

Опыт применения Еврокодов при проектировании стальных конструкций в Республике Беларусь

Андрей Брониславович Шурин¹, Виталий Валерьевич Надольский^{1,2}

¹ Брестский государственный технический университет (БрГТУ); г. Брест, Республика Беларусь;

² Белорусский национальный технический университет (БНТУ); г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Республика Беларусь — одна из первых стран на территории СНГ, которая ввела в действие на своей территории европейские нормы проектирования (Еврокоды), сохранив при этом действие строительных норм, разработанных на основе советских СНиПов. В республике накоплен значительный опыт применения и сравнительного анализа этих двух систем нормирования. Актуальность исследования заключается в обнаружении наиболее отличительных особенностей нормативных документов, на основании которых можно определить дальнейшие направления научных исследований и совершенствования отечественных норм.

Материалы и методы. Применены сравнительный анализ и сравнение требований Еврокодов и отечественных нормативных документов (СП 16.13330) в области проектирования стальных конструкций. Результаты сравнительного анализа систематизированы и схематизированы в табличном виде. Анализ подкреплен обобщением практического опыта применения в практике проектирования и строительства стальных конструкций, запроектированных согласно требованиям Еврокодов на территории Республики Беларусь. Сопоставлены параметры конструкционной надежности, в том числе выполнен критический анализ значений частных коэффициентов, классификации сечений, особенности конструирования и расчета сварных и болтовых соединений, бесфасоночных узлов из прямоугольных труб.

Результаты. Представлены результаты обобщения опыта применения и сравнительного анализа Еврокода по отношению к СП применительно к проектированию стальных конструкций. Приведен анализ учета частных коэффициентов и классификации поперечных сечений, сравнение конструирования сварных и болтовых соединений, бесфасоночных узлов из прямоугольных труб.

Выводы. Методологические подходы к проверкам предельных состояний и обеспечению надежности стальных конструкций в СП и Еврокодах носят очень близкий характер, однако существуют различия в значениях и наборах частных коэффициентов. При проектировании стальных конструкций по Еврокоду из сталей по ГОСТ 27772 методы классификации поперечных сечений прокатных профилей, выпускаемых по ГОСТ или ТУ, нуждаются в корректировке. Еврокод 3 предоставляет больше возможностей при проектировании сварных и болтовых соединений по конструированию бесфасоночных узлов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нормы проектирования, Еврокод, коэффициенты надежности, устойчивость, предел текучести, узлы и соединения, болтовые соединения, сварные соединения, бесфасоночные узлы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шурин А.Б., Надольский В.В. Опыт применения Еврокодов при проектировании стальных конструкций в Республике Беларусь // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 740–751. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.740-751

Автор, ответственный за переписку: Андрей Брониславович Шурин, shuryn@mail.ru.

Experience of implementation of Eurocodes in the design of steel structures in the Republic of Belarus

Andrei B. Shuryn¹, Vitali V. Nadolski^{1,2}

¹ Brest State Technical University (BrSTU); Brest, Republic of Belarus;

² Belarusian National Technical University (BNTU); Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. The Republic of Belarus is one of the first countries on the territory of the CIS, which introduced European design standards (Eurocodes) on its territory, while preserving the effect of building standards developed on the basis of Soviet SNIP. The republic accumulated considerable experience in the practical application and comparative analysis of these two systems of standards. The relevance of this study is contained in the discovery of the most distinctive features of normative documents, on the basis of which it is possible to determine further directions of scientific research and improvement of domestic norms.

Materials and methods. Analysis and generalization of experience.

Results. The paper presents the results of generalization of the experience of practical application and comparative analysis of Eurocode and CP in relation to the design of steel structures. The analysis of partial factors, classification of cross sections, welded and bolted joints is given.

Conclusions. Methodological approaches to checking limit states and ensuring the reliability of steel structures in CP and Eurocodes are very similar, but there are differences in the values and sets of partial factors. When designing steel structures according to Eurocode, the methods of classification of cross-sections of rolled profiles produced according to GOST or TS need to be adjusted. Eurocode 3 provides more possibilities in the design of welded and bolted joints.

KEYWORDS: design standards, Eurocode, reliability factors, stability, yield strength, connections and joints, bolted joints, welded joints, fascia-free joints

FOR CITATION: Shuryin A.B., Nadolski V.V. Experience of implementation of Eurocodes in the design of steel structures in the Republic of Belarus. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):740-751. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.740-751 (rus.).

Corresponding author: Andrei B. Shuryin, shuryin@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Республика Беларусь — одна из первых стран на территории СНГ, которая ввела в действие на своей территории европейские нормы проектирования (Еврокоды), сохранив при этом действие строительных норм, разработанных на основе советских СНиПов. Первый этап внедрения был начат в 01.01.2010 г., далее шел пятилетний период альтернативного использования Еврокодов и отечественных документов, потом были попытки перехода полностью на европейскую систему нормативных документов, но опыт применения в практике проектирования и строительства привел к пониманию необходимости создания национальных норм, которые в большей степени гармонизированы с Еврокодами, но при этом позволяют учитывать территориальные и национальные особенности. За последнее десятилетие накоплен значительный опыт использования и сравнительного анализ этих двух систем нормирования.

Цель исследования — обобщение опыта применения и систематизация сравнительного анализа Еврокодов по отношению к СП 16.13330¹ применительно к проектированию стальных конструкций. Актуальность данного исследования заключается в обнаружении наиболее отличительных особенностей нормативных документов, на основании которых можно определить дальнейшие направления научных исследований и совершенствования норм.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании применен сравнительный анализ и сравнение требований европейских стандартов (Еврокодов) и отечественных нормативных документов (СП 16.13330) в области проектирования стальных конструкций.

Еврокоды (Eurocode) — комплект гармонизированных стандартов для расчета несущих строительных конструкций, разработанных техническим комитетом CEN/TC 250 и устанавливающих единые подходы к проектированию несущих строительных конструкций. На сегодняшний день комплект Еврокодов включает десять стандартов (EN 1990–1999), каждый из которых в свою очередь делится на части. Всего разработано 58 частей. Все Еврокоды базируются на едином стандарте надежности — EN 1990.

¹ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81*. 2017. 140 с.

В то же время в основе документов, базирующихся на основе советских СНиПов, лежит ГОСТ 27751.

Результаты сравнительного анализа систематизированы и схематизированы в табличном виде. Анализ подкреплен обобщением практического опыта применения в практике проектирования и строительства стальных конструкций, запроектированных согласно требованиям Еврокодов на территории Республики Беларусь. Сопоставлены параметры конструкционной надежности, в том числе выполнен критический анализ значений частных коэффициентов, классификации сечений, особенности конструирования и расчета сварных и болтовых соединений, бесфасоночных узлов из прямоугольных труб.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Коэффициенты надежности. В системе нормативных документов СП РФ и Еврокодов используется метод предельных состояний [1–3]. Для практического применения обе системы нормативных документов реализуют метод коэффициентов надежности как базовой метод проверки предельных состояний [4–7]. Доминирующей причиной различия в значениях коэффициентов надежности является разный уровень целевой надежности, заложенный при определении и калибровке частных коэффициентов² [8–11]. Общая структура коэффициентов надежности в СП и Еврокодах очень схожа. Одни коэффициенты надежности применяются к нагрузкам и учитывают изменчивость нагрузки и погрешность (упрощения) модели нагрузки, погрешность статического расчета, идеализации расчетной модели и т.д. Другие коэффициенты надежности применяются для несущей способности и учитывают изменчивость предела текучести или другой характеристики свойства материала, упрощения и изменчивость геометрических размеров сечения конструкции, погрешность модели несущей способности и т.д. Можно выделить еще одну группу коэффициентов, направленных на дифференциацию надежности, т.е. на учет разных уровней последствий наступления отказа конструкции.

Как результат вышеотмеченного можно констатировать, что общие подходы к определению значений и структуре коэффициентов надежности

² Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23–81* «Стальные конструкции») ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М.: ЦИТП Госстрой СССР, 1989. 148 с.

совпадают. Однако значения и набор частных коэффициентов существенно отличаются. Рассмотрим далее более подробно эти различия применительно к стальным конструкциям.

Согласно СП 16.13330 обобщенно расчетное значение несущей способности может быть представлено в следующем виде:

$$R_d = \varphi \cdot z \cdot \frac{R_{yn}}{\gamma_m} \cdot \gamma_c, \quad (1)$$

где R_d — расчетное значение несущей способности; φ — коэффициент для учета потери устойчивости, если выполняется проверка устойчивости; z — геометрическая характеристика поперечного сечения элемента (например, площадь для сжатого элемента или момент сопротивления для изгибаемого); R_{yn} — нормативное значение предела текучести; γ_m — коэффициент надежности по материалу; γ_c — коэффициент условий работы.

Коэффициенты надежности по материалу γ_m позволяют перейти от нормативного значения к расчетному и учитывают методы контроля качества металлопроката на металлургических предприятиях.

Коэффициенты условий работы γ_c введены преимущественно для учета погрешностей или упрощений моделей несущей способности [9], к которым можно отнести:

- упрощения при расчетах на общую устойчивость сплошных балок, которые рассчитываются как идеально упругие системы;
- расчет сжатых элементов из одиночных уголков, прикрепляемых одной полкой, как центрально-сжатых стержней, хотя схема их работы соответствует внецентренному сжатию;
- повышенные начальные искривления сжатых составных элементов таврового сечения из уголков, в которых в связи с несимметричным расположением швов при приварке прокладок между уголками начальные искривления превышают учитываемые в базовых расчетных моделях;
- локальное повышение прочностных свойств стали возле отверстий при расчете на прочность сечений, ослабленных отверстиями для болтов и т.д.

В то же время согласно EN 1993-1-1³ расчетное значение несущей способности стального элемента может быть представлено в выражении, очень близком к (1), но в других обозначениях:

$$R_d = \frac{\chi \cdot z \cdot f_y}{\gamma_{Mi}}, \quad (2)$$

где χ — коэффициент для учета потери устойчивости (аналог коэффициента φ в СП 16.13330); f_y — характеристическое значение предела текучести; γ_{Mi} — коэффициент надежности для несущей способности, принимается равным γ_{M0} при про-

верке предельного состояния сечения по прочности или γ_{M1} при проверке предельного состояния по устойчивости.

Нормативное значение R_{yn} согласно СП 16.13330 и характеристическое значение f_y согласно EN 1993-1-1 назначаются на основании статистических данных исходя из 5%-ного квантиля, т.е. в теоретическом плане эти значения должны совпадать. В стандартах есть различия в значениях R_{yn} и f_y , обусловленные преимущественно разной зависимостью от толщины проката. В СП используется более мелкое разделение в зависимости от толщины проката. В соответствии с табл. 3.1 EN 1993-1-1 значения предела текучести разделены для толщин менее и более 40 мм. При этом согласно СП 16.13330 (табл. В.3) для такой широко распространенной стали как С355 значение предела текучести дано для 11 диапазонов толщин, что позволяет более реалистично учесть работу стали.

Коэффициенты надежности γ_{M0} и γ_{M1} учитывают интегрально изменчивость предела текучести и погрешность моделирования несущей способности. Большую критику вызывают значения коэффициентов γ_{M0} и γ_{M1} . То есть в методологическом плане коэффициенты надежности γ_{M0} и γ_{M1} могут быть представлены/выражены через коэффициенты надежности γ_m и γ_c следующим образом:

$$\gamma_{Mi} = \frac{\gamma_m}{\gamma_c}. \quad (3)$$

Таким образом, на первых этапах введения европейских норм в Республике Беларусь и Казахстане коэффициенты надежности были представлены в национальных приложениях, однако дальнейший опыт и анализ показал, что прямое использование выражения (3) с значениями коэффициентов надежности согласно СП не в полной мере корректно. Как было отмечено выше, коэффициент условий работы γ_c связан с моделями сопротивления и поэтому значения этого коэффициента по СП справедливы только для моделей и допущений, принятых в СП.

В базовой редакции EN 1993-1-1 и в большинстве стран Евросоюза коэффициенты γ_{M0} и γ_{M1} приняты равными единице, хотя их значения могут быть установлены в национальных приложениях. Первичный анализ значений этих коэффициентов может привести к следующим выводам:

- все модели несущей способности с позиции коэффициентов надежности в Еврокоде приравнены к одному уровню точности, в системе норм СП РФ, наоборот, введен коэффициент условий работы γ_c , который дифференцирует модели по степени точности (допущений). Анализ публикаций по калибровке частных коэффициентов [12–15] показывает, что были использованы обобщенные модели, т.е. усредненные, и в целом подтверждает этот вывод. Авторам неизвестна точная причина этого усреднения, или это было выполнено преднамеренно в качестве некоторой степени упрощения, или данное допу-

³ EN 1993-1-1:2005. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. 88 с.

шение было сделано из-за недостатка информации о точности моделей несущей способности;

- применяя коэффициенты надежности γ_{M0} и γ_{M1} , равные единице, выходит, что нормативное значение предела текучести равно расчетному, что не согласуется с базовыми положениями метода частных коэффициентов. Однако, анализируя результаты работ^{4,5} [16, 17], можно заметить, что модели несущей способности, принятые в Еврокоде, были подогнаны таким образом, чтобы обеспечивать 5%-ный квантиль. Тогда становится понятно, что значения коэффициентов надежности γ_{M0} и γ_{M1} могут быть даже меньше единицы из-за консерватизма расчетных моделей, и поэтому в этом нет ничего противоречащего теоретическим предпосылкам, хотя данная ситуация и очень непривычна для инженеров и ученых на постсоветском пространстве.

Классификация поперечных сечений. Еврокод 3 устанавливает 4 класса поперечных сечений. Приведенная в EN 1993-1-1 классификация поперечных сечений учитывает ограничения возможности развития пластических деформаций из-за потери местной устойчивости (устойчивость частей сечения) по нормальным напряжениям. Класс сечения в дальнейшем влияет на вид формулы сопротивления [18, 19]. Поперечное сечение классифицируется по наивысшему (менее благоприятному) классу его

сжатых частей (рис. 1). Следует отметить, что классификация сечений не влияет на вид проверки сечения по касательным напряжениям и требует дополнительных проверок с учетом потери местной устойчивости от касательных напряжений.

В соответствии с требованиями СП 16.13330 в зависимости от напряженно-деформированного состояния расчетного сечения подразделяются на три класса. Сравнение классификации на примере для изгибаемых элементов EN 1993-1-1 и СП 16.13330 приведено на рис. 2.

Классификация сечений в Еврокоде и СП построена на единых предпосылках, однако практическое применение осложняется тем, что номера классов в двух документах сделаны противоположными.

Определим класс поперечного сечения центрально-сжатого стержня из горячекатаного уголка L125 × 8 по ГОСТ 8509⁶ из стали С255.

Так как:

$$\frac{h}{t} = \frac{125}{8} = 15,13 > 15\epsilon = 15\sqrt{\frac{235}{f_y}} = 15\sqrt{\frac{235}{255}} = 14,14,$$

то уголок L125 × 8 по ГОСТ 8509 из стали С255 относится к 4 классу поперечного сечения. Следовательно, возможна потеря местной устойчивости полки уголка, расчет уголка по EN 1993-1-1 следует вести по эффективному поперечному сечению.

⁶ ГОСТ 8509–93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент. 1993. 9 с.

⁴ JCSS Probabilistic Model Code, Joint Committee of Structural Safety. 2001.

⁵ CEN TC250 / Ad Hoc Group Reliability of Eurocodes (convenor – Ton Vrouwenvelder) Technical Report for the reliability background of Eurocodes. Draft June 2021. P. 165.

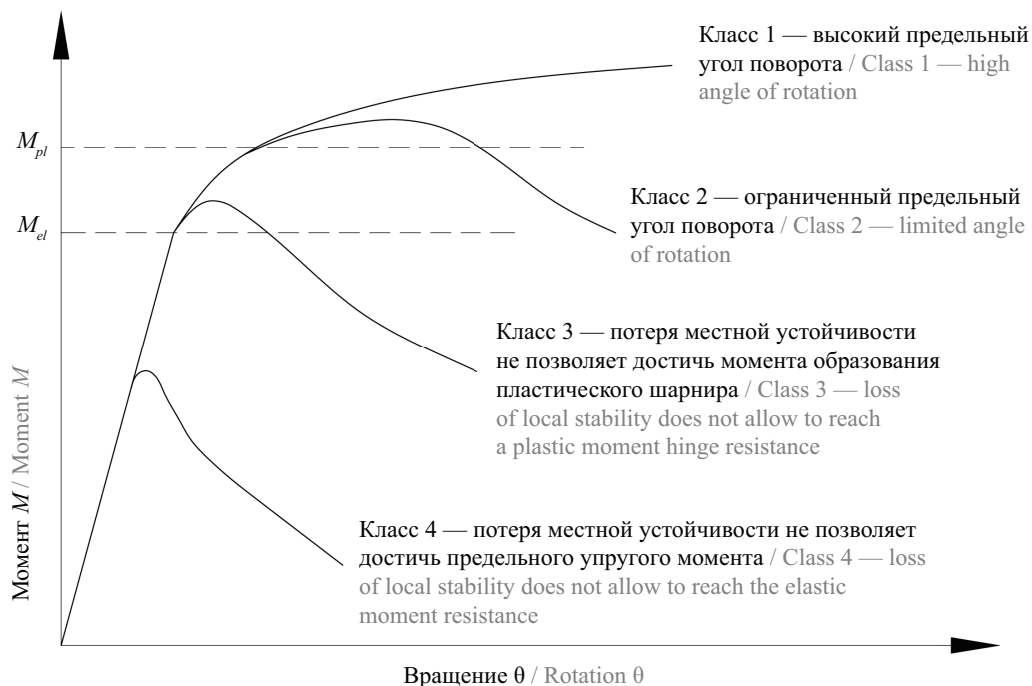


Рис. 1. Зависимость изгибающего момента в сечении от класса поперечного сечения по EN 1993-1-1 [20]

Fig. 1. Dependence of the bending moment on the cross-section class according to EN 1993-1-1 [20]

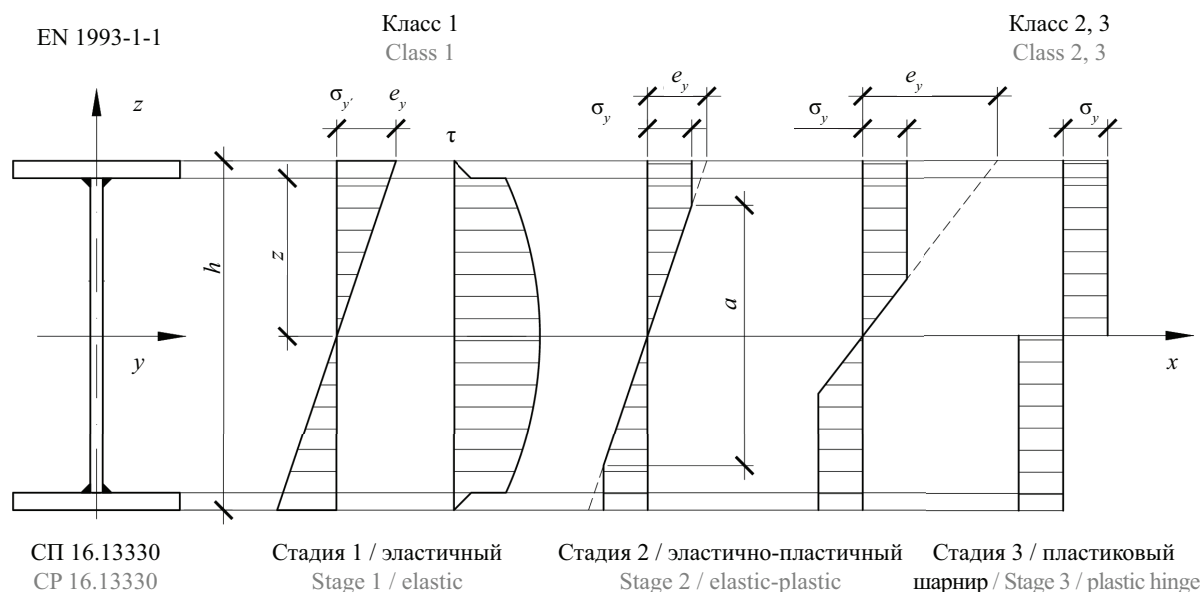


Рис. 2. Сравнение классификации поперечных сечений по EN 1993-1-1 и СП 16.13330 на примере изгибаемых элементов
 Fig. 2. Comparison of the classification of cross sections according to EN 1993-1-1 and CP 16.13330 on the example of bending elements

Выполняя аналогичные расчеты для всех уголков по ГОСТ 8509 и 8510⁷, получим, что до 30 % наиболее «ходовых» уголков относится к 4 классу, что подразумевает дальнейшую проверку несущей способности с применением редуцированных характеристик сечения [21, 22]. В то же время традиционно в отечественной практике проверка местной устойчивости свесов полок и стенки горячекатаных профилей не требуется, поскольку она обеспечена прокатом. В отечественной практике фермы из уголков зарекомендовали себя как надежные, и опыт эксплуатации не свидетельствует о потере местной устойчивости частей сечения.

Расчет и конструирование соединений. Расчет соединений представлен в части 1-8 и состоит из:

- расчета и конструирования болтовых (включая соединения на заклепках и штифтах) и сварных соединений;
- раздела, посвященного определению жесткости узлов;
- расчета и конструирования узлов из двутавров, бесфасоночных узлов из гнутосварных профилей и круглых труб.

Еврокод накладывает ограничения на применяемые в конструкциях сварочные материалы, болты, гайки и шайбы: проектировщик должен использовать материалы, соответствующие ссылочным стандартам, приведенным в п. 1.2.4 и 1.2.5 EN 1993-1-8⁸.

⁷ ГОСТ 8510–86. Уголки стальные горячекатаные неравнополочные. Сортамент. 1986. 10 с.

⁸ EN 1993-1-8:2005. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчет соединений. 128 с.

Отличия в конструировании болтовых соединений по СП 16.13330 и EN 1993-1-8 приведены в табл. 1 [23].

Расчет сварных швов в части 1-8 Еврокода 3 производится по эффективной высоте сварного шва a , равной высоте вписанного в сварной шов треугольника (рис. 3), что позволяет рассчитать угловые, круговые угловые (рис. 4, a), стыковые, пробочные сварные швы (рис. 4, b), а также сварные швы с клинообразным зазором (рис. 3, b).

Основные отличия в расчете и конструировании сварных соединений по СП 16.13330 и EN 1993-1-8 приведены в табл. 2 [23].

Классификация и моделирование узлов. Еврокод позволяет расчетным методом определить жесткость узла и учесть влияние работы соединений на распределение внутренних сил и моментов в конструкции, а также на общие деформации конструкции. Поэтому узлы в зависимости от их начальной вращательной жесткости $S_{j,m}$ классифицируются на жесткие, номинально-шарнирные и полужесткие. В зависимости от прочности узлы классифицируются на номинально-шарнирные, равнопрочные и частично равнопрочные.

Конструирование бесфасоночных узлов из прямоугольных труб. Использование европейских норм при проектировании бесфасоночных узлов из гнутосварных профилей значительно расширяет их область применения (табл. 3).

1. В п. 7.2.2 EN 1993-1-8 значительно расширены критерии проверок бесфасоночных узлов:

- отказ лицевой поверхности пояса (отказ вследствие пластического разрушения лицевой поверхности пояса) или пластификация пояса (отказ вследствие пластического разрушения лицевой поверхности пояса)

Табл. 1. Конструирование болтовых соединений по СП 16.13330 и EN 1993-1-8

Table 1. Construction of bolted joints according to CP 16.13330 and EN 1993-1-8

Параметр Parameter	СП 16.13330 CP 16.13330	EN 1993-1-8
Применение метизов по ГОСТ Application of screws according to GOST	Да Yes	Не допускается (<i>только соответствующие ссылочным стандартам EN ISO</i>) Not allowed (<i>only in accordance with EN ISO standards</i>)
Наличие классификации болтовых соединений Classification of bolted connections	Отсутствует Absent	Да Yes
Разрешенные к применению болты классов прочности Allowed bolts of strength classes	5,6, 5,8, 8,8 ... 12,9	4,6–10,9
Разрешенные к применению болты классов прочности с предварительным натяжением Allowed pre-tensioned bolts of strength classes	10,9, 12,9	8,8, 10,9
Возможность установки высокопрочных болтов в овальные отверстия The possibility of installing high- strength bolts in oval holes	Не допускается Not allowed	Да Yes
Способы обработки поверхностей трения Methods of preparation of friction surfaces	По табл. 42 СП 16.13330 According to Table 42 CP 16.13330	По табл. 3.7 EN 1993-1-8 (<i>использование других способов обработки допускается только после проведения соответствующих испытаний по методикам из п. 1.2.4 EN 1993-1-8</i>) According to Table 3.7 of EN 1993-1-8 (<i>the use of other preparation methods is allowed only after carrying out the appropriate tests according to the methods from EN 1993-1-8</i>)
Срез одной плоскости Single plane cut	По площади болта брутто A (<i>резьба не должна проходить через плоскость среза</i>) By bolt area gross A (<i>the thread must not pass through the cutting plane</i>)	По площади болта брутто A или нетто A_s (<i>резьба может проходить через плоскость среза</i>) By bolt area gross A or net A_s (<i>the thread can pass through the cut plane</i>)
Применение комбинированных соединений (<i>высокопрочные болты и сварка</i>) Application of combined joints (<i>high- strength bolts and welding</i>)	Нет No	Да (<i>натяжение высокопрочных болтов производится после окончания выполнения сварочных работ</i>) Yes (<i>tension of high-strength bolts is made after the completion of welding work</i>)

ствии пластического разрушения поперечного сечения пояса);

- отказ боковой поверхности пояса (или отказ стенки пояса) из-за раздавливания, пластификации или неустойчивого состояния (выгиб или потеря устойчивости боковой поверхности пояса из замкнутого профиля или стенки пояса) в месте примыкания сжатого стержня решетки;

- сдвиг (срез) сечения пояса;

- вырывание поверхности пояса (отказ из-за возникновения трещины, инициирующей отрыв стержня решетки от пояса);

- потеря местной устойчивости стержня решетки [24].

2. Имеется возможность расчета пространственных бесфасоночных узлов КК, ТТ и ХХ (рис. 5). Наиболее важный критерий — это уменьшение минимального угла наклона решетки к поясу до 30° . Из недостатков Еврокода следует отметить более жесткие требования к профилям и их химическому составу, в случае невыполнения которых сварка допускается только в зонах, расположенных на расстоянии $5t$ от углов сечения профиля (табл. 3). Также необходимо отметить, что в Еврокоде отсутствует

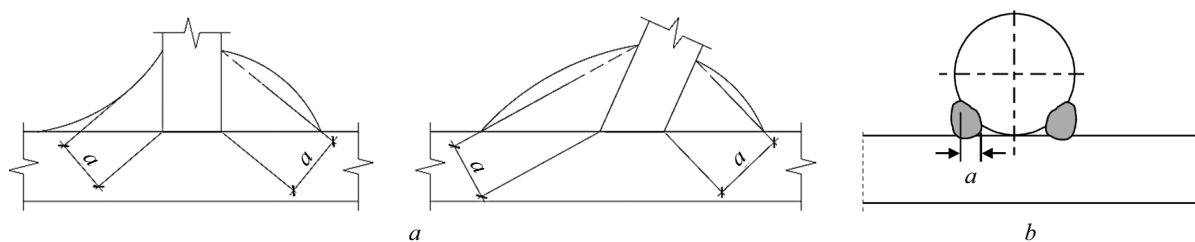


Рис. 3. К определению эффективной толщины углового сварного шва

Fig. 3. To determine the effective thickness of the fillet weld

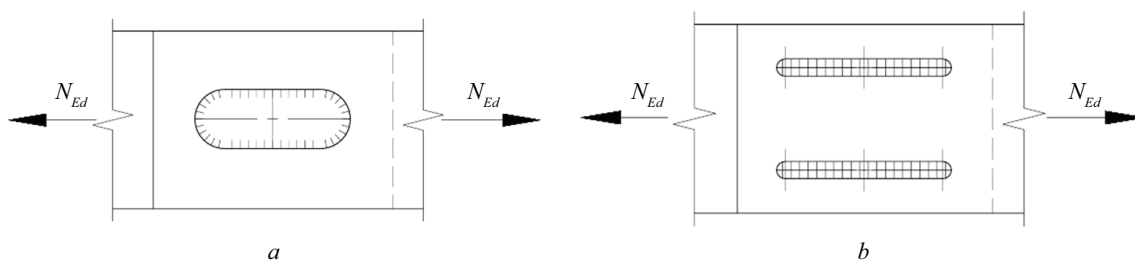


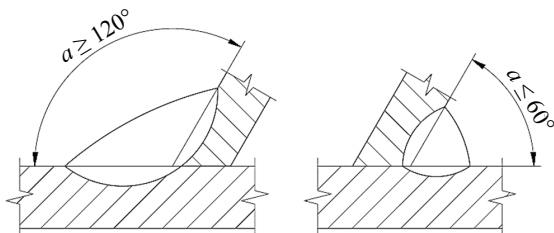
Рис. 4. Круговой шов с вытянутым отверстием (a) и пробочный (b)

Fig. 4. Circular weld with elongated hole (a) and plug weld (b)

Табл. 2. Конструирование сварных соединений по СП 16.13330 и EN 1993-1-8

Table 2. Construction of welded joints according to CP 16.13330 and EN 1993-1-8

Параметр Parameter	СП 16.13330 SP 16.13330	EN 1993-1-8
Применение сварочных материалов по ГОСТ, ТУ и т.д. Application of materials according to GOST	Да Yes	Нет (только соответствующие ссылочным стандартам EN ISO) Not allowed (only in accordance with EN ISO standards)
Наличие классификации сварных соединений Classification of welded connections	Нет No	Да Yes
<i>Возможность расчета и конструирования сварных швов Possibility of calculation and design of welds</i>		
• угловые круговые швы (рис. 4, a) fillet circular weld (Fig. 4, a)	Нет No	Да Yes
• пробочные швы (рис. 4, b) plug weld (Fig. 4, b)	Нет No	Да Yes
• с клинообразным зазором (рис. 3, b) flare groove welds (Fig. 3, b)	Нет No	Да Yes
• угловые швы с углами наклона от 60 до 120° fillet weld with tilt angles from 60 to 120°	Нет No	Да Yes
• угловые швы с углами наклона до 60 и от 120° fillet weld with tilt angles up to 60 and from 120°	Нет No	При углах менее 60° угловой сварной шов следует рассматривать как стыковой с неполным проваром. При углах более 120° несущую способность угловых сварных швов необходимо определять испытанием в соответствии с EN 1990 At angles of less than 60°, the fillet weld should be considered as a butt weld without full penetration. At angles of more than 120°, the bearing capacity of fillet welds should be determined by testing in accordance with EN 1990



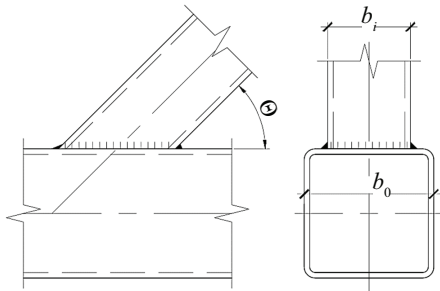
Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Параметр Parameter	СП 16.13330 SP 16.13330	EN 1993-1-8
Минимальная расчетная длина сварного шва Minimum design weld length	$4k_f$ 40 мм / mm	$6a$ 30 мм / mm
Расчетная длина сварного шва Design length of the weld	$l_w = l + 1$ см / cm	$l_{eff} = 1$ или $l_{eff} = 1 + 2a$ $l_{eff} = 1$ or $l_{eff} = 1 + 2a$
Максимальная длина сварного шва Maximum design weld length	Для фланговых швов $85\beta_f k_f$ For flank welds $85\beta_f k_f$	Только для нахлесточных соединений Only for overlapping connections

Табл. 3. Область применения бесфасоночных узлов из прямоугольных труб по СП 16.13330 и EN 1993-1-8 [24]

Table 3. Scope of application of fascia-free rectangular pipe joints according to CP 16.13330 and EN 1993-1-8 [24]

Параметр Parameter	СП 16.13330 CP 16.13330	EN 1993-1-8
Минимальная толщина стенки труб Minimum pipe wall thickness	3 мм / mm	2,5 мм / mm
Максимальная толщина стенки труб Maximum pipe wall thickness	–	25 мм / mm
Отношение ширины раскоса b_i к ширине пояса b_o The ratio of the width of the brace b_i to the width of the flange b_o	$b_i/b_o \leq 0,9$	$b_i/b_o = 0,25-1,0$ (см. табл. 7.8 EN 1993-1-8) (see Table 7.8 EN 1993-1-8)
Допустимые углы наклона раскосов Θ , град Permissible slope angles of the struts Θ , deg	$\Theta \geq 38^\circ$	$\Theta \geq 30^\circ$
Сталь Steel	C245–C460	Стали с пределом текучести до 460 МПа Steel with yield strength of up to 460 MPa
Требования к профилям Profile Requirements	–	Должны соответствовать EN 10210 или EN 10219 Must comply with EN 10210 or EN 10219
Требования к химическому составу и раскислению стали труб Requirements for the chemical composition and deoxidation of steel pipes	–	$C = (0,09-0,15) \%$; $P \leq 0,04 \%$; $S \leq 0,05 \%$; $Al \geq 0,02 \%$
Дополнительные требования Additional requirements	–	Класс поперечного сечения 1 или 2 Cross section class 1 or 2
Типы плоских бесфасоночных узлов Types of planar fascia-free joints	К, КТ, N, Т, Y (см. рис. 25 ²) (see Fig. 25 ²)	К, КТ, N, Т, Y, X (см. рис. 7.1 EN 1993-1-8) (see Fig. 7.1 EN 1993-1-8)
Типы пространственных бесфасоночных узлов Types of spatial fascia-free joints	–	КК, ТТ и ХХ (рис. 5) KK, TT and XX (Fig. 5)



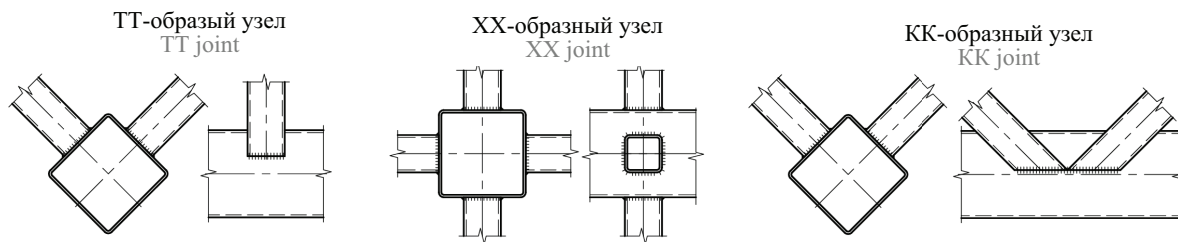


Рис. 5. Пространственные бесфасоночные узлы из прямоугольных труб по EN 1993-8

Fig. 5. Spatial joints of fascia-free rectangular pipes according to EN 1993-8

возможность расчета сварных швов, прикрепляющих стержни решетки к поясу, вследствие принятой гипотезы равнопрочности стыковых сварных швов основному металлу [23, 24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного сопоставления строительных норм по проектированию стальных конструкций СП 16.13330 и EN 1993 можно сделать следующие выводы.

Методологические подходы к проверкам предельных состояний и обеспечению надежности стальных конструкций в СП 16.13330 и Еврокодах носят очень близкий характер, однако существуют различия в значениях и наборах частных коэффициентов. Наибольшее отличие в значениях частных коэффициентов обусловлено разными уровнями надежности, принятыми в СП и Еврокодах. При этом, по мнению авторов, набор частных коэффициентов, представленный в СП 16.13330, позволяет более достоверно учесть проектные условия. Так, доступен более детальный учет изменения прочностных характеристик стали от толщины проката и более полный набор в СП 16.13330 коэффициентов условий работы. Прямое сравнение значений коэффициентов надежности невозможно из разных моделей несущей способности. Также необходимо учитывать тот факт, что модели сопротивления, принятые в Еврокодах, ориентированы на предсказания 5%-ного

квантиля, в то время как модели, заложенные в СП, традиционно подгоняются по среднему значению.

Классификация поперечных сечений в EN 1993-1-1 разработана для европейского проката. При проектировании стальных конструкций по Еврокодам из сталей по ГОСТ 27772⁹ методы классификации поперечных сечений прокатных профилей, выпускаемых по ГОСТ или ТУ, нуждаются в корректировке.

Часть 1-8 EN 1993 предоставляет несколько больше возможностей при проектировании сварных и болтовых соединений: возможность проектирования срезных соединений по площади болта нетто; расчет угловых круговых, пробочных, с клинообразным зазором и угловых с различными углами наклона элементов.

При проектировании бесфасоночных узлов из прямоугольных труб Еврокод предоставляет больше возможностей: применение узлов с углами наклона решетки от 30°, больший диапазон отношений ширины раскоса к поясу, возможность конструирования пространственных узлов по типу КК, ТТ и ХХ. EN 1993-1-8 содержит больше схем разрушения бесфасоночных узлов, однако не по всем схемам приведен соответствующий расчет. Еврокод также накладывает более жесткие требования к гнутым профилям, их химическому составу и раскислению стали [24].

⁹ ГОСТ 27772–2021. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия. 2021. 32 с.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стрелецкий Н.С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений. М.: Стройиздат, 1947. 95 с.
2. Балдин В.А., Гольденблат И.И., Коченов В.И., Пильдиш М.Я., Таль К.Э. Расчет строительных конструкций по предельным состояниям. М.: Стройиздат, 1951. 272 с.
3. Novák L., Cervenka J., Cervenka V., Novák D., Sýkora M. Comparison of advanced semi-probabilistic methods for design and assessment of concrete structures // Structural Concrete. 2022. Vol. 24. Issue 1. Pp. 771–787. DOI: 10.1002/suco.202200179

4. Балдин В.А., Урицкий М.Р. Обеспеченность нормативных и расчетных сопротивлений малоуглеродистой стали для строительных металлоконструкций // Промышленное строительство. 1978. № 6. С. 19–21. EDN ZIFGUP.
5. Бельский Г.Е. О предельных состояниях элементов металлических конструкций при сжатии (растяжении) с изгибом // Строительная механика и расчет сооружений. 1973. № 2. С. 51–57.
6. Allaix D.L., Carbone V.I., Mancini G. Global safety format for non-linear analysis of reinforced concrete structures // Structural Concrete. 2013. Vol. 14. Issue 1. Pp. 29–42. DOI: 10.1002/suco.201200017

7. Sykora M., Holický M. Safety format for non-linear analysis in the model code — verification of reliability level // Proceeding of fib Symposium on Concrete Engineering for excellence and efficiency. 2011. Pp. 943–946.
8. Надольский В.В., Голицы М., Сикора М., Тур В.В. Сопоставление уровней надежности, обеспечиваемых нормами Российской Федерации и Евросоюза // Вестник МГСУ. 2013. № 6. С. 7–20. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.6.7-20. EDN QGRYLZ.
9. Тур В.В., Надольский В.В. Калибровка значений частных коэффициентов для проверок предельных состояний несущей способности стальных конструкций для условий Республики Беларусь. Часть 1 // Строительство и реконструкция. 2016. № 4 (66). С. 73–84. EDN WJIFTB.
10. Marková J., Holický M., Jung K., Sýkora M. Reliability of existing reinforced concrete slabs exposed to punching shear // Acta Polytechnica CTU Proceedings. 2022. Vol. 36. Pp. 119–126. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0119
11. Prokop J., Odrobníák J., Farbák M., Novotný V. Load-carrying capacity of bailey bridge in civil applications // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 8. P. 3788. DOI: 10.3390/app12083788
12. Holický M. Safety design of lightweight roofs exposed to snow load // The Art of Resisting Extreme Natural Forces. 2007. Vol. 58. DOI: 10.2495/en070061
13. Sýkora M., Holický M. Reliability-based design of roofs exposed to a snow load. Shanghai : Tongji University Press, 2009. Pp. 183–188.
14. Hyman P., Sriramula S., Osofero A.I. Calibration of safety factors for prestressed stayed steel columns // Architecture, Structures and Construction. 2022. Vol. 2. Issue 3. Pp. 365–380. DOI: 10.1007/s44150-022-00066-5
15. Koteš P., Prokop J., Strieška M., Vičan J. Calibration of partial safety factors according to Eurocodes // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 117. P. 00088. DOI: 10.1051/mateconf/201711700088
16. Konečný P., Horňáková M., Lehner P., Rovnanikova P., Sykora M. Model uncertainty in diffusion coefficient for chloride ingress into concrete // Procedia Structural Integrity. 2021. Vol. 31. Pp. 147–153. 10.1016/j.prostr.2021.03.023
17. Holický M., Retief J.V., Sýkora M. Assessment of model uncertainties for structural resistance // Probabilistic Engineering Mechanics. 2016. Vol. 45. Pp. 188–197. DOI: 10.1016/j.probengmech.2015.09.008
18. Shankar S., Kumar R., Khatri A.P., Gupta L.M. Comparison of section classification procedure of different codes // ASPs Conference Proceedings. 2022. Vol. 1. Issue 1. Pp. 443–447. DOI: 10.38208/acp.v1.533
19. Graciano-Gallego C.A., Loaiza N., Casanova E. A comparative analysis of resistance models for austenitic stainless steel girders subjected to concentrated loads // Revista UIS Ingenierías. 2021. Vol. 21. Issue 1. DOI: 10.18273/revuin.v21n1-2022008
20. Шурин А.Б., Туснин А.П., Зинкевич И.В., Мухин А.В. Проектирование стальных конструкций в соответствии с требованиями EUROCODES. М. : Изд-во АСВ, 2021. 224 с.
21. Bezas M.Z., Demonceau J.F., Vayas I., Jaspert J.P. Classification and cross-section resistance of equal-leg rolled angle profiles // Journal of Constructional Steel Research. 2021. Vol. 185. P. 106842. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106842
22. Bezas M.Z., Demonceau J.F., Vayas I., Jaspert J.P. Compression tests on large angle columns in high-strength steel // Steel Construction. 2022. Vol. 15. Issue 1. Pp. 43–47. DOI: 10.1002/stco.202100051
23. Шурин А.Б., Зинкевич И.В., Мухин А.В. Сравнительный анализ расчета и проектирования элементов стальных конструкций по ТКП EN 1993-1 и СНиП II-23 // Вестник БрГТУ. 2020. № 1. С. 23–27. DOI: 10.36773/1818-1212-2020-119-1-23-27
24. Шурин А.Б., Мухин А.В. Опыт конструирования ферм из гнутосварных профилей в соответствии с требованиями EN 1993-1 // Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини : збірник наукових праць. 2020. С. 141–149.

Поступила в редакцию 28 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 26 февраля 2024 г.

Одобрена для публикации 29 февраля 2024 г.

Об авторах: **Андрей Брониславович Шурин** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительных конструкций; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267, Республика Беларусь; Scopus: 57220833497, ORCID: 0000-0003-1396-3503; Shuryn@mail.ru;

Виталий Валерьевич Надольский — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267, Республика Беларусь; доцент кафедры строительных конструкций; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; 220013, г. Минск, пр-т Независимости, д. 65, Республика Беларусь; РИНЦ ID: 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolskiyv@mail.by.

Вклад авторов:

Шурин А.Б. — написание разделов «Классификация поперечных сечений», «Расчет и конструирование соединений», «Классификация и моделирование узлов», «Конструирование бесфасоночных узлов из прямоугольных труб», корректировка раздела «Коэффициенты надежности», выводы.

Надольский В.В. — написание раздела «Коэффициенты надежности», корректировка разделов «Классификация поперечных сечений», «Классификация и моделирование узлов», выводы. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Streletsky N.S. *Fundamentals of statistical accounting of the safety factor of structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1947; 95. (rus.).
2. Baldin V.A., Goldenblat I.I., Kochenov V.I., Pildish M.Ya., Tal K.E. *Calculation of building structures based on limit states*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1951; 272. (rus.).
3. Novák L., Cervenka J., Cervenka V., Novák D., Sýkora M. Comparison of advanced semi-probabilistic methods for design and assessment of concrete structures. *Structural Concrete*. 2022; 24(1):771-787. DOI: 10.1002/suco.202200179
4. Baldin V.A., Uritsky M.R. Provision of standard and calculated resistances of low-carbon steel for building metal structures. *Industrial Construction*. 1978; 6:19-21. EDN ZIFGUP. (rus.).
5. Belsky G.E. On the limit states of elements of metal structures under compression (tension) with bending. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 1973; 2:51-57. (rus.).
6. Allaix D.L., Carbone V.I., Mancini G. Global safety format for non-linear analysis of reinforced concrete structures. *Structural Concrete*. 2013; 14(1):29-42. DOI: 10.1002/suco.201200017
7. Sykora M., Holicky M. Safety format for non-linear analysis in the model code — verification of reliability level. *Proceeding of fib Symposium on Concrete Engineering for Excellence and Efficiency*. 2011; 943-946.
8. Nadolski V.V., Holicky M., Sykora M., Tur V.V. Comparison of Reliability Levels Provided by the Eurocodes and Standards of the Russian Federation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 6:7-20. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.6.7-20. EDN QGRYLZ. (rus.).
9. Tur V., Nadolski V. The partial factor values calibration for the ultimate limit state checking of steel structures for the conditions republic of Belarus. Part 1. *Building and Reconstruction*. 2016; 4(66):73-84. EDN WJIFTB. (rus.).
10. Marková J., Holický M., Jung K., Sýkora M. Reliability of existing reinforced concrete slabs exposed to punching shear. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2022; 36:119-126. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0119
11. Prokop J., Odrobiňák J., Farbák M., Novotný V. Load-carrying capacity of bailey bridge in civil applications. *Applied Sciences*. 2022; 12(8):3788. DOI: 10.3390/app12083788
12. Holicky M. Safety design of lightweight roofs exposed to snow load. *The Art of Resisting Extreme Natural Forces*. 2007; 58. DOI: 10.2495/en070061
13. Sýkora M., Holický M. *Reliability-based design of roofs exposed to a snow load*. Shanghai, Tongji University Press, 2009; 183-188.
14. Hyman P., Sriramula S., Osofero A.I. Calibration of safety factors for prestressed stayed steel columns. *Architecture, Structures and Construction*. 2022; 2(3):365-380. DOI: 10.1007/s44150-022-00066-5
15. Koteš P., Prokop J., Strieška M., Vičan J. Calibration of partial safety factors according to Eurocodes. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00088. DOI: 10.1051/mateconf/201711700088
16. Konečný P., Hornáková M., Lehner P., Rovnanikova P., Sykora M. Model uncertainty in diffusion coefficient for chloride ingress into concrete. *Procedia Structural Integrity*. 2021; 31:147-153. 10.1016/j.prostr.2021.03.023
17. Holický M., Retief J.V., Sýkora M. Assessment of model uncertainties for structural resistance. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2016; 45:188-197. DOI: 10.1016/j.probenmech.2015.09.008
18. Shankar S., Kumar R., Khatri A.P., Gupta L.M. Comparison of section classification procedure of different codes. *ASPS Conference Proceedings*. 2022; 1(1):443-447. DOI: 10.38208/acp.v1.533
19. Graciano-Gallego C.A., Loaiza N., Casanova E. A comparative analysis of resistance models for austenitic stainless steel girders subjected to concentrated loads. *Revista UIS Ingenierías*. 2021; 21(1). DOI: 10.18273/revuin.v21n1-2022008
20. Shurin A.B., Tusnin A.R., Zinkevich I.V., Mukhin A.V. *Design of Steel Structures in Accordance with EUROCODES Requirements*. Moscow, ASV Publishing House, 2021; 224. (rus.).
21. Bezas M.Z., Demonceau J.F., Vayas I., Jaspert J.P. Classification and cross-section resistance of equal-leg rolled angle profiles. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021; 185:106842. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106842
22. Bezas M.Z., Demonceau J.F., Vayas I., Jaspert J.P. Compression tests on large angle columns in high-strength steel. *Steel Construction*. 2022; 15(1):43-47. DOI: 10.1002/stco.202100051
23. Shurin A.B., Zinkevich I.V., Mukhin A.V. Comparative analysis of calculation and design of steel structure elements according to TKP EN 1993-1 and SNiP II-23. *Bulletin of BrSTU*. 2020; 1:23-27. DOI: 10.36773/1818-1212-2020-119-1-23-27 (rus.).
24. Shurin A.B., Mukhin A.V. Experience in designing trusses from bent-welded profiles in accordance with the requirements of EN 1993-1. *Everyday structures from metal and wood: collection of scientific works*. 2020; 141-149. (rus.).

Received August 28, 2023.

Adopted in revised form on February 26, 2024.

Approved for publication on February 29, 2024.

B I O N O T E S: **Andrei B. Shuryn** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Building Structures; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; Scopus: 57220833497, ORCID: 0000-0003-1396-3503; Shuryn@mail.ru;

Vitali V. Nadolski — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technology; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; Associate Professor of the Department of Building Structures; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 Independence Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus; ID RSCI: 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolskivv@mail.by.

Contribution of the authors:

Andrei B. Shuryn — writing the sections “Classification of cross sections”, “Calculation and design of connections”, “Classification and modeling of nodes”, “Design of faceless nodes from rectangular pipes”, correction of the section “Reliability coefficients”, conclusions.

Vitali V. Nadolski — writing the section “Reliability coefficients”, correcting the sections “Classification of cross sections”, “Classification and modeling of nodes”, conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.