



(17)-0359-1

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТА БАЛКИ ПЕРЕКРЫТИЯ  
ДВУТАВРОВОГО СЕЧЕНИЯ ПО ЕВРОКОД 3 И СНИП II-23-81\*****А. М. Алёхин<sup>1</sup>, А. Н. Бурдель<sup>2</sup>***ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.**E-mail: <sup>1</sup>alyokhin\_20@mail.ru, <sup>2</sup>burdelanton@mail.ru**Получена 28 апреля 2017; принята 23 июня 2017.*

**Анотация.** В статье представлен сравнительный анализ балок перекрытия двутаврового сечения по Еврокод 3: «Стальные конструкции» [1] и по СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции» [6]. Объектом исследования являлась балка двутаврового сечения длиной 17,5 м в рамно-связевом каркасе. На основании максимальных полученных усилий ( $M_{\max} = 2\,130$  кНм;  $Q_{\max} = 690$  кН;  $N_{\max} = -147$  кН) [14] были приняты граничные высоты балок от 1 090 до 1 690 мм со стенками толщиной от 4 до 8 мм по существующему сортаменту металлопроката ГОСТ 19903-74\* «Прокат листовой горячекатаный» [8] и ГОСТ 82-70\* «Прокат стальной горячекатаный широкополосный универсальный» [9]. Проведено сравнение методик расчета балок. Рассмотрены граничные условия, определяющие стадийность работы стенки. По результатам расчета определены значения металлоемкостей балок в зависимости от высоты и толщины стенки, а также шага поперечных элементов жесткости по [1] и [6]. Определена оптимальная толщина и высота стенки балки, а также необходимый шаг поперечных ребер жесткости. Проведен анализ полученных значений и определены основные факторы, влияющие на металлоемкость балки.

**Ключевые слова:** балка перекрытия, 4-й класс сечения, балка с гибкой стенкой, эффективная площадь, местная устойчивость, поперечные элементы жесткости, предел текучести, двутавровое сечение, упругая работа материала.

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗРАХУНКУ БАЛКИ ПЕРЕКРИТТЯ  
ДВОТАВРОВОГО ПЕРЕРІЗУ ЗА ЄВРОКОД 3 І СНИП II-23-81\*****А. М. Альохін<sup>1</sup>, А. М. Бурдель<sup>2</sup>***ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,  
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.**E-mail: <sup>1</sup>alyokhin\_20@mail.ru, <sup>2</sup>burdelanton@mail.ru**Отримана 28 квітня 2017; прийнята 23 червня 2017.*

**Аннотация.** У статті представлений порівняльний аналіз балок покриття двотаврового перерізу за Єврокод 3: «Сталеві конструкції» [1] і за СНиП II-23-81\* «Сталеві конструкції» [6]. Об'єктом дослідження була балка двотаврового перерізу довжиною 17,5 м в рамно-в'язевому каркасі. На підставі максимальних отриманих зусиль ( $M_{\max} = 2\,130$  кНм;  $Q_{\max} = 690$  кН;  $N_{\max} = -147$  кН) [14] були прийняті граничні висоти балок від 1 090 до 1 690 мм зі стінками товщиною від 4 до 8 мм за існуючим сортаментом металлопрокату ГОСТ 19903-74\* «Прокат листовий гарячекатаний» [8] і ГОСТ 82-70\* «Прокат сталевий гарячекатаний ширококутний універсальний» [9]. Проведено порівняння методик розрахунку балок. Розглянуто граничні умови, що визначають стадійність роботи стінки. За результатами розрахунку визначені значення металлоемкостей балок залежно від висоти і товщини стінки, а також кроку

поперечних елементів жорсткості за [1] і [6]. Визначено оптимальну товщину і висоту стінки балки, а також необхідний крок поперечних ребер жорсткості. Проведено аналіз отриманих значень і визначені основні фактори, що впливають на металоемність балки.

**Ключові слова:** балка перекриття, 4-й клас перерізу, балка з гнучкою стінкою, ефективна площа, місцева стійкість, поперечні елементи жорсткості, межа текучості, двотавровий переріз, пружна робота матеріалу.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CALCULATION OF AN I-BEAM OF CROSS-SECTION ACCORDING TO EUROCODE 3 AND SNIP II-23-81\*

Andrey Alyokhin<sup>1</sup>, Anton Burdel<sup>2</sup>

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,  
2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.

E-mail: <sup>1</sup>alyokhin\_20@mail.ru, <sup>2</sup>burdelanton@mail.ru

Received 28 April 2017; accepted 23 June 2017.

**Abstract.** The article presents a comparative analysis of the beams of the I-beam of cross-section according to Eurocode 3: «Steel structures» [1] and SNiP II-23-81\* «Steel structures» [6]. The object of investigation was a beam of an I-section of 17.5 m in a frame-bonded frame. Based on the maximum effort received ( $M_{\max} = 2\,130$  kNm,  $Q_{\max} = 690$  kN,  $N_{\max} = -147$  kN) [14], the beam heights from 1 090 to 1 690 mm were accepted with walls from 4 to 8 mm thick according to the existing grade of metal roll GOST 19903-74\* «Rolled hot-rolled sheet» [8] and GOST 82-70\* «Rolled steel hot-rolled broadband universal» [9]. Comparison of beam calculation methods is carried out. The boundary conditions determining the staging of the wall operation are considered. According to the calculation results, the metal capacities of the beams are determined depending on the height and wall thickness, and also the step of the transverse stiffeners according to [1] and [6]. The optimum thickness and height of the beam wall, as well as the required step of the transverse stiffeners, are determined. The analysis of the obtained values is carried out and the main factors influencing metal intensity of the beam are determined.

**Keywords:** beam of overlap, 4th class of section, beam with flexible wall, effective area, local stability, transverse stiffeners, yield point, I-section, elastic work of the material.

### Введение

Используемые методики расчета двутавровых балок с гибкой стенкой по ДБН В.2.6-198:2014 [12] и СНиП II-23-81\* [6] являются основными и показывают свою экономическую эффективность. В связи с широкой интеграцией европейских норм расчет балок с «закритической» стадией работы стенки по [1], [3], а также учет основных граничных условий по критерию устойчивости стенки и сравнение полученных результатов с отечественными нормами является актуальной задачей.

Согласно [6] балки с гибкой стенкой ( $6 \leq \bar{\lambda}_w \leq 13$ ) классифицируются как балки, где стенка работает в «закритической» стадии, так как потеря местной устойчивости наступает

раньше исчерпания несущей способности [6]. Условная гибкость  $\bar{\lambda}_w$  является основным параметром для классификации балок по критерию устойчивости.

Классификация поперечных сечений согласно п. 5.5 [1] является ключевым требованием для дальнейшего расчета. Роль классификации состоит в определении границ, при достижении которых несущая и вращательная способности поперечных сечений ограничиваются потерей местной устойчивости. Определение гибкости или вычисление отношения ширины к толщине частей сечения отдельного элемента (стенка, полка) непосредственно определяет его класс. Еврокод 3 регламентирует 4 класса сечения (1-й, 2-й, 3-й, 4-й классы) в зависимости от гибкости

полки и стенки балки. В исследовании представлены балки двутаврового сечения, в которой стенка классифицировалась как элемент 4-го класса. Полка классифицировалась в пределах 1-го, 2-го и 3-го классов п. 5.5.2 [1]. 3-й класс в данном случае является минимально допустимым, по причине необходимого достижения предела текучести в крайних сжатых волокнах сечения. 4-й класс для полки обеспечить представленные требования не может. На основании полученных классов отдельных элементов сечение балки классифицируется по наивысшему (наименее благоприятному) классу его сжатых частей [1]. Следовательно, были рассмотрены балки общего 4-го класса сечения.

Представленные критерии каждого из нормативных документов описывают идентичную стадию работы стенки, что делает актуальным рассмотрение и сравнение этих методик расчета.

Объектом исследования являлась балка двутаврового сечения длиной 17,5 м в рамно-связевом каркасе. На основании максимальных полученных усилий ( $M_{\max} = 2\,130$  кНм;  $Q_{\max} = 690$  кН;  $N_{\max} = -147$  кН) [14] были приняты граничные высоты балок от 1 090 до 1 690 мм со стенками толщиной от 4 до 8 мм по существующему сортменту металлопроката ГОСТ 19903-74\* «Прокат листовой горячекатаный» [8] и ГОСТ 82-70\* «Прокат стальной горячекатаный широкополосный универсальный» [9].

**Цель работы:** сравнительный анализ расчета балки двутаврового сечения по СНиП II-23-81\* [6] и Еврокод 3 [1], [3].

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) произведен сравнительный анализ методик расчета балок по СНиП II-23-81\* [6] и Еврокод 3 [1], [3];

- 2) по полученным результатам выделены и проанализированы наиболее рациональные сечения;
- 3) определены оптимальные значения металлоемкостей балок в зависимости от высоты, толщины стенки и шага поперечных элементов жесткости по СНиП II-23-81\* [6] и произведен сравнительный анализ по металлоемкости.

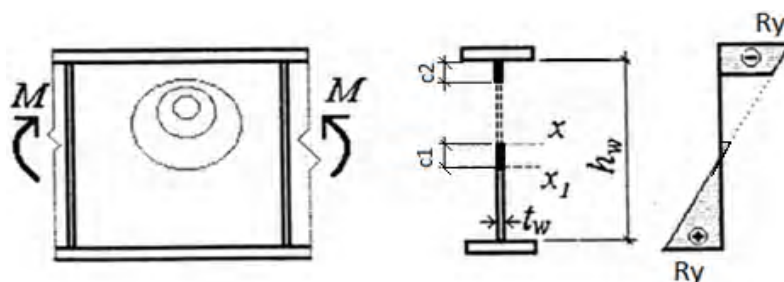
### Основная часть

*Сравнительный анализ методик расчета балок по Еврокод 3 [1], [3] и СНиП II-23-81\* [6]*

Расчет балок перекрытия двутаврового сечения с гибкой стенкой по методике СНиП II-23-81\* [6] производится по разделу 18 данного руководства. Для расчета балки 4-го класса сечения используется Еврокод 3: Стальные конструкции. Часть 1.1: Общие правила для зданий (EN 1993-1-1) [1] и Еврокод 3: Стальные конструкции. Часть 1.5: Пластинчатые элементы конструкций (EN 1993-1-5) [3]. Сравнительный анализ методик расчета балки представлен в таблице 1. Нагрузки на каркас здания собирались по ДБН В.1.2-2:2006 «Нагрузки и воздействия» [4].

Сравнив обе методики можно отметить, что они являются по многим критериям идентичными, несмотря на разный подход к некоторым расчетным положениям. Отметим их некоторые особенности:

- 1) Еврокод 3 [3] предполагает упругую работу отсека балки в условиях, близких к условиям чистого изгиба. Выпученная часть сжатой стенки выключается из работы (рис. 1), оставляя незначительные ее части около нейтральной оси и сжатой части полки. Такой подход требует определения  $A_{eff}$ ,  $W_{eff,min}$ ,  $I_{eff}$



**Рисунок 1.** Эпюры нормальных напряжений при чистом изгибе по Еврокод 3:  $c_1$  и  $c_2$  – размеры включенных частей стенок, определяемые по табл. 4.1 [3];  $h_w$  – высота стенки;  $t_w$  – толщина стенки;  $R_y$  – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести, равное 275 МПа.

Таблица 1. Сравнительный анализ методик расчета балок

№ п/п	Еврокод 3		СНиП II-23-81*	
	Этап	п.п.	Этап	п.п.
1	2	3	4	5
1	Определить конструктивные особенности балки (условия опирания, места раскрепления сжатого пояса)		Определить конструктивные особенности балки (условия опирания, места раскрепления сжатого пояса)	
2	Для предельного состояния по несущей способности определить максимальную расчетную перерезывающую силу $V_{ed}$ , момент $M_{ed}$ и осевое усилие $N_{ed}$ , действующее на ригель с учетом соответствующих внешних нагрузок		Для предельного состояния по несущей способности определить максимальную расчетную перерезывающую силу $Q$ , момент $M$ и осевое усилие $N$ , действующее на ригель с учетом соответствующих внешних нагрузок	
3	Принять класс стали и предварительные размеры сечения		Принять класс стали и предварительные размеры сечения	
4	Определить класс сечения при изгибе (4-й класс)	п. 5.5.2. таблица 5.2	Определить условную гибкость стенки $\bar{\lambda}_w$ . $6 \leq \bar{\lambda}_w \leq 13$ $\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$	п. 18.2*
5	Определить геометрические характеристики эффективного сечения 4-го класса с учетом потери местной устойчивости стенки ( $A_{eff}$ , $W_{eff,min}$ , $I_{eff}$ )	п. 3.2 п. 4.3	Определение ширины пояса по общепринятому соотношению $\left( \frac{1}{4} \dots \frac{1}{5} \right) h,$ $h$ – общая высота балки	
6	Определить несущую способность сечения на изгиб: $M_{ed} \leq M_{c,Rd}$	п. 6.2.5	Определение толщины пояса из условия прочности $t_f \approx \frac{M}{hb_f R_{yf} \gamma_c}$	
7	Определить несущую способность сечения от воздействия осевого усилия: $N_{ed} \leq N_{c,Rd}$	п. 6.2.3 п. 6.2.4	Соблюдение условия обеспечения местной устойчивости полки. Отношение ширины свеса сжатой полки к ее толщине не более $0,38 \sqrt{E / R_y}$	п. 18.6
8	Определить несущую способность сечения на срез: $V_{c,Rd}; V_{Ed} \leq V_{c,Rd}$	п. 6.2.6	Определение предельного изгибающего момента в рассматриваемом отсеке балки $M_u$	п. 18.2*
9	Проверка потери местной устойчивости стенки от среза	п. 6.2.6(6) п. 5.1(2)	Определение критических напряжений в рассматриваемом отсеке балки $\tau_{cr}$	п. 18.2*
10	При потере местной устойчивости предусматриваются поперечные ребра жесткости. Проверка устойчивости стенки отсека $V_{Ed} \leq V_{b,Rd}$	п. 5.1 – п. 5.5	Определение предельной поперечной силы в рассматриваемом отсеке балки $Q_u$	п. 18.2*

## окончание таблицы 1.

1	2	3	4	5
11	Если $V_{Ed} \geq 0,5V_{b,Rd}$ , определить уменьшенную несущую способность сечения на изгиб и осевую силу с учетом среза и проверить условия $M_{ed} \leq M_{c,Rd}^*$ и $N_{ed} \leq N_{c,Rd}^*$	п. 6.2.10	Проверка прочности балки в рассматриваемом отсеке $\left(\frac{M}{M_u}\right)^4 + \left(\frac{Q}{Q_u}\right)^4 \leq 1$	п. 18.2*
12	Проверить влияние пояса на потерю устойчивости стенки $\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{R_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{eff,f}}}$	п. 8(1)	Повторить расчет по пунктам 8–11 для других отсеков балки	
13	Проверка устойчивости в рассматриваемом отсеке при плоской форме потери устойчивости	п. 4.6(1)	Проверка общей устойчивости балки	п. 18.5 п. 5.16*(а)
14	Если $M_{ed} > M_{f,Rd}$ и $V_{Ed} / V_{b,Rd} > 0,5$ , следует выполнить проверку на потерю устойчивости от совместного действия момента и перерезывающего усилия в отсеке	п. 7.1	Определить максимальные вертикальные перемещения $[f / l]$	п. 18.8*
15	Проверить необходимость проверки плоской формы изгиба. Проверка не требуется, если сжатый пояс полностью раскреплен. В данном случае на балки перекрытия опирается профилированный настил в качестве несъемной опалубки для монолитной ж/б плиты	п. 6.3.2.4(1) п. 10.1.1 [2] или приложение ВВ 2.1 и ВВ 2.2 [1];	Проверить, удовлетворяют ли вертикальные перемещения необходимым требованиям $[f / l] \leq \frac{1}{450}$	
16	Проверка устойчивости плоской формы изгиба элементов с дискретным боковым раскреплением сжатых полок	п. 6.3.2.4(1)	На основании обеспечения местной устойчивости отсеков балки проектируются поперечные элементы жесткости	п. 7.10 п. 18.3 п. 18.4
17	Повторить расчет по пунктам 10–14 для других участков между раскреплениями		Проверка устойчивости поперечных элементов жесткости	п. 18.3
18	На основании статического расчета определить максимальные вертикальные перемещения $[f / l]$			
19	Проверить, удовлетворяют ли вертикальные перемещения необходимым требованиям $[f / l] \leq \frac{1}{450}$			
20	На основании обеспечения местной устойчивости отсеков балки проектируются поперечные элементы жесткости	п. 9.1 – п. 9.3.5		
21	Проверка устойчивости поперечных элементов жесткости	п. 9.3.5		

Примечание:

$A_{eff}$ ,  $W_{eff,min}$ ,  $I_{eff}$  – эффективная площадь, момент сопротивления и момент инерции сечения, полученные с учетом исключенной сжатой части стенки;

$M_{c,Rd}$  – расчетное значение несущей способности на изгиб для сечений 4-го класса, равное  $M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} \cdot R_y}{\gamma_{m0}}$ ;

$R_y$  – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести, равное 275 МПа;

$\gamma_{m0}$  – частный коэффициент безопасности, равный  $\gamma_{m0} = 1$ ;

$N_{c,Rd}$  – расчетное значение несущей способности сечения при равномерном сжатии для сечений 4-го класса,

$$\text{равное } N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot R_y}{\gamma_{m0}};$$

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

$$\frac{\tau_{ed}}{R_y / (\sqrt{3}\gamma_{m0})} \leq 1; \quad \tau_{ed} = \frac{V_{ed} S}{I t};$$

$S$  – статический момент сдвигаемой части сечения относительно центральной оси;

$I$  – момент инерции поперечного сечения;

$t$  – толщина сечения в рассматриваемой точке;

$V_{b,Rd}$  – расчетное значение несущей способности стенки на срез с учетом поперечных элементов жесткости;

$M_{c,Rd}^*$  и  $N_{Rd}^*$  – уменьшенная несущая способности сечения на изгиб с учетом среза;

$A_w$  – площадь стенки;

$A_{eff,f}$  – эффективная площадь сжатой части полки;

$M_{f,Rd}$  – расчетное значение несущей способности поперечного сечения поясов по изгибающему моменту при учете только эффективных площадей поясов;

$h_w$  – высота стенки;

$t_w$  – толщина стенки;

$t_f$  – толщина полки;

$$M_u = R_y \gamma_c t_w h_w^2 \left[ \frac{A_f}{t_w h_w} + \frac{0,85}{\bar{\lambda}_w} \left( 1 - \frac{1}{\bar{\lambda}_w} \right) \right];$$

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы балки, равный  $\gamma_c = 1,1$ ;

$$Q_u = R_y \gamma_c t_w h_w \left[ \frac{\tau_{cr}}{R_s} + 3,3 \left( 1 - \frac{\tau_{cr}}{R_s} \right) \frac{\beta \mu}{1 + \mu^2} \right];$$

$R_s$  – расчетное сопротивление стали срезу;

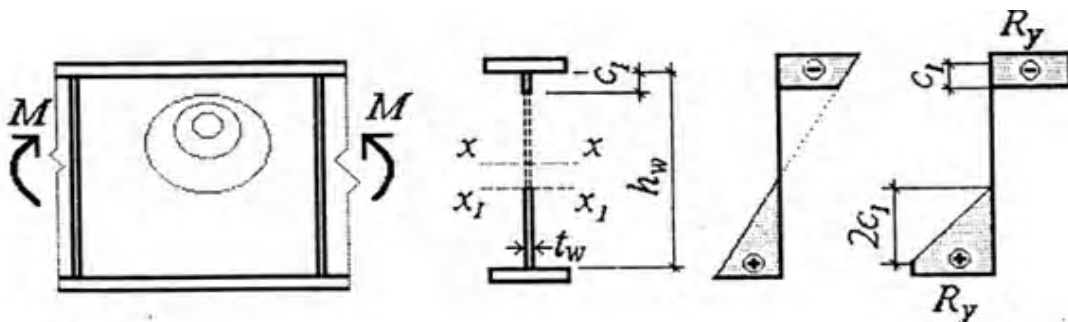
$\tau_{cr}$  – критические касательные напряжения в отсеке, равные  $\tau_{cr} = 10,3 \left( 1 + \frac{0,76}{\mu^2} \right) \frac{R_s}{\bar{\lambda}_{ef}}; \quad \bar{\lambda}_{ef} = \frac{d}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ .

для определения несущей способности сечения от действия изгибающего момента.

- 2) СНиП II-23-81\* [6] придерживается упруго-пластической работы отсека балки (рис. 2). При этом эффективно включается в работу только часть стенки, примыкающая к поясу. По эпюрам нормальных напряжений с уче-

том размеров поперечного сечения определяется предельный изгибающий момент  $M_u$ .

- 3) Еврокод 3 [1], [3] при определении несущей способности балки отталкивается от значения несущей способности стенки на срез  $V_{b,Rd}$ . Это значит, что при приближении расчетного значения поперечной силы к предельной



**Рисунок 2.** Эпюры нормальных напряжений при чистом изгибе по СНиП II-23-81\*:  $c_1$  – размер включенной части стенки, равный  $0,85 t_w \sqrt{E / R_y}$  [6].

несущей способности стенки на срез значения предельного изгибающего момента и осевой продольной силы уменьшаются согласно п. 6.2.10 [1]. СНиП II-23-81\* [6] использует общую формулу  $(M/M_u)^4 + (Q/Q_u)^4 \leq 1$  для проверки сечения. Из этого следует, что Еврокод 3 [1], [3] подходит с другой стороны для определения несущей способности балки, где определение значений изгибающего момента и осевой силы зависит от несущей способности стенки на срез.

### Сравнение полученных сечений

Сравнительный анализ проведен совместно с [14], где были проведены численные исследования методики расчета по Еврокод 3 [1], [3], из которых было извлечено наиболее оптимальное сечение балки. К сравнению было представлено сечение, полученное по методике [6], как наиболее рациональное.

Оптимальная высота балки принята 1 422 мм, высота стенки 1 390 мм, толщина стенки 6 мм, ширина полки 300 мм и толщина полки 18 мм [6]. Шаг поперечных элементов жесткости: в приопорных отсеках – 500 мм; в остальной части балки – 1 250 мм. По результатам расчета по Еврокод 3 [1], [3] балка двутаврового сечения отличается только размером ширины полки равной 320 мм. Сечение балки представлено на рис. 3. Исходя из этого следует, что расход металла на балку по Еврокод 3 увеличивается на 2 %.

Сравнение полученных сечений говорит о том, что две разные по своему подходу методики предполагают практически идентичные показатели как в плане шага ребер жесткости, так и самого сечения, однако громоздкость и сложность методики Еврокод 3 делает ее менее востребованной и привлекательной из-за больших затрат времени для проектирования.

### Определение оптимальной металлоемкости балок

В работе рассматривались балки двутаврового сечения с условной гибкостью от 6,23 до 12,12 [6]. Рассмотренные поперечные сечения (таблица 2), не удовлетворяющие граничным услови-

ям условной гибкости согласно [6], не принимали участия в исследовании.

Согласно руководству по проектированию стальных тонкостенных балок ЦПНИИСК им. Мельникова [13], рассматриваемые балки можно отнести к тонкостенным только в том случае, если гибкость стенки находится в диапазоне 250...600 и потеря местной устойчивости наступает раньше наступления общего предельного состояния. Некоторые из сечений не удовлетворяют требованиям гибкости стенки согласно [13]. Однако соблюдается критерий устойчивости, что частично удовлетворяет условию тонкостенности [13]. Следовательно, есть необходимость рассмотреть все поперечные сечения в выбранном диапазоне.

Каждое полученное значение металлоемкости (рис. 4 и таблица 3), предопределяет сечение балки, в которой неизменным остается толщина и высота стенки. Габариты полки могут незначительно меняться в зависимости от имеющегося сортамента [9], что приведет к небольшим изменениям металлоемкости, но при обязательном соблюдении условия местной устойчивости (п. 18.6 [6]) и минимальной требуемой площади сжатой полки для обеспечения необходимой несущей способности сечения. Это дает некоторую свободу при конструировании балок без ущерба их надежности и возможность подстроиться под технологические возможности завода-изготовителя.

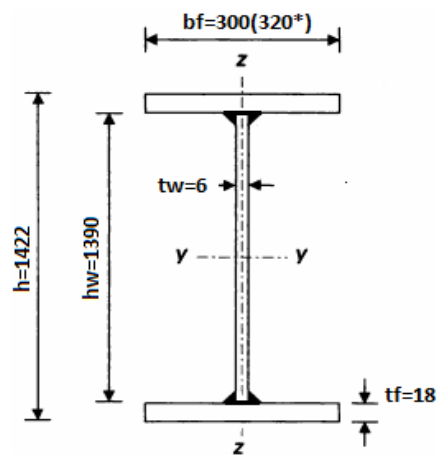


Рисунок 3. Поперечное сечение балки: \* сечение получено по Еврокод 3.

Таблица 2. Рассматриваемые стенки в балках

СНиП II-23-81*				Еврокод 3		
Высота, мм	Толщина, мм	Гибкость	Условная гибкость	Гибкость	$\sqrt{\frac{235}{R_y}}$	Приведенная гибкость
1 090	5	218	7,82	218	0,92	201
1 240	5	248	8,89	248		228
1 390	5	278	9,97	278		256
1 410	5	282	10,11	282		259
1 490	5	298	10,69	298		274
1 590	5	318	11,41	318		293
1 690	5	338	12,12	338		311
1 090	6	182	6,52	182		167
1 240	6	207	7,41	207		190
1 390	6	232	8,31	232		213
1 410	6	235	8,43	235		216
1 490	6	248	8,91	248		228
1 590	6	265	9,50	265		244
1 690	6	282	10,10	282		259
1 090*	7*	156	не удовл.	156		146
1 240	7	177	6,35	177		163
1 390	7	199	7,12	199		183
1 410	7	201	7,22	201		185
1 490	7	213	7,63	213		196
1 590	7	227	8,15	227		209
1 690	7	241	8,66	241		222
1 090*	8*	136	не удовл.	136		125
1 240*	8*	155	не удовл.	155		143
1 390	8	174	6,23	174		160
1 410	8	176	6,32	176		162
1 490	8	186	6,68	186		172
1 590	8	199	7,13	199		183
1 690	8	211	7,58	211		194

Примечание: \* высота и толщина стенки, при которых не соблюдаются граничные условия по СНиП II-23-81\*.

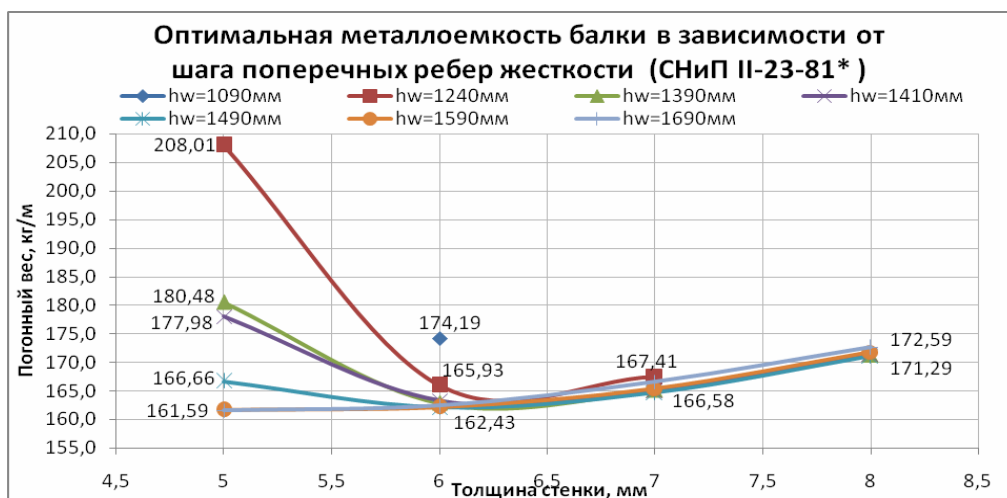


Рисунок 4. Оптимальная металлоемкость балок по СНиП II-23-81\*.



Таблица 3. Оптимальная металлоемкость балок по СНиП II-23-81\*

Толщина стенки, мм	Высота стенки, мм	Гибкость стенки	Погонный вес балки (без ребер жесткости), кг/м	Погонный вес балки (с ребрами жесткости), кг/м	Шаг ребер в крайних отсеках / остальной части балки, мм
5	1 090	218	–	–	–
	1 240	248	199,4	208,01	500/1 250
	1 390	278	168,5	180,48	500/1 250
	1 410	282	165,9	177,98	500/1 250
	1 490	298	153,9	166,66	500/1 250
	1 590	318	147,2	161,61	500/1 250
	1 690	338	145,5	161,59	500/1 250
6	1 090	182	167,0	174,19	500/1 250
	1 240	207	157,3	165,93	500/1 250
	1 390	232	150,9	162,82	500/1 250
	1 410	235	151,2	163,30	500/1 250
	1 490	248	149,3	162,11	500/1 250
	1 590	265	147,7	162,17	500/1 250
	1 690	282	147,6	162,43	625/1 250
7	1 090	156	–	–	–
	1 240	177	161,4	167,41	500/2 500
	1 390	199	156,8	165,08	500/2 500
	1 410	201	157,5	165,05	625/2 500
	1 490	213	156,8	164,67	625/2 500
	1 590	227	156,5	165,36	625/2 500
	1 690	241	156,6	166,58	625/2 500
8	1 090	136	–	–	–
	1 240	155	–	–	–
	1 390	174	163,9	171,29	625/2 500
	1 410	176	163,9	171,41	625/2 500
	1 490	186	165,2	171,05	1250/2 500
	1 590	199	165,2	171,80	1250/2 500
	1 690	211	165,2	172,59	1250/2 500

Примечание:

Стенки с высотой  $h_w = 1\ 090$  мм и толщиной  $t_w = 5$  мм – не удовлетворяют условию прочности по п. 18.2\* [6].  
Стенки с высотой  $h_w = 1\ 090$  мм и толщиной  $t_w = 7$  мм – не удовлетворяют требованиям условной гибкости стенки  $6 \leq \bar{\lambda}_w \leq 13$  п. 18.2\* [6].

Стенки с высотой  $h_w = 1\ 090$  и  $1\ 240$  мм и толщиной  $t_w = 8$  мм – не удовлетворяют требованиям условной гибкости стенки  $6 \leq \bar{\lambda}_w \leq 13$  п. 18.2\* [6].

## Выводы

Проведя сравнение методик и полученных сечений балок по СНиП II-23-81\* [6] и Еврокод 3 [1], необходимо отметить следующее:

1. Отечественные нормы более требовательны к несущей способности стенки на срез.
2. Упругопластическая работа сжатой полки совместно с частью стенки по [6] увеличивает несущую способность сечения от действия изгибающего момента в отличие упругой работы сечения в Еврокод 3. Однако, в свою очередь, отечественные нормы предоставляют более стесненные условия для классификации сечений балок с «закритической» стадией работы стенки. В то время как в Еврокод 3 этот диапазон более обширен.
3. СНиП II-23-81\* [6] исключает большую площадь сжатой стенки по сравнению с Еврокод 3 [1].
4. Шаг поперечных элементов жесткости, как один из основных факторов, влияющих на металлоемкость балок, в равной степени

влияет на полученные значения по двум разным методикам.

5. Методика расчета по СНиП II-23-81\* [6] учитывает только влияние изгибающего момента и поперечной силы в отсеке. Методика по Еврокод 3 [1], [3] предполагает учет совместного действия перерезывающего усилия, изгибающего момента и осевой сжимающей силы.

## Литература

1. Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1–1: Общие правила и правила для зданий [Текст] : EN 1993-1-1:2005, IDT. – Введен впервые взамен ENV 1993-1-1:1992 ; введ. 2010–01–01. – Минск : Минстройархитектуры, 2009. – 85 с.
2. Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1–3: Общие правила. Дополнительные правила для холоднодеформированных элементов и профилированных листов [Текст] : EN 1993-1-3:2006, IDT. – Введен впервые взамен ENV 1993-1-3:2006 ; введ. 2010–01–01. – Минск : Минстройархитектуры, 2010. – 116 с.
3. Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1–5: Пластинчатые элементы конструкций [Текст] : EN 1993-1-5:2006, IDT. – Введен впервые взамен ENV 1993-1-5:1997 ; введ. 2010–01–01. – Минск : Минстройархитектуры, 2010. – 52 с.
4. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст]. – Замість СНиП 2.01.0785 ; надано чинності 2007–01–01. – К. : Мінбуд України, 2006. – 78 с.
5. Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1–2: Общие правила определения огнестойкости [Текст] : EN 1993-1-2: 2005, IDT. – Введен впервые ; введ. 2010–01–01. – Минск : Минстройархитектуры, 2010. – 71 с.
6. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции [Текст]. – Взамен СНиП II-В.3-72; СНиП II-И.9-62; СН 376-67 ; введ. 1983–01–01. – М. : ФГУП ЦПП, 2005. – 90 с.
7. ГОСТ 24045-94. Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для строительства. Технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ 24045-86 ; введ. 1995–06–01. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 16 с.
8. ГОСТ 19903-74. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент [Текст]. – Взамен ГОСТ 8597-57 в части листов шириной 500 мм и более, ГОСТ 3680-57 и ГОСТ 8075-56 в части горячекатаных листов, ГОСТ 5681-57 ; введ. 1976–01–01. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2000. – 18 с.

6. Сравнение оптимальных сечений по Еврокод 3 и СНиП II-23-81\* [6] показало, что расход металла по [1] выше на 2 %.

Каждая из методик имеет свои ключевые факторы, определяющие металлоемкость сечения балки. Однако полученные показатели металлоемкости всех рассмотренных балок по [1] и [6] не отличаются более чем на 7 %.

## References

1. EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2009. 85 p. (in Russian)
2. EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3: Design steel structures – Part 1–3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2010. 116 p. (in Russian)
3. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1–5. Plated structural elements. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2010. 52 p. (in Russian)
4. DBN V.1.2-2:2006. System reliability and safety of construction projects. Pressures and impacts. Design standards. Kyiv: Ukraine Ministry of Construction, 2006. 78 p. (in Ukrainian)
5. EN 1993-1-2: 2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1–2: General rules. Structural fire design. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2010. 71 p. (in Russian)
6. SNiP II-23-81\*. Steel structures. Moscow: FGUP TsPP, 2005. 90 p. (in Russian)
7. GOST 24045-94. Steel sheet cold-formed sections with trapezoidal corrugations for building. Specifications. Moscow: IPK Publishing standards, 2002. 16 p. (in Russian)
8. GOST 19903-74. Hot-rolled steel sheets. Dimensions. Moscow: IPK Publishing standards, 2000. 18 p. (in Russian)
9. GOST 82-70. Universal hot-rolled steel strips. Dimensions. Moscow: Publishing standards, 1988. 8 p. (in Russian)
10. GOST 26020-83. Hot-rolled steel I-beam with parallel flange edges. Dimensions. Moscow: IPK Publishing standards, 1998. 9 p. (in Russian)
11. Semenov, A. A. Metal designs. Calculation of elements and connections using the personal computer SCAD Office. Moscow: ASV, 2012. 338 p. (in Russian)
12. DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Design code. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2014. 199 p. (in Ukrainian)

9. ГОСТ 82-70\*. Прокат стальной горячекатаный широкополосный универсальный. Сортамент [Текст]. – Взамен ГОСТ 82-57 ; введ. 1972–01–01. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 8 с.
10. ГОСТ 26020-83. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок [Текст]. – Взамен ГОСТ 82-57 ; введ. 1986–01–01. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1998. – 9 с.
11. Семенов, А. А. Металлические конструкции. Расчет элементов и соединений с использованием ПК SCAD Office [Текст] / А. А. Семенов. – М. : АСВ, 2012. – 338 с.
12. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування [Текст]. – На заміну ДБН В.2.6-163:2010 у частині розділу 1 та ДСТУ Б В.2.6-194:2013 ; чинні від 2015–01–01. – К. : Мінрегіон України, 2014. – 199 с.
13. Мельников, Н. П. Руководство по проектированию стальных тонкостенных балок [Текст] / Н. П. Мельников. – М. : Стройиздат, 1977. – 28 с.
14. Алехин, А. М. Численные исследования двутавровой балки перекрытия 4-го класса сечения по Еврокод 3 [Текст] / А. М. Алехин, А. Н. Бурдель // Металлические конструкции. 2017. Том 23, № 1. С. 25–38.
15. Joints in Steel Constructions – Moment Connections [Текст]. – Publication Number 207/95. – Ascot : Steel Construction Institute, 1995. – 233 p. – ISBN 1-85942-018-4.
16. Joints in Steel Constructions – Simple Connections [Текст]. – Publication Number P212. – Ascot : Steel Construction Institute, 2005. – 490 p. – ISBN 1-85942-072-9.
17. Gardner, L. Stability of Steel Beams and Columns [Текст] / L. Gardner. – Publication Number SCI P360. – Ascot : Steel Construction Institute, 2011. – 94 p. – ISBN 978-1-85942-199-4.
18. Baddoo, N. R. Structural Design of Stainless steel [Текст] / N. R. Baddoo, B. A. Burgan. – Ascot : Steel Construction institute, 2001. – 320 p. – ISBN 1-85942-116-4.
19. European Recommendations for Steel Construction [Текст] / European Convention for Constructional Steelwork. – Brussels : ECCS General Secretariat, 1978. – 355 p.
20. Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures [Текст] / edited by T. V. Galambos. – 5th ed. – New York : Wiley, 1998. – 911 p.
21. Nethercot, D. A. Design of diaphragm braced I-beams [Текст] / D. A. Nethercot, N. S. Trahair // Journal of Structural Engineering of the ASCE. 1975. Vol. 101. P. 2045–2061.
22. The Behavior and Design of Steel Structures to EC3 [Текст] / N. S. Trahair, M. A. Bradford, D. A. Nethercot and L. Gardner. – 4th ed. – London ; New York : Taylor & Francis, 2008. – 491 p.
13. Melnikov, N. P. Guide to steel thin-walled beams design. Moscow: Stroiizdat, 1977. 28 p. (in Russian)
14. Alyokhin, Andrey; Burdel, Anton. Numerical Studies of the I-Beam Floor Beam 4 Classes of Section According to Eurocode 3. In: *Metal Constructions*, 2017, Volume 23, Number 1, pp. 25–38. (in Russian)
15. Joints in Steel Constructions – Moment Connections. Publication Number 207/95. Ascot: Steel Construction Institute, 1995. 233 p. ISBN 1-85942-018-4.
16. Joints in Steel Constructions – Simple Connections. Publication Number P212. Ascot: Steel Construction Institute, 2005. 490 p. ISBN 1-85942-072-9.
17. Gardner, L. Stability of Steel Beams and Columns. Publication Number SCI P360. Ascot: Steel Construction Institute, 2011. 94 p. ISBN 978-1-85942-199-4.
18. Baddoo, N. R.; Burgan, B. A. Structural Design of Stainless steel. Ascot: Steel Construction institute, 2001. 320 p. ISBN 1-85942-116-4.
19. European Convention for Constructional Steelwork. European Recommendations for Steel Construction. Brussels: ECCS General Secretariat, 1978. 355 p.
20. Galambos, T. V. (Ed.) Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures. 5th ed. New York: Wiley, 1998. 911 p.
21. Nethercot, D. A.; Trahair, N. S. Design of diaphragm braced I-beams. In: *Journal of Structural Engineering of the ASCE*, 1975, Vol. 101, pp. 2045–2061.
22. Trahair, N. S.; Bradford, M. A.; Nethercot, D. A.; Gardner, L. The Behavior and Design of Steel Structures to EC3. 4th ed. London; New York: Taylor & Francis, 2008. 491 p.

**Алёхин Андрей Михайлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: изучение действительной работы опор воздушных линий электропередачи (ВЛ) и антенных опор радиорелейной связи. Статические и динамические испытания металлических, железобетонных и деревянных сооружений и всех видов строительных конструкций зданий и сооружений.

**Бурдель Антон Николаевич** – магистрант кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: численные исследования балок 4-го класса сечения по Еврокод 3. Сравнительный анализ критериев и полученных показателей металлоемкости, которые представляет Еврокод 3 и отечественные нормы для балок со стенкой, работающей в «закритической» стадии.

**Альо́хін Андрій Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій і споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: вивчення дійсної роботи опор повітряних ліній електропередавання (ПЛ) та антенних опор радіорелейного зв'язку. Статичні та динамічні випробування металевих, залізобетонних та дерев'яних споруд і усіх видів будівельних конструкцій будівель та споруд.

**Бурдель Антон Миколайович** – магістрант кафедри металевих конструкцій і споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: чисельні дослідження балок 4-го класу перетину за Єврокод 3. Порівняльний аналіз критеріїв і отриманих показників металлоємності, які надає Єврокод 3 і вітчизняні норми для балок зі стінкою, працюючою в «закритичній» стадії.

**Alyokhin Andrey** – Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: studying of the valid work of overhead power lines supports (OHPL) and microwave transmission antenna towers. Static and dynamic testing of metal, concrete and timber structures and all kinds of constructions and structures.

**Burdel Anton** – Master's student; Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: numerical studies of beams of the 4th class of section according to Eurocode 3. Comparative analysis of the criteria and the obtained indicators of metal consumption, which are represented by Eurocode 3 and domestic standards for beams with a wall operating in the «overcritical» stage.