2].

Для пластин с жёсткими поперечными элементами жёсткости и без продольных элементов жёсткости или с более чем двумя продольными элементами жёсткости, коэффициент k_τ , учитывающий потерю устойчивости при сдвиге, может быть определён следующим образом:

$$\begin{aligned} k_\tau &= 5.34 + 4 \cdot (h_w / a)^2 + k_{\tau sl} && \text{для } a / h_w \geq 1; \\ k_\tau &= 4 + 5.34 \cdot (h_w / a)^2 + k_{\tau sl} && \text{для } a / h_w < 1, \end{aligned} \quad (4.11)$$

где

$$k_{\tau sl} = 9 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \sqrt[4]{ \left(\frac{I_{sl}}{t^3 h_w} \right)^3 } > \frac{2.1}{t} \sqrt[3]{ \frac{I_{sl}}{h_w} }$$

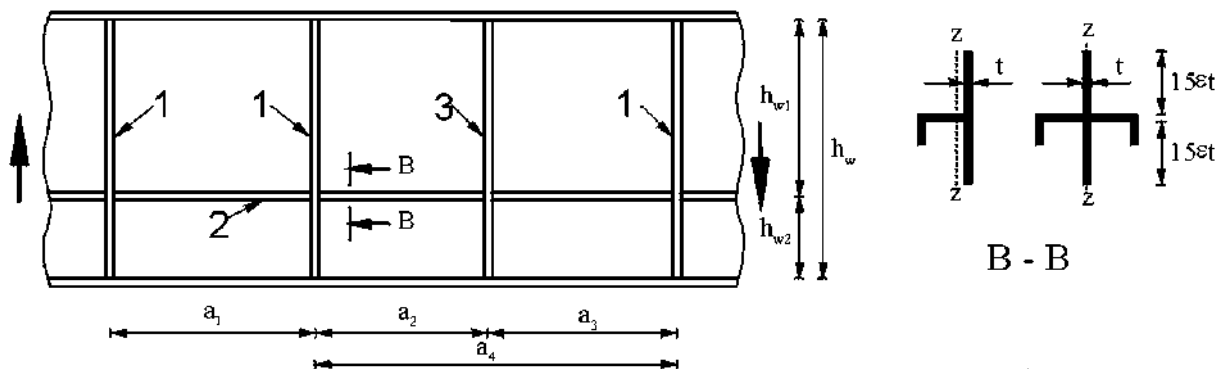
a – расстояние между поперечными элементами жесткости;

I_{sl} – момент инерции продольного элемента жесткости относительно оси $z-z$ (см. рисунок 4.3 б). Для стенок с двумя или более продольными элементами жесткости, независимо от их расположения, I_{sl} является суммой значений жесткостей всех отдельных элементов жёсткости.

Формула (4.12) не распространяется на гибкие опорные участки с поперечными элементами жесткости.

Формулу (4.12) допускается также применять для стенок с одним или двумя продольными элементами жесткости, если $\frac{a}{h_w} \geq 3$. Для пластин с одним или двумя продольными элементами жесткости при $\frac{a}{h_w} < 3$ значение коэффициента k_τ , учитывающего потерю устойчивости при сдвиге, допускается определять следующим образом:

$$k_\tau = 4.1 + \frac{6.3 + 0.18 \frac{I_{sl}}{t^3 h_w}}{\alpha^2} + 2.23 \sqrt[3]{ \frac{I_{sl}}{t^3 h} }$$



- 1 — жесткий поперечный элемент жесткости;
- 2 — продольный элемент жесткости;
- 3 — гибкий поперечный элемент жесткости

Рисунок 4.3 — Стенка с поперечными и продольными элементами

Для панелей с гибкими поперечными элементами жесткости также дополнительно устанавливаются жесткие поперечные элементы жесткости. В этом случае k_t принимается наименьшим из значений для стенки панелей между двумя любыми поперечными элементами жесткости (например, $a_2 \times h_w$ и $a_3 \times h_w$) и для панелей между двумя жесткими элементами жесткости, содержащими гибкие поперечные элементы жесткости (например, $a_4 \times h_w$).

Жесткие границы панелей принимаются, если по краям находятся пояса и жесткие элементы жесткости. В этом случае расчет потери устойчивости на срез может выполняться для панели между двумя соседними поперечными элементами жесткости (например, $a_1 \times h_w$) (см. рисунок 4.3).

При гибких поперечных элементах жесткости наименьшее значение k_t допускается определять при расчетах потери устойчивости следующим образом:

- 1) комбинация из двух соседних панелей стенки с одним гибким поперечным элементом жесткости;
- 2) комбинация из трех соседних панелей стенки с двумя гибкими поперечными элементами жесткости.

При определении k_t момент инерции площади продольного элемента жесткости должен быть уменьшен на 1/3 его действительного значения. В формуле для определения k_t принимается это снижение согласно А.3 (приложение А) [2].

Для стенок с продольными элементами жесткости условная гибкость $\bar{\lambda}_w$ должна приниматься не менее чем по формуле (4.13)

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_{wi}}{37,4t\varepsilon \cdot \sqrt{k_{ti}}} \quad (4.12)$$

В этом случае h_{wi} и k_{ti} относятся к отсеку с наибольшей условной гибкостью $\bar{\lambda}_w$ при рассмотрении стенки панели всех отсеков.

Примечание — Для расчета k_{ti} , приведенного в примечании А.3 [2] допускается использовать $k_{tst} = 0$.

Составляющая несущей способности поясов (когда расчетный изгибающий момент не соответствует несущей способности поясов на изгиб при потере устойчивости $M_{Ed} < M_{f,Rd}$) определяется как:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right), \quad (4.13)$$

где b_f и t_f – ширина и толщина пояса, который имеет наименьшую осевую прочность;

b_f – принимается не более $15 \varepsilon t_f$ от каждой стороны стенки;

$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,k}}{\gamma_{M0}}$ – расчетное значение несущей способности поперечного

сечения поясов по изгибающему моменту при учете только эффективных площадей поясов;

$$c = a \left(0,25 + \frac{1,6 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w^2 f_{yw}} \right).$$

4.6 Элементы, подверженные действию изгибающего момента и поперечной силы

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

Если поперечная сила меньше половины несущей способности на сдвиг в пластической стадии ($V_{Ed} < 0,5 V_{pl,Rd}$), его влиянием на несущую способность на изгиб можно пренебречь, кроме случаев, когда потеря местной устойчивости при сдвиге уменьшает несущую способность поперечного сечения, см. ТКП EN 1993-1-5.

В остальных случаях уменьшенное значение несущей способности на изгиб следует принимать равным расчетному значению несущей способности поперечного сечения, рассчитанному по уменьшенному значению предела текучести

$$(1 - \rho) f_y, \quad (4.14)$$

где $\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$ и $V_{pl,Rd}$ определяется по 4.3 – $V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$.

Уменьшенное расчетное значение несущей способности на изгиб в пластической стадии с учетом сдвигающей силы для двутавровых сечений с одинаковыми полками, изгибаемых относительно главной оси, как вариант можно определить по формуле

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left[W_{pl,y} - \frac{\rho A_w^2}{4 t_w} \right] f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ но } M_{y,V,Rd} \leq M_{y,c,Rd}, \quad (4.15)$$

где $M_{y,c,Rd}$ определяется по п. 4.2 $M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$;

$$A_w = h_w t_w.$$

5. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ ПО УСТОЙЧИВОСТИ

Элемент, изгибаемый относительно главной оси и не раскрепленный из плоскости действия изгибающего момента, следует проверять на устойчивость плоской формы изгиба по формуле:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0, \quad (5.1)$$

где M_{Ed} — расчетное значение изгибающего момента;

$M_{b,Rd}$ — расчетное значение несущей способности изгибаемого элемента по устойчивости плоской формы изгиба.

Балки с достаточным раскреплением сжатой полки не теряют устойчивости плоской формы изгиба. Кроме того, балки определенного типа поперечного сечения, такого как квадратные или круглые замкнутые сечения из листового проката постоянной толщины, сварные круглые трубы или прямоугольные коробчатые сечения, также не подвержены потере устойчивости плоской формы изгиба.

Расчетное значение несущей способности по устойчивости плоской формы изгиба для балок, не раскрепленных из плоскости действия изгибающего момента, следует принимать равным:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (5.2)$$

где W_y — соответствующий момент сопротивления сечения, принимаемый следующим образом (при определении W_y отверстия на конце балки учитывать не следует):

$W_y = W_{pl,y}$ для поперечных сечений классов 1 и 2,

$W_y = W_{el,y}$ для поперечных сечений класса 3,

$W_y = W_{eff,y}$ для поперечных сечений класса 4;

χ_{LT} — понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба (см. 5.1).

5.1 Кривые потери устойчивости плоской формы изгиба.

Общий случай

Для изгибаемых элементов постоянного поперечного сечения значение χ_{LT} при соответствующей условной гибкости $\bar{\lambda}_{LT}$ следует определять по формуле:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \text{ но } \chi_{LT} \leq 1,0, \quad (5.3)$$

где $\Phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2]$;

α_{LT} — коэффициент, учитывающий начальные несовершенства, принимают согласно таблицам 5.1 и 5.2;

$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$ — условная гибкость при потере устойчивости плоской

формы изгиба;

M_{cr} — критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии.

При определении M_{cr} принимаются геометрические характеристики поперечного сечения брутто и учитываются условия загрузки, действительное распределение момента и раскрепления из плоскости действия изгибающего момента.

Таблица 5.1 – Рекомендуемые значения коэффициентов, учитывающих начальные несовершенства, для кривых потери устойчивости плоской формы изгиба

Кривая потери	a	b	c	d
Коэффициент α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Рекомендации по выбору кривой потери устойчивости приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Рекомендуемые кривые потери устойчивости плоской формы изгиба

Поперечное сечение	Пределы	Кривая потери устойчивости
Прокатные двутавровые сечения	$h/b < 2$	a
	$h/b > 2$	b
Сварные двутавровые сечения	$h/b < 2$	c
	$h/b > 2$	d
Другие поперечные сечения	-	d

Значения понижающего коэффициента χ_{LT} при соответствующей условной гибкости $\bar{\lambda}_{LT}$ можно определить по графику на рисунке 5.1

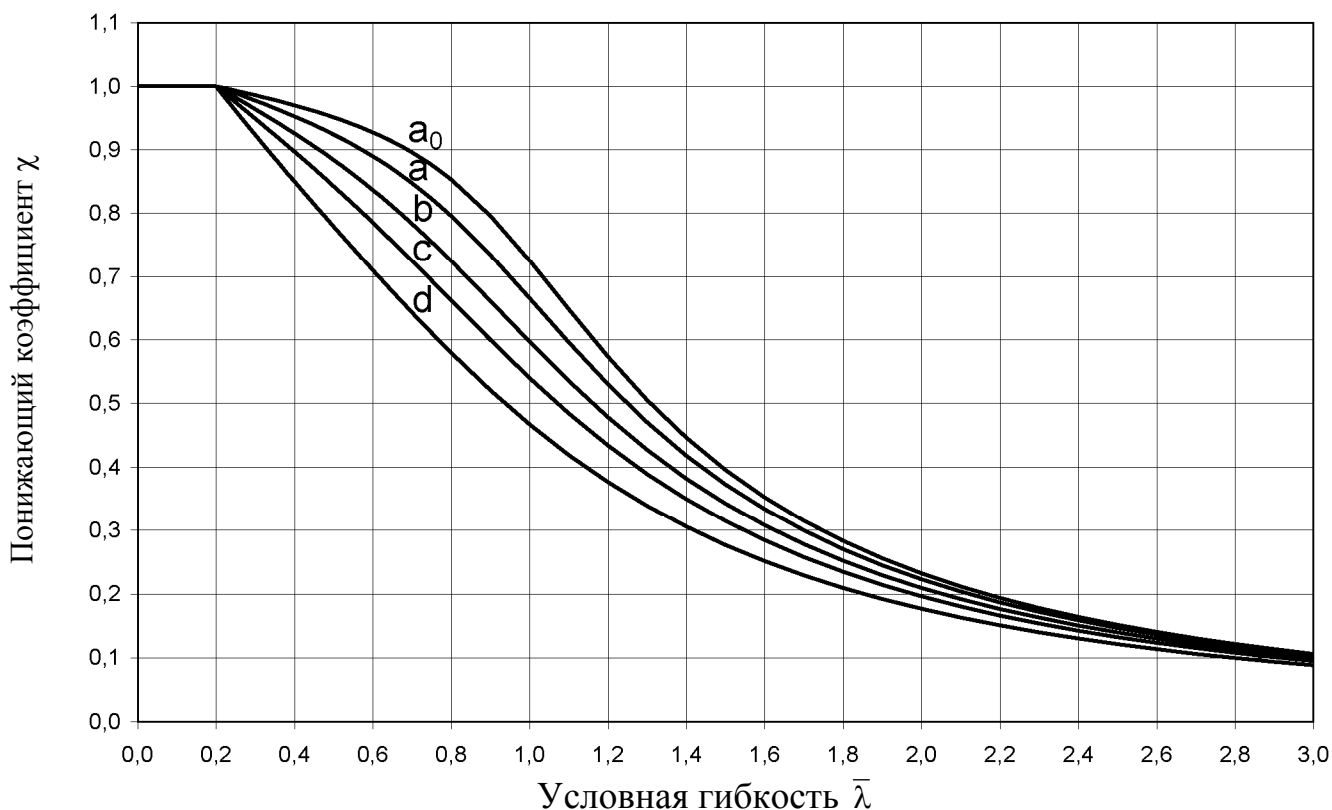


Рисунок 5.1 – Кривые потери устойчивости

5.2 Кривые потери устойчивости плоской формы изгиба для прокатных или эквивалентных сварных поперечных сечений

При условной гибкости $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}$ или при $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2$ проверкой устойчивости плоской формы изгиба можно пренебречь.

Для изгибаемых прокатных или эквивалентных сварных сечений значения χ_{LT} для соответствующей условной гибкости можно определить по формуле:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \text{ но } \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1,0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases}, \quad (5.4)$$

где $\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$.

Для прокатных и эквивалентных сварных сечений рекомендуются следующие значения:

$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$ (максимальное значение);

$\beta = 0,75$ (минимальное значение);

α_{LT} — коэффициент, учитывающий начальные несовершенства, принимают согласно таблице 5.1 в зависимости от кривой потери устойчивости, выбираемой по таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Рекомендации по выбору кривой потери устойчивости плоской формы изгиба в расчетах с использованием формулы (5.4)

Поперечное сечение	Пределы	Кривая потери устойчивости
Прокатные двутавровые сечения	$h/b < 2$	b
	$h/b > 2$	c
Сварные двутавровые сечения	$h/b < 2$	c
	$h/b > 2$	d

При раскреплении балки по длине пролета связями (элементами бокового раскрепления) в расчете необходимо скорректировать изгибающий момент. Для учета изменения изгибающего момента в балке между элементами бокового раскрепления, понижающий коэффициент χ_{LT} можно скорректировать следующим образом:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f}, \text{ но } \chi_{LT,mod} \leq 1. \quad (6.5)$$

Примечание – Значения f могут быть приведены в Национальном приложении. Рекомендуются следующие минимальные значения:

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c) \left[1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right], \text{ но } f \leq 1,0$$

где k_c — поправочный коэффициент по таблице 6.6 [2].

6. ПРИМЕРЫ РАСЧЁТА ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ТКП ЕН

Пример 1. Поперечное сечение класса 1 и 2

Дано: Балка из двутавр 30Б1 ГОСТ 26020, сталь С245,

$$f_y = 245 \text{ МПа}, e = \sqrt{\frac{235}{245}} = 0.98.$$

Геометрические характеристики сечения (рисунок 6.1):

$h = 296 \text{ мм}$, $b = 140 \text{ мм}$, $t_f = 8.5 \text{ мм}$, $t_w = 5.8 \text{ мм}$, $R = 15 \text{ мм}$,

$$W_{pl} = 2S = 240 \times 2 = 480 \text{ см}^3.$$

Определить: расчётное значение несущей способности балки на изгиб.

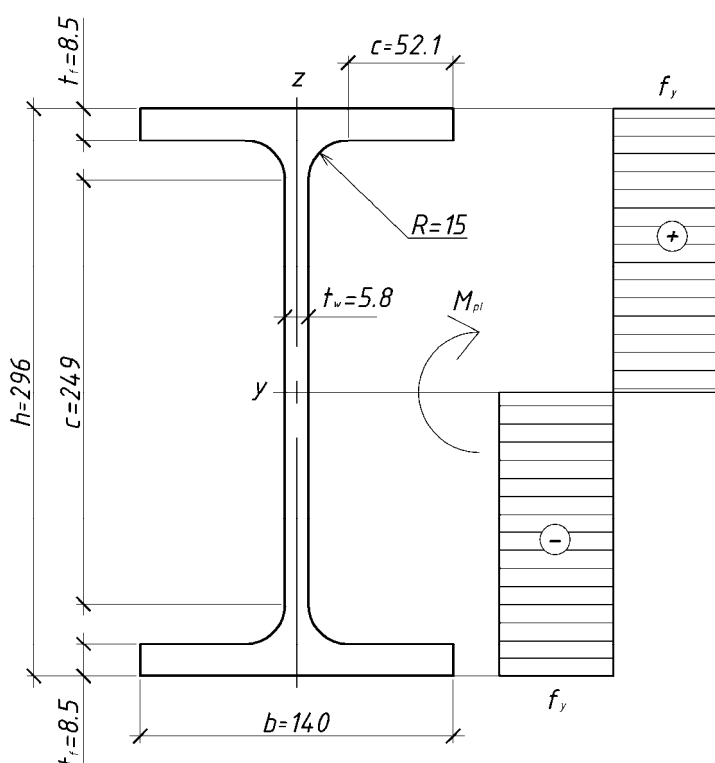


Рисунок 6.1 – Поперечное сечение балки. Распределение напряжений в частях сечения

1) Определение класса поперечного сечения (таблица 2.1 или 5.2 [2]):

Полка:

$$c = \frac{140 - (5.8 + 2 \times 15)}{2} = 52.1 \text{ мм};$$

$$\frac{c}{t_f} = 6.12 < 9e = 8.82.$$

Полка относится к 1-ому классу.

Стенка:

$$c = 296 - 2 \times (8.5 + 1.5) = 249 \text{ мм};$$

$$\frac{c}{t_w} = 42.9 < 72e = 70.56 .$$

Стенка относится к 1-ому классу.

Поперечное сечение балки относится к 1-ому классу. Дальнейший расчет выполняем с учетом развития пластических деформаций.

2) Определение расчётного значения несущей способности на изгиб.

Несущая способность балки на изгиб с поперечным сечением класса 1 и 2 будет обеспечена , если выполняется условие:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1.0 ,$$

где M_{Ed} — расчётное значение изгибающего момента;

$M_{pl,Rd}$ — расчётного значения несущей способности на изгиб в пластической стадии.

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{480 \times 245 \times 10^{-3}}{0,931} = 126 / 31 \text{кНм} ,$$

где $\gamma_{M0} = \frac{\gamma_m}{\gamma_c} = \frac{1,025}{1,1} = 0,931$ (см. национальное приложение НП.3, НП.4 [1]).

Пример 2. Поперечное сечение класса 3

Дано: Балка – сварной двутавр (рисунок 6.2), сталь С345

ГОСТ 27772, $f_y=345$ МПа, $e = \sqrt{\frac{235}{345}} = 0.825$.

Геометрические характеристики сечения:

$h = 1000$ мм, $b = 360$ мм, $t_f = 20$ мм, $t_w = 10$ мм, поясные швы катетом 8 мм.

Определить: Расчётное значение несущей способности балки на изгиб.

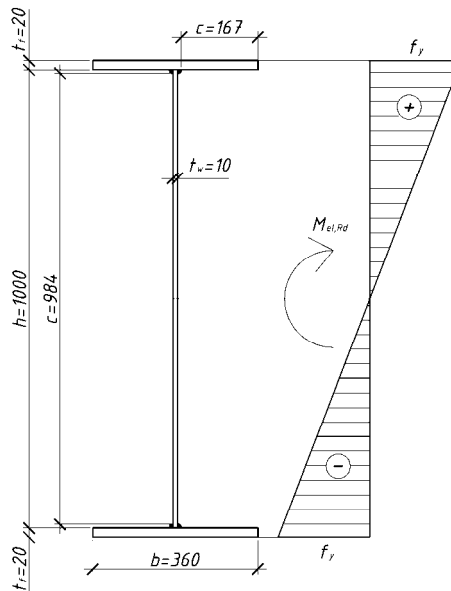


Рисунок 6.2 — Поперечное сечение сварной балки. Распределение напряжений в частях сечения

1) Определение класса поперечного сечения (таблица 2.1 или 5.2 [2])

Пояс

$$c = \frac{360 - (10 + 2 \times 8)}{2} = 167 \text{ мм};$$

$$10e = 8.25 < \frac{c}{t_f} = 8.35 < 14e = 11.55 .$$

Пояс относится к 3-ему классу.

Стенка:

$$c = 1000 - 2 \times 8 = 984 \text{ мм};$$

$$83e = 68.47 < \frac{c}{t_w} = 98.4 < 124e = 102.3 .$$

Стенка относится к 3-ему классу.

Поперечное сечение балки относится к 3-ему классу.

2) Определение геометрических характеристик сечения

Момент инерции сечения относительно нейтральной оси у-у.

$$I_y = \frac{1 \times 100^3}{12} + \frac{36 \times 2^3}{12} + 2 \times 36 \times 2 \times 51^2 = 457889 \text{ см}^4 .$$

Момент сопротивления относительно нейтральной оси у-у.

$$W_{el,min} = \frac{457889 \times 2}{140} = 6541.2 \text{ см}^3 .$$

3) Определение расчётного значения несущей способности на изгиб

Несущая способность балки на изгиб с поперечным сечением класса 3 будет обеспечена, если выполняется условие:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{el,Rd}} \leq 1.0,$$

M_{Ed} – расчётное значение изгибающего момента;

$M_{el,Rd}$ – расчётного значения несущей способности на изгиб.

$$M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min}^I \cdot y}{\gamma_{M0}} = \frac{6541,2 \times 345 \times 10^{-3}}{0,931} = 2423,9 \text{ кНм},$$

где $\gamma_{M0} = \frac{\gamma_m}{\gamma_c} = \frac{1,025}{1,1} = 0,931$ (см. национальное приложение НП.3, НП.4 [1]).

Пример 3. Поперечное сечение класса 4

Дано: Однопролетная шарнирно-опертая балка двутаврового сварного сечения пролетом $L=12$ м. Сталь С345 по ГОСТ 27772.

Расчетное значение изгибающего момента $M_{Ed} = 8500$ кНм.

Размеры поперечного сечения: $b_f = 550$ мм, $t_f = 30$ мм, $h_w = 1600$ мм, $t_w = 11$ мм, $k_f = 10$ мм – катет сварного шва (рисунок 6.3).

Необходимо: Проверить прочность балки на действие изгибающего момента.

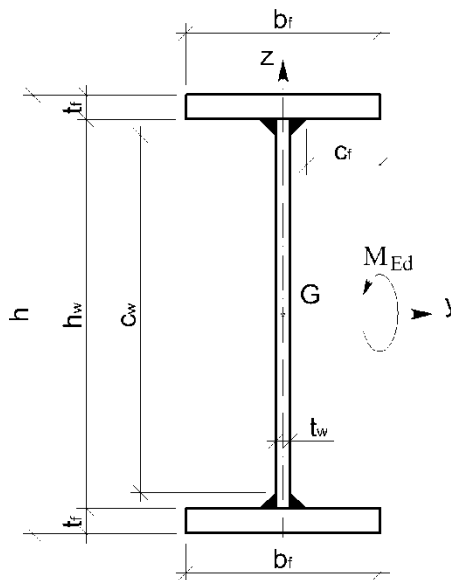


Рисунок 6.3 – Исходное поперечное сечение с обозначениями размеров

1) Для С345 (по НП.1[1]) $f_y = 315$ МПа для толщины от 10 до 20 мм, $f_y = 300$ МПа для толщины от 20 до 40 мм.

2) Определение класса поперечного сечения (таблица 2.1 или 5.2[2]).

Стенки балки:

$$c_w = h_w - 2k_f = 1600 - 2 \cdot 10 = 1580 \text{ мм},$$

где k_f – катет сварного шва,

Тогда:

$$\frac{c_w}{t_w} = \frac{1580}{11} = 143.64 > 124 \varepsilon = 124 \cdot 0.8637 = 107.1,$$

где $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{315}} = 0.8637.$

Стенка балки относится к 4-му классу поперечных сечений.

Пояс балки:

$$c_f = \left(\frac{b_f - t_w}{2} \right) - k_f = \left(\frac{550 - 11}{2} \right) - 10 = 259.5 \text{ мм},$$

Тогда:

$$\frac{c_f}{t_f} = \frac{259.5}{30} = 8.65 < 10 \varepsilon = 10 \cdot 0.88506 = 8.8506,$$

где $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{300}} = 0.88506.$

Пояс балки относится ко 2-му классу поперечных сечений.

Все поперечное сечение балки относится к классу 4.

3) Проверка прочности поперечного сечения балки при действии изгибающего момента (формула (4.1)):

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,$$

где несущая способность поперечного сечения по прочности при действии изгибающего момента

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{\text{eff,min}} f_y}{\gamma_{M0}},$$

где $\gamma_{M0} = \frac{\gamma_m}{\gamma_c} = \frac{1,025}{1,1} = 0,931, f_y = 300 \text{ МПа}.$

4) Определение минимального момента сопротивления эффективного сечения $W_{\text{eff,min}}$

4.1) Определение эффективной ширины сжатого пояса поперечного сечения при потере его устойчивости как пластины с односторонним закреплением от действия нормальных напряжений.

Отношение напряжений в крайних точках сжатого пояса (таблица 3.3):

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1 \rightarrow k_\sigma = 0.43,$$

тогда условная гибкость пояса (см. 3.4):

$$\bar{\lambda}_p = \frac{c_f/t_f}{28.4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{259.5/30}{28.4 \cdot 0.88506 \sqrt{0.43}} = 0.5248 < 0.748.$$

Таким образом, местная устойчивость сжатого пояса обеспечена.

4.2) Учет эффекта сдвигового запаздывания в поясах (см. подраздел 3.1):

$$\frac{b_0}{L_e} = \frac{275}{12000} = 0.0229 > 0.02,$$

где $b_0 = b_f/2 = 550/2 = 275$ мм,

$L_e = L = 12000$ мм – расстояние между нулевыми точками изгибающих моментов.

Следовательно, необходимо учесть в расчете эффект сдвигового запаздывания для поясов балки.

Эффективная ширина b_{eff} при учете сдвигового запаздывания в упругой стадии работы равна:

$$b_{eff} = \beta \cdot b_0,$$

где коэффициент β определяется по табл.3.1 в зависимости от k .

$$k = \frac{\alpha_0 \cdot b_0}{L_e} = 0.0229,$$

где $\alpha_0 = 1$ – при отсутствии продольных элементов жесткости в пределах ширины пояса b_0 .

По таблице 3.1, так как $0.02 < k = 0.0229 \leq 0.7$, то

$$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6.4 k^2} = \frac{1}{1 + 6.4 \cdot 0.0229^2} = 0.99665.$$

Тогда

$$b_{eff} = \beta \cdot b_0 = 0.99665 \cdot 275 = 274 \text{ мм},$$

$$b_{f,eff} = 2 \cdot 274 = 548 \text{ мм}.$$

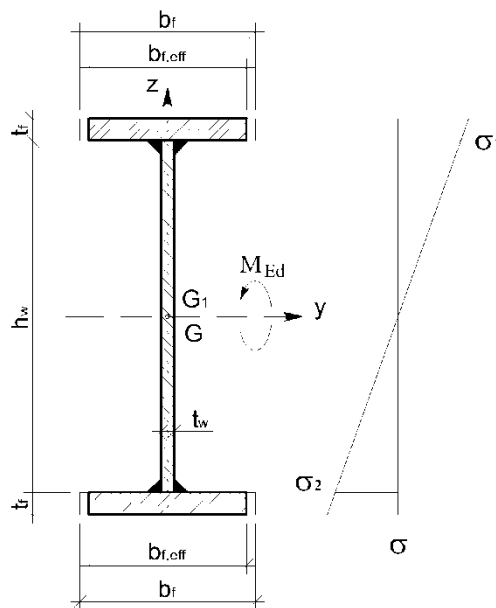


Рисунок 6.4 – Эффективное поперечное сечение и распределение нормальных напряжений с учетом эффекта сдвигового запаздывания

4.3) Определение эффективной ширины стенки при потере устойчивости, как пластины с двусторонним закреплением, от действия нормальных напряжений.

Отметим, что учет эффекта сдвигового запаздывания в поясах в данном случае не влияет на эффективную ширину стенки, т.е. коэффициент ψ не изменяется.

Отношение напряжений в крайних точках стенки на первом шаге расчета (рисунок 6.4, таблица 3.2):

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1 \rightarrow k_\sigma = 23.9,$$

тогда условная гибкость стенки:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{c_w/t_w}{28.4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{1580/11}{28.4 \cdot 0.8637 \sqrt{23.9}} = 1.1978 > 0.673.$$

Таким образом, местная устойчивость сжатой части стенки не обеспечена. Определим значение понижающего коэффициента при потере устойчивости пластины с двусторонним закреплением (см. 3.4, формула (3.3)):

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \text{ для } \bar{\lambda}_p > 0.673 \text{ и } (3 + \psi) \geq 0,$$

$$\rho = \frac{1.1978 - 0.055(3 - 1)}{1.1978^2} = 0.7582.$$

Эффективная ширина сжатой части стенки (таблица 3.2) и размеры неэффективных частей с учетом $\bar{b} = c_w$:

$$b_{\text{eff}} = \rho b_c = \frac{\rho \bar{b}}{1 - \psi} = \frac{0.7582 \cdot 1580}{1 + 1} = 599 \text{ мм},$$

$$b_{e1} = 0.4 b_{\text{eff}} = 239.6 \text{ мм}, \quad b_{e2} = 0.6 b_{\text{eff}} = 359.4 \text{ мм}.$$

На данном шаге расчета $b_c = 0.5 \bar{b} = 790 \text{ мм}$.

4.4) Определение геометрических характеристик эффективного поперечного сечения относительно центральной оси y_{eff} .

Координата центра тяжести (G_2) эффективного поперечного сечения:

$$z_H = -81.0245 \text{ см}, \quad z_B = h + z_H = 84.9755 \text{ см}.$$

Осевой момент инерции эффективного сечения:

$$I_{y,\text{eff}} = 2513681.4 \text{ см}^4.$$

4.5) Уточнение эффективной ширины стенки поперечного сечения при потере ее устойчивости как пластины с двусторонним закреплением от действия нормальных напряжений

Отношение напряжений в крайних точках стенки на втором шаге расчета (рисунок 6.5, таблица 3.2) пропорционально расстояниям от крайних точек сечения до его центра тяжести (т.к. пояса одинаковы):

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{z_H}{z_B} = \frac{-81.0245}{84.9755} = -0.9535,$$

тогда

$$k_\sigma = 7.81 - 6.29\psi + 9.78\psi^2 = 22.7.$$

Условная гибкость стенки:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{c_w/t_w}{28.4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{1580/11}{28.4 \cdot 0.8637 \sqrt{22.7}} = 1.23 > 0.673.$$

Понижающий коэффициент при потере устойчивости пластины с двусторонним закреплением (3.4, формула 3.3):

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \text{ для } \bar{\lambda}_p > 0.673 \text{ и } (3 + \psi) \geq 0,$$
$$\rho = \frac{1.23 - 0.055(3 - 0.9535)}{1.23^2} = 0.7386.$$

Эффективная ширина сжатой части стенки (таблица 3.2) и размеры неэффективных частей с учетом $\bar{b} = c_w$:

$$b_{\text{eff}} = \rho b_c = \frac{\rho \bar{b}}{1 - \psi} = \frac{0.7386 \cdot 1580}{1 + 0.9535} = 597.38 \text{ мм},$$

$$b_{e1} = 0.4 b_{\text{eff}} = 239 \text{ мм}, \quad b_{e2} = 0.6 b_{\text{eff}} = 358.38 \text{ мм}.$$

На данном шаге расчета $b_c = 808,804 \text{ мм}$.

4.6) Уточним геометрические характеристики эффективного поперечного сечения относительно центральной оси y_{eff}

Координата центра тяжести (G_2) эффективного поперечного сечения:

$$z_H = -80.87 \text{ см}, \quad z_B = h + z_H = 85.13 \text{ см}.$$

Осевой момент инерции эффективного сечения:

$$I_{y,\text{eff}} = 2512245 \text{ см}^4.$$

Минимальный момент сопротивления изгибу эффективного сечения:

$$W_{\text{min,eff}} = \frac{I_{y,\text{eff}}}{z_B} = 2512245/85,13 = 29510,7 \text{ см}^3.$$

Уточнение эффективного поперечного сечения и его геометрических характеристик можно продолжать до достижения некоторой заданной погрешности.

Отметим, что без учета эффективного сечения $W_y = 30935 \text{ см}^3$.

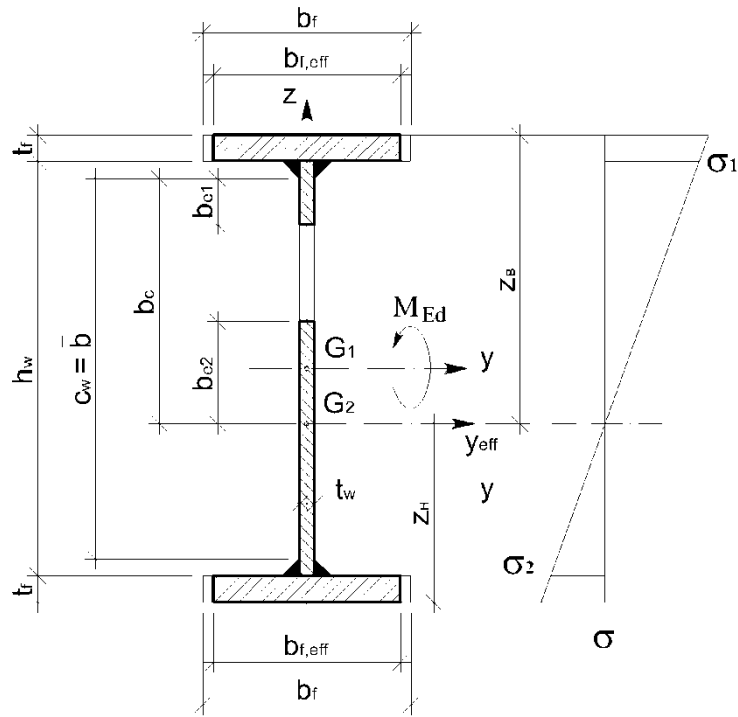


Рисунок 6.5 – Эффективное поперечное сечение и распределение нормальных напряжений с учетом эффектов сдвигового запаздывания и потери местной устойчивости сжатых частей сечения

5) Несущая способность поперечного сечения по прочности при действии изгибающего момента (см. 4.1):

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{29510,7 \times 300 \times 10^{-3}}{0,931} = 9509,3 \text{ кНм},$$

где $\gamma_{M0} = \frac{\gamma_m}{\gamma_c} = \frac{1,025}{1,1} = 0,931$ (см. национальное приложение НП.3, НП.4 [1]).

$$M_{Ed} = 8500 \text{ кНм} < M_{c,Rd} = 9509,3 \text{ кНм},$$

несущая способность балки обеспечена.

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.