

В.В. НАДОЛЬСКИЙ<sup>1,2</sup><sup>1</sup>УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

## НЕСОВЕРШЕНСТВА ДЛЯ РАСЧЕТА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. ЧАСТЬ 1.

**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 учетом 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 расчету 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. NADOLSKI<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

## IMPERFECTIONS FOR THE CALCULATION OF STEEL STRUCTURES BY THE FINITE ELEMENT METHOD. PART 1.

**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

Хорошо известно, что несовершенства всегда присутствуют в элементах конструкций. Их амплитуда уменьшается при применении передовых технологий изготовления и монтажа стальных конструкций, однако полностью они не исключаются. Несовершенства могут существенно влиять на поведение и несущую способность стальных конструкций, особенно в случае задач, связанных с устойчивостью [1-10]. Поэтому несовершенства всегда должны учитываться в численной модели и их правильное приложение (задание формы и значения) является ключевым моментом в процессе численного анализа [5, 9, 10].

В качестве источников начальных несовершенств в стальных конструкциях обычно выделяют геометрические, структурные (остаточные напряжения) и конструкционные несовершенства. Геометрические несовершенства предназначены для представления геометрических отклонений реальной конструкции, элемента или сечения от идеальной/проектной геометрии. Структурные несовершенства, главным образом, включают в себя остаточные напряжения, однако в ряде случаев могут включать микродефекты, возникающие в результате технологии производства стальных элементов. Конструкционные несовершенства - это несоответствие граничных условий, непредвиденные и не предусмотренные проектом эксцентриситеты соединений, отклонений фундамента и т.д. Геометрические несовершенства и остаточные напряжения могут быть смоделированы как отдельные несовершенства или как эквивалентные несовершенства, которые охватывают влияние геометрических и структурных несовершенств [9, 10].

Влияние того или иного несовершенства может существенно отличаться для различных типов конструкций. Чувствительность к несовершенствам существенно отличается для конструкций стержневого, пластинчатого или оболочечного типа. Поэтому анализ влияния несовершенств имеет большое значение. 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. В последние десятилетия в отечественном научном пространстве уделяется мало внимания актуализации моделей несовершенств с учетом современных более точных технологий изготовления и монтажа стальных конструкций. Из последних наиболее значимых исследований следует отметить следующие отечественные работы [11-17], однако они были выполнены в 1970-1980 годах. В то же время в зарубежной литературе можно отметить значительную активность в этом вопросе, поэтому многие рекомендации, представленные ниже, основаны на обзоре зарубежной литературы. Статья состоит из двух частей. Первая часть посвящена вопросам изучения геометрических несовершенств, остаточных напряжений и правилам комбинации несовершенств, вторая часть статьи – эквивалентным несовершенствам.

Представлен аналитический обзор и анализ научной и технической литературы с последующим синтезом и выработкой рекомендаций по заданию форм и значений геометрических и структурных несовершенств и их комбинаций для расчета стальных конструкций методом конечных элементов.

## Форма и значение геометрических несовершенств

В общем случае форма и значение геометрических несовершенств зависят от вида конструкции, метода изготовления и монтажа. *Форма геометрических* несовершенств может быть задана на основании [8-10, 18]:

– измеренных форм несовершенств элемента конструкции, выполненных на конкретных элементах. Измеренные формы несовершенств, как правило, применяют для целей валидации численной модели, если исследуется конкретный образец, или для существующих конструкций. В этих случаях измеренные геометрические несовершенства

(как формы, так и значение) прикладывают вместе с остаточными напряжениями. Если целью расчета является прямая оценка несущей способности (сопротивления) или численное параметрическое исследование, измеренная форма несовершенства может быть применена, однако значение несовершенства должно быть заменено прогнозным значением с учетом статистической обработки или стандартизированным значением;

- предопределенных форм (функций), например, синусоидальной функцией или других тригонометрических функций;

- масштабированных форм упругой потери устойчивости (результат линейного упругого расчета на устойчивость (бифуркационного анализа)). Эти несовершенства определены на математической основе, а методика моделирования хорошо разъяснена и широко используется в практике проектирования [8-10]. В большинстве случаев используют первую форму потери устойчивости в качестве формы несовершенства. В литературе, например [2, 3], можно найти исследования, доказывающие, что приложение форм потери устойчивости как эквивалентных несовершенств со стандартизированными значениями обеспечивает безопасные значения несущей способности. Однако фактическая форма отказа конструкции может отличаться от первой формы потери устойчивости из-за значительных пластических деформаций и перераспределения нагрузки [8]. Поэтому важно сравнить форму приложенного начального несовершенства с полученной формой отказа. Если имеются большие различия (например, отказ другого отсека, другой зоны элемента или конструкции, а не нагруженный несовершенством), то следует также проверить и выбрать в качестве несовершенства вторую или более высокую форму потери устойчивости, в некоторых случаях и комбинацию форм. В некоторых программах автоматическое приложение масштабированной формы потери устойчивости как геометрического или эквивалентного несовершенства предлагается в качестве встроенного инструмента процесса проектирования, поэтому их применение в повседневном процессе проектирования может быть проще других способов задания несовершенств;

- формы отказа. Основой этого несовершенства является предварительный анализ формы отказа, которая записывается как начальная геометрия для последующего расчета. Этот способ задания формы несовершенства не является широко используемым и исследования по его применению продолжаются.

*Значение геометрических несовершенств* может быть назначено исходя из следующих соображений:

- фактически измеренные значения несовершенства [5, 6, 9, 10], как правило, только для частных случаев (существующая конструкция, серийное производство, исследуемый образец);

- равной 80% от допусков на изготовление и монтаж [2, 3, 5, 9, 10] – наиболее распространенный случай. Значение 80% соответствует приблизительно среднему значению геометрического несовершенства;

- максимальное значение допуска на изготовление и монтаж, в качестве доминирующей базисной переменной.

*Остаточные напряжения* возникают в процессе изготовления стальных элементов (прокатка стального листа, газовая резка, сварка). Они должны быть представлены начальными деформациями или напряжениями в модели в зависимости от применяемого программного обеспечения, обеспечивая равновесное напряженное состояние при расчете без приложения внешних нагрузок. С точки зрения численного моделирования, остаточные напряжения в основном разделяют на напряжения мембранного и изгибного типа.

Для сварных элементов остаточные напряжения мембранного типа являются определяющими. Максимальная амплитуда растягивающего напряжения ожидается вблизи зоны сварных швов, а максимальное сжимающее напряжение – между зонами сварных швов.

Несколько последних исследований показывают, что максимальное значение растягивающего остаточного напряжения в основном зависит от предела текучести материала. Однако максимальное значение сжимающих напряжений не зависит от марки стали, а зависит от геометрии балки (например, от соотношения ширины и толщины для сварных конструкций) [19]. Для сварных конструкций пиковое значение растягивающего остаточного напряжения может быть принято равным пределу текучести материала для марок стали от S235 до S700. Пиковое значение сжимающего остаточного напряжения зависит от процесса производства и геометрии поперечного сечения.

Для стальных холодноформованных элементов доминирующее влияние оказывают остаточные напряжения изгибного типа. В этом случае остаточные напряжения изменяются по толщине элемента. В схемах остаточных напряжений предполагается линейное изменение, однако хорошо известно, что реальное распределение имеет сильно нелинейный характер.

Влияние остаточных напряжений мембранного типа и изгибного типа на поведение и несущую способность стальных конструкций существенно отличается. Это также является причиной того, что для одинаковых геометрических параметров поперечного сечения при расчете несущей способности должны использоваться различные кривые потери устойчивости в зависимости от различных производственных процессов. Эту особенность также следует учитывать в численных расчетах.

В численной модели остаточные напряжения должны моделироваться самоуравновешенной схемой напряжений с использованием начальных напряжений/деформаций или путем приложения температурных нагрузок, оказывающих аналогичное воздействие. Обычно для получения численного равновесия в модели без приложения других нагрузок на конструкцию требуется шаг равновесия (первый шаг нагрузки). Если остаточные напряжения не самоуравновешены, то элементы будут деформированы, т.е. начальные геометрические несовершенства будут изменены остаточными напряжениями, что может изменить предельное значение несущей способности исследуемого элемента конструкции.

Схемы остаточных напряжений могут быть найдены в рекомендациях ECCS [20], а также в следующих исследованиях. В работе [21] исследовали различные колонны, изготовленные из марок стали S650 и S690. Полная исследовательская программа включала коробчатые, крестообразные и двутавровые сечения. Для всех проанализированных поперечных сечений были проведены измерения остаточных напряжений. В работе [22] исследовали остаточные напряжения на шести сварных элементах коробчатого сечения из высокопрочной стали (S460). Измерения продольных остаточных напряжений выполнены по всему поперечному сечению, включая зоны сварки. По результатам испытаний сделан вывод, что остаточное сжимающее напряжение существенно зависит от геометрии поперечного сечения (толщины стенки и отношения ширины к толщине). Кроме того, максимальные растягивающие остаточные напряжения в угловых зонах оказались меньше предела текучести и не было выявлено четкой корреляции между максимальным растягивающим напряжением и отношением ширины к толщине. В работе [23] также изучалось поведение колонн при потере устойчивости из стали S960. Перед испытаниями изучены остаточные напряжения на шести элементах коробчатого сечения. На основе измерений была разработана модель остаточных напряжений для материала S960, в которой остаточное растягивающее напряжение в зоне сварного шва назначено равным 690 МПа, а максимальное напряжение сжатия в середине пластины вычисляется с помощью уравнения. В работе [24] выполнили исследования остаточных напряжений для сварного и холодноформованного коробчатого сечения из стали S355. В работе [25] была проведена экспериментальная программа для количественного определения остаточных напряжений в профилях из нержавеющей стали. Полное распределение остаточных напряжений было

получено для трех горячекатаных уголков, восьми профилированных листов и семи холоднокатаных коробчатых профилей, в общей сложности было снято более 800 показаний. В горячекатаных профилях и профилированных листах остаточные напряжения обычно не превышают 20% от условного предела текучести, хотя для холоднокатаных коробчатых профилей остаточные мембранные напряжения были относительно низкими, а остаточные изгибные напряжения оказались от 40% до 70% от условного предела текучести.

Как видно из отмеченных исследований, значения и характер остаточных напряжений зависят от процесса изготовления стальных элементов. Поэтому новые, или инновационные, методы производства могут быть учтены при проектировании, однако это требует внедрения соответствующей модели остаточных напряжений, что практически невозможно сделать для формульных моделей несущей способности и с лёгкостью реализуется в численных моделях. В случае прямого определения несущей способности применяемая модель остаточных напряжений должна учитывать неопределенность остаточных напряжений. Поэтому применяемые схемы остаточных напряжений должны быть основаны на статистической оценке. Возможность использования моделей остаточных напряжений, основанных на лабораторных измерениях, не предназначена для ежедневной практики проектирования. Однако при наличии достаточной исследовательской базы, она позволяет корректировать модель несущей способности с использованием конкретных технологий производства. Это позволяет внедрять новые результаты исследований в стандартизированные процессы проектирования.

#### **Разделение несовершенств на группы**

Для систематизации исследований геометрические и эквивалентные несовершенства можно разделить на следующие *группы*:

- эквивалентные несовершенства строительной конструкции (каркаса, рамы), также используется термин – глобальные или общие несовершенства конструкции;
- эквивалентные несовершенства элементов, более редкий термин – локальные несовершенства конструкции;
- эквивалентные несовершенства поперечных сечений (частей сечения (пластин) или формы сечения) [2, 9, 10];
- эквивалентные несовершенства пластинчатых конструкций (обычно мостовые конструкции, состоящие из укрепленных или неукрепленных ребрами жесткости пластин), включают в себя несовершенства ребер жесткости и несовершенства пластин [2, 3];
- эквивалентные несовершенства оболочечных конструкций [18].

Данное разделение несовершенств на группы соответствует общепринятым стратегиям проверок на потерю устойчивости стальных конструкций:

- проверка глобальной устойчивости (потеря устойчивости каркаса);
- проверка устойчивости элементов (например, потеря устойчивости при сжатии, изгибе и т.д.);
- проверка потери устойчивости пластин (например, потеря устойчивости стенки и полок, формы сечения холодноформованных конструкций, потеря устойчивости укрепленных или неукрепленных ребрами жесткости пластинчатых конструкций), которая обычно относится к расчету несущей способности сечения по прочности;
- проверка потери устойчивости оболочечных конструкций.

Однако причина выделения групп несовершенств не только в том, чтобы разделить несовершенства по проблемам устойчивости или типам исследуемых конструкций, но и в том, чтобы установить правила комбинирования несовершенств. Правила комбинирования несовершенств используют вышеуказанные группы несовершенств так же, как правила комбинирования нагрузки используют различные случаи нагрузки.

### **Комбинации несовершенств**

Несовершенства следует задавать для каждой исследуемой проблемы устойчивости. Общее правило заключается в том, что проблемы устойчивости, для которых применяются соответствующие несовершенства, могут быть непосредственно проверены численной моделью, а все остальные проблемы устойчивости должны проверяться дополнительно (например, см. указания п.5.2.2(7) EN 1993-1-1). Если выполняется проверка различных форм потери устойчивости в рамках одной численной модели, следует применять формы несовершенств, относящиеся к каждой проблеме устойчивости, и комбинировать формы несовершенств.

Если геометрические несовершенства и остаточные напряжения независимо прикладываются в численной модели, то значения геометрических несовершенств для всех форм должны быть приняты по их номинальным значениям. В том числе это означает, что предельное значение несущей способности должно определяться с использованием комбинации несовершенств, в которой все геометрические несовершенства имеют полные значения.

Эквивалентные несовершенства содержат комбинированный эффект геометрических несовершенств и остаточных напряжений. Если несколько различных эквивалентных несовершенств применяются в одной численной модели для исследования взаимодействия форм потери устойчивости, то нельзя избежать дублирования эффекта остаточных напряжений, что может привести к консервативным значениям несущей способности, как это было доказано в работе [26]. Поэтому комбинации несовершенств, которые должны применяться для решения взаимодействия форм потери устойчивости, являются ключевым вопросом для точного расчета несущей способности при потере устойчивости. Однако в настоящее время не существует общепризнанного и экспериментально или научно обоснованного правила комбинирования несовершенств для анализа взаимодействия форм потери устойчивости (взаимодействие потери устойчивости конструкции, потери устойчивости элемента или потери устойчивости части/частей сечения), чтобы определить точные правила комбинирования несовершенств.

По этой причине в настоящее время ведутся исследования по изучению влияния различных правил комбинирования несовершенств и их более целесообразного применения. Для комбинирования несовершенств стальных конструкций (каркасов) самые последние исследования представлены в статье [27]. Исследование было выполнено для однопролетных, многоэтажных, многопролетных и неравномерных рамных конструкций из конструкционной стали или аустенитных нержавеющей сплавов, а также для разных значений гибкости элементов. Результаты расчетов показали, что для исследованных каркасов (рам) влияние направления несовершенств на предельную нагрузку невелико, и значительных различий не наблюдалось для простых, многоэтажных, многопролетных и нерегулярных рам. Результаты также показали, что использование линейной комбинации первых шести форм потери устойчивости с положительными амплитудами является простым и в то же время консервативным подходом к заданию геометрических несовершенств. Таким образом, вывод исследования заключается в том, что применяемый метод, использующий первые шесть форм потери устойчивости в качестве несовершенств, которые должны быть выбраны в качестве наихудшего сценария, обеспечивает минимальное значение несущей способности рамы. Однако данный подход выглядит применимым только для плоскостных задач.

Для сварных пластинчатых конструкций исследование комбинации несовершенств представлено в работах [28, 29], где сделан вывод, что для трапециевидных ребер жесткости всегда следует учитывать местные несовершенства. Пренебрежение местными несовершенствами формы ребер жесткости приводит к завышению жесткости пластин.

Для сварных колонн коробчатого сечения комбинации несовершенств, касающиеся изгибной формы потери устойчивости элемента и местной потери устойчивости пластин (частей) сечения, были исследованы в работе [30]. Исследование показало, что всегда безопаснее использовать полные значения как глобальных, так и локальных несовершенств, что приводит к снижению несущей способности в среднем на 3–4 % по сравнению с наиболее точным решением.

Обобщая результаты исследований [27 - 30], можно рекомендовать следующие варианты комбинаций несовершенств:

– консервативная линейная суперпозиция эквивалентных несовершенств, относящихся к различным группам (например, несовершенство рамы, несовершенство элемента или несовершенство сечения), т.е. каждое несовершенство следует брать с максимальной амплитудой и линейно суммировать. Это наиболее безопасное решение, соответствующее современному уровню знаний.

– линейная суперпозиция эквивалентных несовершенств и геометрических несовершенств, относящихся к различным группам. Например, амплитуда (значение) эквивалентного несовершенства элемента может быть уменьшена до значения геометрического несовершенства  $L/1000$  или до значения допуска на изготовления, в комбинации с эквивалентными несовершенствами формы сечения и/или частей сечения (местными).

– для комбинации несовершенств в пределах одной группы рекомендуется снижать значения несовершенств. Назначается доминирующее (ведущее) несовершенство со 100% значением, а сопутствующее несовершенство со значением, уменьшенным до 70%. Каждое несовершенство по очереди выбирается в качестве ведущего несовершенства, а остальные принимаются в качестве сопутствующих несовершенств. Это правило также может применяться для комбинаций одного типа несовершенства, если одно и то же несовершенство должно быть приложено к разным частям конструкции (или разных пластин сечения). Например, несовершенство местной потери устойчивости поперечного сечения может быть приложено как к стенке, так и к полкам, а их комбинация (в том числе в смысле направлений приложения) должна относиться к ситуации, приводящей к наименьшему значению несущей способности.

Формализовать варианты комбинаций несовершенств можно с помощью следующего выражения:

$$\sum H = \{H_{\text{экр},p,0} + \sum H_{\text{экр},p,i} \cdot 0.7\} + \{H_{\text{экр},эл,0} + \sum H_{\text{экр},эл,i} \cdot 0.7\} + \{H_{\text{экр},с,0} + \sum H_{\text{экр},с,i} \cdot 0.7\}, \quad (1)$$

где  $H_{\text{экр},p,0}$  – доминирующее эквивалентное несовершенство рамы;  $H_{\text{экр},p,i}$  – сопутствующее эквивалентное несовершенство рамы;  $H_{\text{экр},эл,0}$  – доминирующее эквивалентное несовершенство элемента;  $H_{\text{экр},эл,i}$  – сопутствующее эквивалентное несовершенство элемента;  $H_{\text{экр},с,0}$  – доминирующее эквивалентное несовершенство сечения;  $H_{\text{экр},с,i}$  – сопутствующее эквивалентное несовершенство сечения;

Каждое несовершенство обычно может быть приложено в двух направлениях, поэтому, если направление несовершенства, приводящее к наименьшему значению несущей способности, не очевидно, следует провести анализ с использованием несовершенств с различными направлениями и оценить их влияние на несущую способность. Исследуя влияние направлений несовершенств на предельное значение несущей способности, следует также проверить, является ли приложенное несовершенство физически возможным. Физически возможные формы несовершенств в первую очередь зависят от процесса изготовления конструкции. Поэтому необходимо знать технологию производства, чтобы избежать физически невозможных форм несовершенств. В противном случае рекомендуется исследовать все комбинации несовершенств.

### Выводы

На основании аналитического обзора технической литературы и нормативных документов применительно к исследованиям и нормированию несовершенств стальных конструкций можно сделать следующие выводы:

– исходя из природы источников начальных несовершенств в стальных конструкциях обычно выделяют следующие виды несовершенств: геометрические несовершенства, структурные (остаточные напряжения) несовершенства и конструкционные несовершенства;

– для задания форм и амплитуд геометрических и эквивалентных несовершенств не существует единых регламентированных подходов, однако существующие результаты исследований позволяют отразить существенные тенденции и зависимости для задания несовершенств в численных моделях. Форма геометрических несовершенств может быть задана на основании: измеренных форм, предопределенных форм (функций), масштабированных форм упругой потери устойчивости и форм отказа. Наиболее предпочтительным является задание форм на основании масштабированных форм упругой потери устойчивости. Значение геометрических несовершенств может быть назначено исходя из следующих соображений: фактически измеренное значение несовершенства, значение равное 80% от допусков на изготовление и монтаж, максимальное значение допуска на изготовление и монтаж. Амплитуда (значение) эквивалентного несовершенства может быть принята на основе предопределенных значений, которые определены на основании калибровки численных моделей по экспериментальным данным. В статье для каждой из групп эквивалентных несовершенств представлены результаты наиболее актуальных исследований;

– моделирование остаточных напряжений является наиболее неопределенным из-за зависимости от форм сечения и технологии изготовления, однако ряд исследований доказывает возможность учета остаточных напряжений посредством эквивалентных несовершенств;

– геометрические и эквивалентные несовершенства разделяют на группы, которые связаны с проверками устойчивости и с правилами комбинаций несовершенств: несовершенства строительной конструкции (каркаса), несовершенства элементов, несовершенства поперечных сечений, пластинчатых конструкций (включая ребер жесткости и несовершенства пластин), несовершенства оболочечных конструкций. В статье предложено несколько вариантов возможных комбинаций несовершенств с позиции форм, направлений и значений несовершенств в зависимости от рассматриваемых групп несовершенств.

В качестве дальнейших исследований большой интерес представляют калибровки значений эквивалентных несовершенств для частных случаев практического применения и с последующей регламентацией в нормативных документах.

### 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. Расчет и конструирование фланцевого соединения элементов прямоугольного сечения, подверженных центральному растяжению // *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2018. № 16. С. 121–130.
  8. 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.
  9. 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.
  10. 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.
  11. Кужава З. Статистическая оценка случайных неправильностей реальных центрально сжатых стержней // *Строительная механика и расчёт сооружений*. 1982. №5. с.61-62.
  12. Шапиро В.Д. Статистическое исследование начальных искривлений при заводском изготовлении стальных стропильных ферм // В кн.: *Проблемы надёжности в строительном проектировании*. Свердловск. 1972. С.268-273.
  13. Корчак М.Д. О влиянии начальных искривлений пояса на устойчивость решетчатого стержня // *Совершенствование и развитие норм проектирования стальных строительных конструкций: Сб. науч. тр. ЦНИИСКА им. Кучеренко*. Москва. 1981. С. 119 - 127.
  14. Броуде Б.М., Моисеев В.И. Устойчивость прямоугольных пластинок с упругим защемлением продольных сторон // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1982. № 1. с. 39 - 42.
  15. Белый Г.И., Стегачев П.Б. Пространственное деформирование несущая способность сжатых стержней стальных ферм, имеющих начальные геометрические несовершенства // *Металлические конструкции и испытание сооружений*. 1982. С. 66-75.
  16. Горев В.В., Путилин В.М. О несущей способности и деформативности сжатых сквозных стержней // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1976. № 3. С. 34 - 37.
  17. Грудев И.Д., Симон Н.Ю. Расчёт зон пластичности при сжатии первоначально искривлённого стержня // *Известия ВУЗов. Строительство и архитектура*. 1984. №7. С.27-30.
  18. Schmidt H. Stability of steel shell structures: General report // *Journal of Constructional Steel Research*. 2000. Vol. 55(1-3). P. 159-181.
  19. Somodi B., Kövesdi B. Residual stress measurements on welded square box-sections using steel grades of S235-S960 // *Thin-Walled Structures*. 2018. Vol. 123. P. 142-154. DOI: 10.1016/j.tws.2017.11.028..
  20. ECCS TC8, Ultimate limit state calculation of sway frames with rigid joints. Publication No. 33, 1984.
  21. Rasmussen K.J.R., Hancock G.J. Plate slenderness limits for high strength steel sections // *Journal of Constructional Steel Research*. 1992. Vol. 23. P. 73–96. DOI: 10.1016/0143-974X(92)90037-F.
  22. Ban H., Shi G., Shi Y., Wang Y. Overall buckling behavior of 460MPa high strength steel columns: Experimental investigation and design method // *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. Vol. 74. P. 140–150. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.0.
  23. Ban H., Shi G., Shi Y., Bradford M.A. Experimental investigation of the overall buckling behaviour of 960 MPa high strength steel columns // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 88. P. 256–266. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.05.015.
  24. Pavlovčič L., Froschmeier B., Kuhlmann U., Beg D. Finite element simulation of slender thin-walled box columns by implementing real initial conditions // *Advances in Engineering Software*. 2012. Vol. 44(1). P. 63–74. DOI: 10.1016/j.adv.
  25. Cruise R.B., Gardner L. Residual stress analysis of structural stainless steel sections // *Journal of Constructional Steel Research*. 2008. Vol. 64(3). P. 352–366. DOI: 10.1016/j.jcsr.2007.08.001.
  26. Degée H., Detzel A., Kuhlmann U. Interaction of global and local buckling in welded RHS compression members // *Journal of Constructional Steel Research*. 2008. Vol. 64(7-8). P. 755-766. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.01.032.
  27. Arrayago I., Rasmussen K.J.R. Influence of the imperfection direction on the ultimate response of steel frames in advanced analysis // *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 190. Paper 107137. Doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107.
  28. Timmers R. Influence of the imperfection shapes on the collapse mechanisms of stiffened plates with class 4 trapezoidal stiffeners // *Proceedings of the 8th International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures*, Lodz University of Technology, Poland, July 12-14, 2021. DOI:10.2139/ssrn.3867313.

29. Timmers R., Lener G. Collapse mechanisms and load–deflection curves of unstiffened and stiffened plated structures from bridge design // *Thin Walled Structures*. 2016. Vol. 106. P. 448–458. DOI: 10.1016/j.tws.2016.05.020.

30. Radwan M., Kövesdi B. Equivalent geometrical imperfections for local and global interaction buckling of welded square box section columns // *Structures*. 2023. Vol. 48. P. 1403–1419. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.01.045.

## 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. Raschet i konstruirovaniye flancevogo soedineniya elementov pryamougol'nogo secheniya, podverzhennykh central'nomu rastyazheniyu [Calculation and design of the flange connection of rectangular cross-section elements subject to central tension]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018. № 16. S. 121–130. (rus)
8. Nadol'skij V.V. Parametry chislennykh modeley 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)
9. Nadol'skij V. V., Vihlyaev 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)
10. 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)
11. Kuzhava Z. Statisticheskaya ocenka sluchajnykh nepravil'nostej real'nykh central'no szhatykh sterzhnej [Statistical evaluation of random irregularities of real centrally compressed rods]. *Stroitel'naya mekhanika i raschyot sooruzhenij*. 1982. №5. s.61–62. (rus)
12. SHapiro V.D. Statisticheskoe issledovanie nachal'nykh iskrivlenij pri zavodskom izgotovlenii stal'nykh stropil'nykh ferm [Statistical study of initial curvatures in the factory manufacture of steel trusses]. V kn.: *Problemy nadyozhnosti v stroitel'nom proektirovanii*. Sverdlovsk. 1972. S.268–273. (rus)
13. Korchak M.D. O vliyanii nachal'nykh iskrivlenij poyasa na ustojchivost' re-shetchatogo sterzhnya [On the effect of the initial curvature of the belt on the stability of the lattice rod] *Sovershenstvovanie i razvitie norm proektirovaniya stal'nykh stroitel'nykh konstrukcij*: Sb. nauch. tr. CNIISKA im. Kucherenko. Moskva. 1981. S. 119 - 127. (rus)
14. Broude B.M., Moiseev V.I. Ustojchivost' pryamougol'nykh plastinok s uprugim zashchemleniem prodol'nykh storon [Stability of rectangular plates with elastic clamping of longitudinal sides] *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 1982. № 1. s. 39 - 42. (rus)
15. Belyj G.I., Stegachev P.B. Prostranstvennoe deformirovanie nesushchaya spo-sobnost' szhatykh sterzhnej stal'nykh ferm, imeyushchih nachal'nye geometricheskie neso-vershenstva [Spatial deformation bearing capacity of compressed rods of steel trusses having initial geometric irregularities] *Metallicheskie konstrukcii i ispytanie sooruzhenij*. 1982. S. 66–75. (rus)
16. Gorev V.V., Putilin V.M. O nesushchej sposobnosti i deformativnosti szha-tykh skvoznykh sterzhnej [On the bearing capacity and deformability of compressed through rods] *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 1976. № 3. S. 34 - 37. (rus)

17. Grudev I.D., Simon N.YU. Raschyot zon plastichnosti pri szhatii pervona-chal'no iskrivlyonnogo sterzhnya [Calculation of plasticity zones under compression of a initially curved rod] *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo i arhitektura*. 1984. №7. S.27-30. (rus)
18. Schmidt H. Stability of steel shell structures: General report . *Journal of Constructional Steel Research*. 2000. Vol. 55(1-3). P. 159-181.
19. Somodi B., Kövesdi B. Residual stress measurements on welded square box-sections using steel grades of S235-S960 . *Thin-Walled Structures*. 2018. Vol. 123. P. 142-154. DOI: 10.1016/j.tws.2017.11.028.
20. ECCS TC8, Ultimate limit state calculation of sway frames with rigid joints. Publication No. 33, 1984.
21. Rasmussen K.J.R., Hancock G.J. Plate slenderness limits for high strength steel sections . *Journal of Constructional Steel Research*. 1992. Vol. 23. P. 73–96. DOI: 10.1016/0143-974X(92)90037-F.
22. Ban H., Shi G., Shi Y., Wang Y. Overall buckling behavior of 460MPa high strength steel columns: Experimental investigation and design method . *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. Vol. 74. P. 140–150. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.0.
23. Ban H., Shi G., Shi Y., Bradford M.A. Experimental investigation of the overall buckling behaviour of 960 MPa high strength steel columns . *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 88. P. 256–266. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.05.015.
24. Pavlovčič L., Froschmeier B., Kuhlmann U., Beg D. Finite element simulation of slender thin-walled box columns by implementing real initial conditions . *Advances in Engineering Software*. 2012. Vol. 44(1). P. 63–74. DOI: 10.1016/j.adv.
25. Cruise R.B., Gardner L. Residual stress analysis of structural stainless steel sections . *Journal of Constructional Steel Research*. 2008. Vol. 64(3). P. 352–366. DOI: 10.1016/j.jcsr.2007.08.001.
26. Degée H., Detzel A., Kuhlmann U. Interaction of global and local buckling in welded RHS compression members . *Journal of Constructional Steel Research*. 2008. Vol. 64(7-8). P. 755-766. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.01.032.
27. Arrayago I., Rasmussen K.J.R. Influence of the imperfection direction on the ultimate response of steel frames in advanced analysis . *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 190. Paper 107137. Doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107.
28. Timmers R. Influence of the imperfection shapes on the collapse mechanisms of stiffened plates with class 4 trapezoidal stiffeners . Proceedings of the 8th International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures, Lodz University of Technology, Poland, July 12. 14, 2021. DOI:10.2139/ssrn.3867313.
29. Timmers R., Lener G. Collapse mechanisms and load–deflection curves of unstiffened and stiffened plated structures from bridge design . *Thin Walled Structures*. 2016. Vol. 106. P. 448–458. DOI: 10.1016/j.tws.2016.05.020.
30. Radwan M., Kövesdi B. Equivalent geometrical imperfections for local and global interaction buckling of welded square box section columns . *Structures*. 2023. Vol. 48. P. 1403-1419. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.01.045.

#### 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: [nadolskiv@mail.ru](mailto:nadolskiv@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: [nadolskiv@mail.ru](mailto:nadolskiv@mail.ru)