

В.В. НАДОЛЬСКИЙ^{1,2}

¹УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

НЕСОВЕРШЕНСТВА ДЛЯ РАСЧЕТА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. ЧАСТЬ 2.

Аннотация. Хорошо известно, что несовершенства всегда присутствуют в элементах конструкций. Несовершенства могут существенно влиять на поведение и несущую способность стальных конструкций, особенно в случае задач, связанных с устойчивостью. Поэтому несовершенства должны учитываться в модели несущей способности и их правильное приложение (задание формы и значения) является ключевым моментом в процессе численного анализа. В последние десятилетия в отечественном научном пространстве уделяется мало внимания актуализации моделей несовершенств для применения в численных моделях, в том числе с учётом современных более точных технологий изготовления и монтажа стальных конструкций. Целью данного исследования является аналитический обзор и анализ научных исследований и технической литературы с последующим синтезом и выработкой рекомендаций по несовершенствам применительно к расчёту стальных конструкций посредством технологии компьютерного моделирования, в том числе методом конечных элементов. Результаты исследования содержат указания по способам задания форм и значений несовершенств для разных групп несовершенств. Статья состоит из двух частей. Первая часть посвящена вопросам изучения геометрических несовершенств, остаточных напряжений и правилам комбинации несовершенств, вторая часть статьи – эквивалентным несовершенствам.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, несовершенства, дефекты, остаточные напряжения, метод конечных элементов, искривления балки.

V.V. NADOLSKI¹

¹Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

IMPERFECTIONS FOR THE CALCULATION OF STEEL STRUCTURES BY THE FINITE ELEMENT METHOD. PART 2.

Abstract. It is well known that imperfections are always present in structural elements. Imperfections can significantly affect the behavior and bearing capacity of steel structures, especially in the case of stability-related tasks. Therefore, inconsistencies must be taken into account in the load-bearing capacity model and their correct application (setting the shape and value) is a key point in the numerical analysis process. In recent decades, much attention has been paid in the domestic scientific space to updating imperfection models for use in numerical models, including taking into account modern more accurate manufacturing and installation technologies for steel structures. The purpose of this study is an analytical review and analysis of scientific research and technical literature, followed by synthesis and elaboration of recommendations on imperfections in relation to the calculation of steel structures using computer modeling technology, including the finite element method. The results of the study contain instructions on how to set the shapes and values of imperfections for different groups of imperfections. The article consists of two parts. The first part is devoted to the study of geometric imperfections, residual stresses and rules for the combination of imperfections, the second part of the article is devoted to equivalent imperfections.

Keywords: computer modeling, imperfections, defects, residual stresses, finite element method, beam curvature.

Введение

Важность и необходимость изучения несовершенств стальных конструкций представлена в исследованиях [1 - 9]. Повышенную актуальность этот вопрос приобретает в связи с интенсивным применением компьютерного моделирования стальных элементов и узлов в повседневном проектировании. Доминирующее влияние на несущую способность оказывают геометрические несовершенства и остаточные напряжения, которые могут быть смоделированы как отдельные несовершенства или как эквивалентные несовершенства [8-11]. Эквивалентные несовершенства в большинстве случаев представляют в виде геометрического несовершенства с увеличенным значением амплитуды, поэтому также используется термин эквивалентное геометрическое несовершенство [12]. Определение амплитуды (значения) эквивалентного несовершенства имеет большое значение и в большинстве случаев может быть определено только на основании калибровки численных моделей по экспериментальным данным. Ниже представлены результаты наиболее значимых и последних исследований в этой области.

Целью данного исследования является аналитический обзор литературы и систематизация результатов исследований несовершенств применительно к расчету стальных конструкций посредством технологии компьютерного моделирования несущей способности, в том числе методом конечных элементов. Статья состоит из двух частей. Первая часть посвящена вопросам изучения геометрических несовершенств, остаточных напряжений и правилам комбинации несовершенств, вторая часть статьи – *эквивалентным несовершенствам сечений (стеки, полки, отсеки пластин, ограниченные ребрами жесткости), элементов и конструкций.*

Представлены результаты научных исследований несовершенств для расчета стальных конструкций методом конечных элементов на основании аналитического обзора и анализа научной и технической литературы с последующим синтезом и выработкой рекомендаций по заданию форм и значений эквивалентных несовершенств.

Эквивалентные несовершенства элементов

Значение эквивалентных несовершенств для элементов конструкции зависит от применяемого типа анализа и метода проверки несущей способности элемента. Различают принципиально два разных набора эквивалентных несовершенств элементов [13-15]:

- для определения эффектов второго порядка. Устойчивость элемента может быть проверена посредством анализа поперечного сечения по «прочности» с изгибающими моментами, вычисленными в соответствии с теорией второго порядка для стержня с начальным изгибным несовершенством. Данное несовершенство элементов называется несовершенством для геометрически нелинейного упругого (физически линейного) анализа или несовершенством для определения эффектов второго порядка (дополнительного изгибающего момента). В рамках данного способа проверка элемента по устойчивости сводится к проверке сечения по прочности.

- для прямой оценки несущей способности. Данные несовершенства применяют для геометрически нелинейного неупругого (физически нелинейного) анализа, на основании которого оценивают несущую способность.

Эквивалентные несовершенства элементов для определения эффектов второго порядка. Анализ значений эквивалентных несовершенств для определения эффектов второго порядка выполнен в работах [13, 14], результаты данного исследования положены в разработку второго поколения стандарта EN 1993-1-1. Значения несовершенств были откалиброваны по кривым потери устойчивости. Эти значения несовершенств обеспечивают точное решение, если геометрически нелинейный упругий анализ выполняется посредством численной модели,

а несущая способность при потере устойчивости определяется дополнительными проверками сечения.

Согласно исследованию [13] значение эквивалентных изгибных несовершенств предлагается определять по выражению:

$$e_{0,E} = \alpha (\lambda - 0.2) M_{Rk} / N_{Rk}, \quad (1)$$

где, $e_{0,E}$ – значение эквивалентного несовершенства элемента для определения эффектов второго порядка; α – коэффициент несовершенства для соответствующей кривой потери устойчивости; λ – гибкость элемента; M_{Rk} – характеристическое значение несущей способности для изгибающего момента; N_{Rk} – характеристическое значение несущей способности для продольной силы.

Выражение было получено на основе линейного критерия взаимодействия осевой силы (N) и изгибающего момента второго порядка $M = M_0 + N \cdot e_0 \{1/(1-N/N_{cr})\}$ [13]:

$$N / N_{Rk} + M / M_{Rk} = 1, \quad (2)$$

при этом, если используется проверка в предположении упругой работы сечения, то $N_{Rk} = N_{pl}$ (N_{pl} – несущая способность сечения для осевой силы, равная $A \cdot f_y$, где A – площадь сечения, f_y – предел текучести), и $M_{Rk} = M_{el}$ (M_{el} – несущая способность сечения для изгибающего момента в упругой стадии, равная $W_{el} \cdot f_y$, где W_{el} – упругий момент сопротивления сечения). Аналогично, если используется проверка сечения в предположении развития пластических деформаций, то $N_{Rk} = N_{pl}$ и $M_{Rk} = M_{pl}$ (M_{pl} – несущая способность сечения для изгибающего момента в пластической стадии, равная $W_{pl} \cdot f_y$, где W_{pl} – пластический момент сопротивления сечения).

Несовершенство, рассчитанное в предположении пластической работы сечения, больше, чем рассчитанное в предположении упругой работы сечения, для того чтобы компенсировать потерю жесткости из-за развития пластических деформаций, которые не учитываются в упругом (физически линейном) анализе. Следует обратить внимание, что применение нелинейного критерия взаимодействия осевой силы и изгибающего момента совместно с несовершенствами, полученными на основании уравнений (1) и (2), даст неверные решения, так как уравнение было выведено на основе линейного критерия взаимодействия осевой силы и изгибающего момента.

В развитие вышеотмеченного подхода исследователи [14] обосновали табличные значения эквивалентных несовершенств элементов для определения эффектов второго порядка, которые зависят только от типа сечения, оси потери устойчивости и стадии работы сечения. Эти несовершенства предназначены для аппроксимации точного решения [13], оставаясь при этом безопасными и снижая сложность расчета за счет отсутствия зависимости от гибкости и, следовательно, эффективной длины потери устойчивости, которую на практике бывает трудно определить. Табличные значения определяются с помощью следующего выражения:

$$e_{0,E} = \alpha \cdot L \cdot \beta_E / \varepsilon, \quad (3)$$

где, L – длина элемента; α – коэффициент несовершенства для соответствующей кривой потери устойчивости, учитывающий влияние остаточных напряжений для соответствующего типа сечения; ε – параметр, учитывающий прочность материала (равный $\sqrt{235/f_y}$); β_E – относительное изгибное несовершенство, которое зависит от оси потери устойчивости и стадии работы сечения (упругая или пластическая), см. таблицу 1.

Таблица 1 – Значения относительного изгибного несовершенства β_E [14]

Ось, относительно которой рассматривается потеря устойчивости	Упругая проверка поперечного сечения	Пластическая проверка поперечного сечения
y	1/110	1/75
z	1/200	1/68

Подводя итог, стоит отметить, что эквивалентные несовершенства, полученные в работах [13, 14], основаны на линейном критерии взаимодействия осевой силы и изгибающего момента. Однако применение этих несовершенств для определения усилий с помощью упругого анализа второго порядка и последующая проверка прочности сечения дает тот же результат, что и проверка устойчивости на основе усилий из упругого линейного расчета и кривых потери устойчивости, если используются вычисленные значения несовершенств, или близкий, но безопасный, если используются табличные значения несовершенств.

Эквивалентные несовершенства элементов для прямой оценки несущей способности сжатых элементов. Результаты работы [15] доказывают, что эквивалентные несовершенства, полученные на основе упругого анализа второго порядка, не подходят для использования при проектировании с помощью неупругого анализа второго порядка (геометрически и физически нелинейных расчетов). Для расчета требуемых эквивалентных несовершенств авторами работы [15] была выполнена подгонка (калибровка), значений эквивалентного несовершенства до тех пор, пока предельная (пиковая) нагрузка не совпадала с целевой (эталонной) нагрузкой. Целевая предельная нагрузка была определена на основании конечно-элементных моделей, разработанных с геометрическими несовершенствами в виде полусинусоиды с амплитудой $L/1000$ и остаточными напряжениями. Авторы установили, что требуемое значение эквивалентного несовершенства зависит от гибкости элемента. Однако, чтобы устранить сложность вычисления эффективной длины элемента, значения эквивалентных несовершенств были обобщены с определенным уровнем консерватизма. На основании результатов численного параметрического исследования эквивалентные несовершенства элементов для геометрически и физически нелинейного анализа определяются следующим выражением:

$$e_{0,R} = \alpha L \beta_{R,N}, \quad (4)$$

где, $e_{0,R}$ – значение эквивалентного несовершенства элемента для прямой оценки несущей способности; $\beta_{R,N}$ – относительное изгибное несовершенство для прямой оценки несущей способности сжатых элементов.

Исходя из полученных численных результатов [15] предлагается принять $\beta_{R,N} = 1/150$ для использования при проектировании для всех рассмотренных материалов и сечений. Более подробную информацию о результатах исследования можно найти в [15].

Эквивалентные несовершенства элементов для прямой оценки несущей способности изгибаемых элементов. Исследования несовершенств (начального искривления оси балки в плоскости наименьшей жесткости) для прямой оценки несущей способности изгибаемых элементов (при потере устойчивости изгибаемого элемента) были выполнены в работе [16]. В результате численного параметрического исследования предлагается определять несовершенство согласно выражению (4) с заменой α на α_z (кривая потери устойчивости относительно оси z) и эталонного значения относительного несовершенства $\beta_{R,M} = 1/150$ для форм несовершенств, определенных на основании упругого анализа потери устойчивости (бифуркационного анализа). Данное несовершенство было подтверждено для различных эпюр изгибающего момента, для горячекатаной и нержавеющей стали, и для всех значений

гибкостей элементов и сечений, если в качестве формы несовершенства применяется первая форма потери устойчивости. Для всех случаев выбрано одно значение $\beta_{R,M}$, не зависящее от гибкости элемента, чтобы сохранить простоту. Поэтому для некоторых случаев допускается определенный уровень консерватизма.

В качестве альтернативной рекомендации авторы работы [16] предлагают назначать форму эквивалентного изгибного несовершенства на основе predetermined функций. Однако, чтобы охватить диапазон возможных диаграмм изгибающего момента, предлагается комбинирование двух форм несовершенств: одной – в виде полусинусоиды, которая советует деформированной форме элементов при равномерном изгибе, и второй – в виде полной синусоиды, соответствующей форме деформации элементов при антисимметричном изгибе (на концах элемента приложены моменты с противоположными знаками). Амплитуда несовершенства полной синусоиды принимается равной $1/215$, что приблизительно равно 70% от амплитуды несовершенства полусинусоиды. Следовательно, эквивалентное несовершенство определяется как сумма полусинусоидальной волны с амплитудой $\alpha_z L / 150$ и полной синусоидальной волны с амплитудой $\alpha_z L / 215$, при этом несовершенство задается как искривление оси балки в плоскости наименьшей жесткости.

Эквивалентные несовершенства для частей поперечного сечения

Анализ чувствительности несущей способности, вычисленной посредством конечно-элементных моделей, при разных значениях несовершенств стенки и сравнение с экспериментальными данными [17] показали, что для стенок балочных элементов эквивалентные несовершенства необходимо задавать в диапазоне $b/200 \dots b/100$, где b – расчетный размер отсека. Статистический анализ показал, что задание несовершенств в предложенном диапазоне, обеспечивает хорошее совпадение экспериментальных и компьютерных результатов. Значение $b/100$ приводит к небольшому консерватизму в оценивании несущей способности. Результаты исследования [18] показали, что применение эквивалентного несовершенства $b/200$ обеспечивает значение несущей способности близкое к значениям, полученным на основе формульных моделей несущей способности (кривых потери устойчивости, приведенных в стандарте EN 1993-1-5), независимо от предела текучести и гибкости пластин.

Эквивалентные несовершенства для продольных ребер жесткости. В работе [19] провели численные исследования влияния несовершенств на продольно подкрепленные пластины (панели) и сравнили соответствующие численные результаты с аналитическими кривыми потери устойчивости для подкрепленных пластин. Для всех анализируемых геометрий панелей выполнялись два расчета: (i) с геометрическими несовершенствами и остаточными напряжениями и (ii) с эквивалентными несовершенствами. В численной модели прикладывали как глобальные (на всей панели, включая продольные ребра жесткости), так и локальные (на подпанелях между ребрами жесткости) геометрические несовершенства. Форма несовершенств была синусоидальной в пределах исследуемой панели в обоих направлениях. Исследованы два различных значения амплитуды несовершенства:

- глобальное геометрическое несовершенство продольных ребер жесткости из плоскости панели с амплитудой равной $a/1000$ (прикладывается вместе с остаточными напряжениями) или $a/400$ (применяется как эквивалентное несовершенство), где a – длина ребра жесткости;

- локальное геометрическое несовершенство подпанели между продольными ребрами жесткости с амплитудой, равной $b/500$ (приложенное вместе с $a/1000$ и остаточными напряжениями) или $b/200$ (приложенной вместе с $a/400$ эквивалентными несовершенствами), где b – ширина подпанели.

В тех случаях, когда остаточные напряжения моделировались напрямую, максимальное растягивающее остаточное напряжение принималось равным пределу текучести в зоне шва, а

максимальное сжимающее остаточное напряжение, равное 25% от предела текучести между сварными зонами, как схематично представлено на рисунке 1.

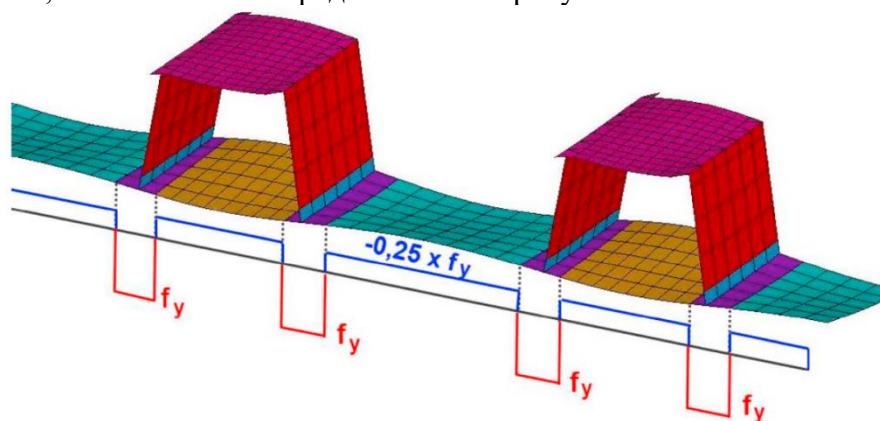


Рисунок 1 – Эюры остаточных напряжений согласно [19]

Каждый расчет выполнялся дважды, при этом глобальные несовершенства имели положительный и отрицательный знаки, а затем минимальное значение из двух расчетов принималось как предельное значение несущей способности. Полученные значения несущей способности сравнивались между двумя моделями с использованием геометрических несовершенств плюс остаточные напряжения и только с эквивалентным несовершенством. Результаты расчетов показали, что применение глобальных геометрических несовершенств (с амплитудой $a/1000$) с сопутствующими остаточными напряжениями приводит к близким значениям несущей способности, полученным с эквивалентным несовершенством с амплитудой $a/400$ без остаточных напряжений. В зависимости от того, какой набор геометрических параметров рассматривается, разница между этими двумя вариантами составляла $\pm 1...2\%$.

Таким образом, полученные результаты подтверждают общепризнанный принцип [3, 6, 7], что следует прикладывать либо геометрическое несовершенство с реалистичной амплитудой (значением) (в данном случае, например, $a/1000$) вместе с реалистичными остаточными напряжениями, либо эквивалентное несовершенство (в данном случае, например, $a/400$) без остаточных напряжений.

Эквивалентные несовершенства для строительной конструкции

В большинстве исследований эквивалентные несовершенства для конструкций приняты согласно EN 1993-1-1 [20-22]. Это несовершенство разработано и рекомендовано для проектирования стальных рам, чувствительных к потере устойчивости, сопровождающейся поперечным отклонением. Оно отражает влияние остаточных напряжений и геометрических несовершенств, таких как отсутствие вертикальности, отсутствие прямолинейности и случайные эксцентриситеты, присутствующих в соединениях ненагруженной конструкции.

Выводы

На основании выполненного исследования в области применения несовершенств стальных конструкций для прямой оценки несущей способности посредством численных методов можно сделать следующие выводы:

– Эквивалентные несовершенства элементов для проверки устойчивости сжатого или изгибаемого элемента могут быть приняты с амплитудой $\alpha L / 150$ и с формой несовершенства, назначенной на основании упругого анализа потери устойчивости (бифуркационного анализа). В качестве альтернативной рекомендации задание формы эквивалентного несовершенства для изгибаемого элемента можно осуществлять на основе предопределенных

функций. Однако, чтобы охватить диапазон возможных диаграмм изгибающего момента, необходимо комбинирование двух форм несовершенств: одной – в виде полусинусоиды с амплитудой $\alpha_z L / 150$, и второй – в виде полной синусоиды с амплитудой $\alpha_z L / 215$;

– для стенок балочных элементов эквивалентные несовершенства необходимо задавать в диапазоне $b/200 \dots b/100$;

– для пластинчатых конструкций с ребрами жесткости возможны два альтернативных способа значения несовершенства. Первый – глобальное геометрическое несовершенство продольных ребер жесткости из плоскости панели с амплитудой, равной $a/1000$, плюс локальное геометрическое несовершенство подпанели между продольными ребрами жесткости с амплитудой, равной $b/500$, плюс остаточные напряжения. Второй – несовершенство продольных ребер жесткости из плоскости панели с амплитудой, равной $a/400$, (применяется как эквивалентное несовершенство), плюс несовершенство подпанели между продольными ребрами жесткости с амплитудой, равной $b/200$ (применяется как эквивалентное несовершенство).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 80. P. 202–212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders // Journal of Constructional Steel Research. 2014. Vol. 103. P. 327–343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
3. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders; part II: Longitudinally stiffened girders // Journal of Constructional Steel Research. 2014. Vol. 103. P. 344–353. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.017.
4. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sykora M. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading // Proceedings of conference Modelling in Mechanics 2022, Ostrava, 26-27 May 2022. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Fakulta stavební, 2021, p. 21-29.
5. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 158. P. 213–229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025.
6. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders—Tests and numerical model verification // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 85. P. 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
7. Надольский В.В. Параметры численных моделей несущей способности для стальных элементов // Строительство и реконструкция. 2023. № 1(1). С. 43-56. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-43-56.
8. Надольский В. В., Вихляев А.И. Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.202.
9. Надольский В. В., Подымако В.И. Оценка несущей способности стальной балки методом конечных элементов при совместном действии локальных и сдвиговых усилий // Строительство и реконструкция. 2022. №2 (100). С.26-43.
10. Fieber A., Gardner L., Macorini L. Design of structural steel members by advanced inelastic analysis with strain limits // Engineering Structures. 2019. Vol. 199. Paper 109624. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109624.
11. Gardner L., Yun X., Fieber A., Macorini L. Steel design by advanced analysis: material modelling and strain limits // Engineering. 2019. Vol. 5. P. 243–249. DOI: 10.1016/j.eng.2018.11.026.
12. Chacon R., Serrat M., Real E. The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading // Thin-Walled Struct. 2012. Vol. 53. P. 15–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.12.003>.
13. Lindner J., Kuhlmann U., Just A. Verification of flexural buckling according to EN 1993-1-1 using bow imperfections // Steel Construction. 2016. Vol. 9. P. 349-362. DOI:10.1002/stco.201600004.
14. Lindner J., Kuhlmann U., Jörg F. Initial bow imperfections e_0 for the verification of flexural buckling according to Eurocode 3 Part 1-1 – additional considerations // Steel Construction. 2018. Vol. 11. P. 30-41. DOI: 10.1002/stco.20170.
15. Walport F., Gardner L., Nethercot D.A. Equivalent bow imperfections for use in design by second order inelastic analysis // Structures. 2020. Vol. 26. P. 670–685. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.03.065.

16. Quan Ch., Walport F., Gardner L. Equivalent imperfections for the out-of-plane stability design of steel beams by second-order inelastic analysis // *Engineering Structures*. – 2021. Vol. 251. Paper 113481. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113481.
17. Надольский В.В. Статистические характеристики погрешности численных моделей несущей способности для стальных элементов // *Строительство и реконструкция*. 2023. №3 (107). С.17-34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34.
18. Radwan M., Kövesdi B. Local plate buckling type imperfections for NSS and HSS welded box-section columns // *Structures*. 2021. Vol. 34. P. 2628-2643. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.09.011.
19. Haffar Z.M., Kövesdi B., Ádány S. On the buckling of longitudinally stiffened plates, part 2: Eurocode-based design for plate-like behaviour of plates with closed-section stiffeners // *Thin-Walled Structures*. 2019. Vol. 145. Paper 106395. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106395.
20. Kala Z. Geometrically non-linear finite element reliability analysis of steel plane frames with initial imperfections // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2012. Vol. 18. P. 81–90. DOI: 10.3846/13923730.2012.655306.
21. Yang H., Liu S., Fang Z., Zhao J. Investigation of intermediate-height horizontal brace forces under horizontal and vertical loads including random initial imperfections // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Paper 180. DOI: 10.3390.
22. Zhang H., Shayan S., Rasmussen K.J.R., Ellingwood B.R. System-based design of planar steel frames, I: Reliability framework // *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol. 123. P. 135-143. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.05.004.

REFERENCES

1. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear . *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 80. P. 202–212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. P. 327–343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
3. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders; part II: Longitudinally stiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. P. 344–353. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.017.
4. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sykora M. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading. *Proceedings of conference Modelling in Mechanics 2022*, Ostrava, 26-27 May 2022. Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Fakulta stavební. 2021, p. 21-29.
5. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 158. P. 213–229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025.
6. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders—Tests and numerical model verification. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 85. P. 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
7. Nadol'skij V.V. Parametry chislennykh modelej nesushchej sposobnosti dlya stal'nykh elementov [Parameters of numerical models of bearing capacity for steel elements] *Stroitel'stvo I rekonstrukciya*. 2023. № 1(1). S. 43-56. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-43-56. (rus)
8. Nadol'skij V.V., Vihlyayev A.I. Ocenka nesushchej sposobnosti balok s gof-rirovannoj stenкой metodom konechnykh elementov pri dejstvii lokal'noj nagruzki [Assessment of the bearing capacity of beams with a corrugated wall by the finite element method under local load] *Vestnik MGSU*. 2022. T. 17. Vyp. 6. S. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.202. (rus)
9. Nadol'skij V.V., Podymako V.I. Ocenka nesushchej sposobnosti stal'noj balki metodom konechnykh elementov pri sovmestnom dejstvii lokal'nykh I sdvigovykh usilij [Assessment of the bearing capacity of a steel beam by the finite element method under the combined action of local and shear forces] *Stroitel'stvo I rekonstrukciya*. 2022. №2 (100). S.26-43. (rus)
10. Fieber A., Gardner L., Macorini L. Design of structural steel members by advanced inelastic analysis with strain limits . *Engineering Structures*. 2019. Vol. 199. Paper 109624. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109624.
11. Gardner L., Yun X., Fieber A., Macorini L. Steel design by advanced analysis: material modelling and strain limits . *Engineering*. 2019. Vol. 5. P. 243–249. DOI: 10.1016/j.eng.2018.11.026.
12. Chacon R., Serrat M., Real E. The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading . *Thin-Walled Struct*. 2012. Vol. 53. P. 15–25. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.12.003.
13. Lindner J., Kuhlmann U., Just A. Verification of flexural buckling according to EN 1993-1-1 using bow imperfections . *Steel Construction*. 2016. Vol. 9. P. 349-362. DOI:10.1002/stco.201600004.

14. Lindner J., Kuhlmann U., Jörg F. Initial bow imperfections e_0 for the verification of flexural buckling according to Eurocode 3 Part 1–1 – additional considerations . Steel Construction. 2018. Vol. 11. P. 30–41. DOI: 10.1002/stco.20170.
15. Walport F., Gardner L., Nethercot D.A. Equivalent bow imperfections for use in design by second order inelastic analysis . Structures. 2020. Vol. 26. P. 670–685. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.03.065.
16. Quan Ch., Walport F., Gardner L. Equivalent imperfections for the out-of-plane stability design of steel beams by second-order inelastic analysis . Engineering Structures. – 2021. Vol. 251. Paper 113481. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113481.
17. Nadol'skij V.V. Statisticheskie harakteristiki pogreshnosti chislennyh modelej nesushchej sposobnosti dlya stal'nyh elementov [Statistical characteristics of the error of numerical models of bearing capacity for steel elements] Stroitel'stvo I rekonstrukciya. 2023. №3 (107). C.17–34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34. (rus).
18. Radwan M., Kövesdi B. Local plate buckling type imperfections for NSS and HSS welded box-section columns . Structures. 2021. Vol. 34. P. 2628–2643. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.09.011.
19. Haffar Z.M., Kövesdi B., Ádány S. On the buckling of longitudinally stiffened plates, part 2: Eurocode-based design for plate-like behaviour of plates with closed-section stiffeners . Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 145. Paper 106395. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106395.
20. Kala Z. Geometrically non-linear finite element reliability analysis of steel plane frames with initial imperfections . Journal of Civil Engineering and Management. 2012. Vol. 18. P. 81–90. DOI: 10.3846/13923730.2012.655306.
21. Yang H., Liu S., Fang Z., Zhao J. Investigation of intermediate-height horizontal brace forces under horizontal and vertical loads including random initial imperfections . Buildings. 2023. Vol. 13. Paper 180. DOI: 10.3390.
22. Zhang H., Shayan S., Rasmussen K.J.R., Ellingwood B.R. System-based design of planar steel frames, I: Reliability framework . Journal of Constructional Steel Research. 2016. Vol. 123. P. 135–143. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.05.004.

Информация об авторе:

Надольский Виталий Валерьевич

УО «Брестский государственный технический университет» (БрГТУ), г. Брест, Республика Беларусь, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии строительного производства».

И доцент кафедры «Строительных конструкций», Белорусский национальный технический университет (БНТУ), г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: nadolskivv@mail.ru

Information about author:

Nadolski Vitali V.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,

candidate of technical science (PhD), docent, associated professor of the department of Building constructions, and Associate Professor of the Department of Building Structures, Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus

E-mail: nadolskivv@mail.ru