

УДК 624.07

2.1.1 Строительные конструкции,
здания и сооружения (технические науки)

РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

RECOMMENDATIONS FOR MODELLING ELEMENTS FROM THIN-WALLED STEEL SECTIONS

Natalia D. Korsun, Daria A. Prostakishina
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Несмотря на очевидное увеличение темпов роста строительства с применением стальных тонкостенных профилей, основной нормативный документ, регламентирующий положения по проектированию и расчету данных конструкций, имеет ряд условностей и указывает на предпочтительность использования результатов экспериментальных исследований при проектировании. Проведение натурных испытаний, как правило, недоступно при рядовом проектировании, поэтому адекватной альтернативой является численное моделирование. Анализ существующей научной литературы позволяет сделать вывод о том, что у исследователей нет единого мнения касательно основных параметров моделей и алгоритма моделирования в целом, поэтому целью работы является разработка рекомендаций по моделированию тонкостенных элементов. Основываясь на результатах исследования для объекта из спаренного сигма-профиля, работающего в условиях осевой сжимающей силы, были предложены ключевые рекомендации для моделиро-

Abstract. Despite the increase in the growth rate of construction with the use of steel thin-walled sections, the building code for the design and calculation of these structures has a number of conventions and indicates the preferred use of the results of experimental studies in the design. Full-scale tests are generally not available during design, so numerical modelling is a correct alternative. The analysis of existing scientific literature shows that there is no consensus among researchers regarding the main parameters of the models and the modelling algorithm in general, so the aim of the paper is to develop recommendations for modelling thin-walled sections. The results of the study for object made from a coupled sigma profile under axial compressive force conditions let us develop key recommendations for modelling including the use of finite element type, finite element mesh parameters, the mechanism of application of boundary conditions, external loads and other model parameters. The results were verified by analytical methods of thin-walled

вания, включающие в себя: использование типа конечных элементов, параметры сетки конечных элементов, механизм приложения граничных условий, внешних нагрузок и другие параметры модели. Верификация результатов производилась аналитическими методами расчета тонкостенных профилей. Полученная сходимость результатов говорит о возможности применения данных рекомендаций при проектировании и расчете тонкостенных конструкций.

Ключевые слова: стальной тонкостенный профиль, моделирование стальных тонкостенных профилей

sections calculation. The obtained convergence of the results indicates the possibility of using these recommendations in the design and calculation of thin-walled structures.

Key words: thin-walled steel section, modelling of thin-walled steel sections

Для цитирования: Корсун, Н. Д. Рекомендации для моделирования элементов из стальных тонкостенных профилей / Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-1-35-44. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 1 (107). – С. 35–44.

For citation: Korsun, N. D., & Prostakishina, D. A. (2024). Recommendations for modelling elements from thin-walled steel sections. *Architecture, Construction, Transport*, (1(107)), pp. 35-44. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-1-35-44.

1. Введение

Активное применение элементов из стальных тонкостенных профилей в строительной индустрии обусловлено их малой материалоемкостью и высокой скоростью монтажа без использования тяжелой грузоподъемной техники.

Основные методы для расчета тонкостенных конструкций – метод эффективной ширины, реализованный в отечественной, европейской и североамериканской нормативной документации, а также прямой прочностной метод, реализованный как альтернативный метод расчета исключительно в североамериканских нормах, – не учитывают ряд факторов, существенно влия-

ющих на напряженно-деформированное состояние тонкостенных элементов. В соответствии с пунктами 5.2.2, 5.3.3, 7.7.1 СП 260.1325800.2016¹, допускается и является предпочтительной оценка НДС элемента на основании экспериментальных исследований, что является трудоемким и зачастую недоступным решением. Таким образом, альтернативой физическому эксперименту, позволяющей адекватно оценить работу элементов, является численное моделирование.

Численные эксперименты с разными подходами к моделированию рассмотрены в публикациях отечественных и зарубежных авторов. Комплекс основных положений расчетной мо-

¹ Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутого оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования (с Изменениями № 1, 2) = Cold-formed thin-walled steel profile and galvanized corrugated plate constructions. Design rules : СП 260.1325800.2016 : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 3 декабря 2016 г. № 881/пр : введен 2017-06-04. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456033922> (дата обращения: 05.02.2024).

дели, который анализировался авторами в представленных публикациях, включает в себя: типы конечных элементов (КЭ), применяемых для моделирования тонкостенного профиля; способ формирования сетки КЭ; способ моделирования работы материала; граничные условия; способ приложения внешнего воздействия к рассматриваемому элементу.

По результатам анализа применимости разных типов конечных элементов для моделирования тонкостенного профиля был сделан вывод о том, что единого мнения по использованию определенного типа КЭ нет. В публикациях [1, 2, 3] моделирование производилось с использованием КЭ тонкой и 3-узловой оболочек с 6 степенями свободы в каждом узле типа shell 181 и plate, в публикациях [4, 5, 6] применены аналогичные КЭ в других программных комплексах. Альтернативный вариант применения объемного КЭ использован в работе [7]. В публикациях наиболее авторитетных авторов в области анализа работы тонкостенных конструкций [8, 9] использован КЭ типа S9R5 – 9-узловая оболочка двойной кривизны с 5 степенями свободы в каждом узле.

При формировании сетки КЭ авторами используется автоматический способ разбиения, при котором контролируемым параметром является размер КЭ, при необходимости детального анализа какой-либо области поперечного сечения производится ручное сгущение сетки КЭ вблизи искомой области [2]. В публикации авторов [10] размер сетки задан 5×5 мм, что составляет: $h/16$, где h – высота поперечного сечения тонкостенного элемента; $5t - 7t$, где t – толщина стенки тонкостенного элемента.

Моделирование работы стали, как правило, выполняется исходя из экспериментальных данных, полученных на малых выборках стальных образцов с использованием мультилинейной [1, 8, 9] и билинейной [11] диаграмм работы материала. Наряду с данным подходом может быть использована диаграмма Прандтля [2, 12], однако стоит понимать, что учет физической нелинейности материала при данном подходе фактически невозможен. В публикации [12] физическая нелинейность учитывается за счет использования

слоистого типа материала, то есть с помощью представления оболочки как многослойного элемента с возможностью выключения каждого отдельного слоя из работы при достижении в нем соответствующих напряжений.

Граничные условия исследуемых элементов, как правило, приняты «условно шарнирными». Стоит отметить, что реализация шарнирной опоры в классическом ее представлении для оболочечного или объемного КЭ невозможна, поэтому ограничения накладываются на поступательные перемещения узлов [13, 14]. Альтернативным способом является объединение всех узловых точек поперечного сечения с созданием одного ведущего узла в центре тяжести, на который впоследствии накладываются граничные условия. Аналогичным образом может производиться и нагружение исследуемого объекта. Однако стоит понимать, что рассматриваемая ситуация является идеализированной, учет податливости и других конструктивных особенностей узлового соединения отсутствуют. При этом механически внешнее воздействие может быть задано как нагрузкой [15], так и перемещением. Выбор способа производится ситуативно, зависит от каждого частного случая и используемого решателя.

Решение задачи производится как в линейной, так и в нелинейной постановках. При нелинейном решении задачи способы поиска решения и применяемые методы разнятся, так, в публикации [13] наряду с использованием метода стабилизации описан arc-light-метод.

Исходя из изученного материала, был сделан вывод, что единого подхода и методики моделирования тонкостенных элементов не существует, при этом введение разного рода предпосылок может существенно повлиять на полученные результаты. Таким образом, целью данного исследования является разработка методики создания модели стальных тонкостенных элементов, отражающей реальную работу элемента в условиях действия продольной силы.

Задачи исследования предполагают обоснованный выбор с последующим включением в модель каждого из вышеперечисленных параметров; выполнение верификации результатов исследо-

вания с использованием метода эффективной ширины, реализованного в СП 260.1325800.2016 и Eurocode 3², а также прямого прочностного метода, реализованного в AISI S100³.

2. Материалы и методы

Выбор объекта исследования и его параметров обоснованы частотой применения представленного решения в составе каркасов из тонкостенных профилей.

В качестве объекта исследования принята стойка из тонкостенного спаренного сигма-профиля АРС ПС 300×80×2.5 по ТУ 1120-011-54108389-2014⁴ из стали 350 по ГОСТ Р 52246-2016⁵. Механические характеристики ста-

ли получены эмпирическим путем на основании большой выборки образцов. Высота объекта исследования составляет 4 500 мм. Профили включены в общую работу конструктивно соединительными планками с шагом 300 мм по высоте стойки. Стойка имеет раскрепления в плоскости наименьшей жесткости и шарнирное опирание оголовка и базы. Элемент работает в условиях действия продольной силы. Визуальное отображение объекта исследования представлено на рис. 1.

Численный расчет производился методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. Аналитические расчеты выполнялись методом эффективной

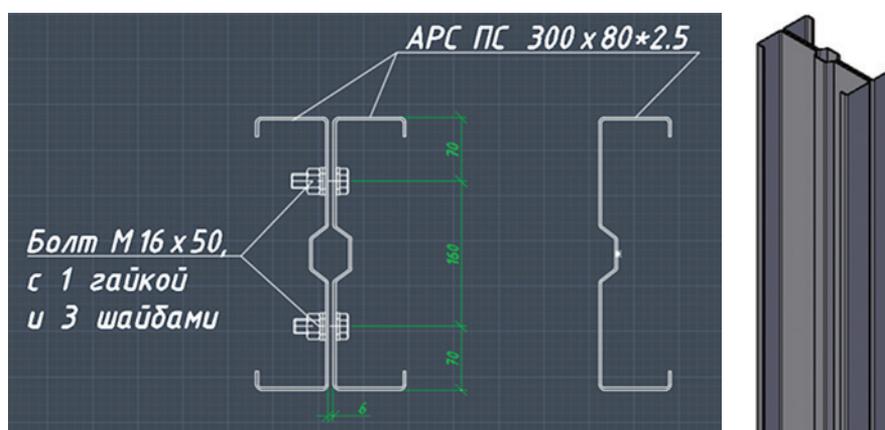


Рис. 1. Объект исследования
Fig. 1. Research object

² Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC] : EN 1993-1-1 (2005) (English) : Approved by CEN on 16 April 2004. – URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1993.1.1.2005.pdf> (date of the application: 06.02.2004). (In English). – Текст : электронный.

³ North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members : AISI S100 Standard : Approved in Canada by CSA Group. Endorsed in Mexico by CANACERO. Washington, DC, Publ. American Iron and Steel Institute, 2016, 34 p. – URL: <https://www.buildusingsteel.org/wp-content/uploads/2023/06/AISI-S100-16-2020.pdf> (date of the application: 06.02.2024). – Текст : электронный.

⁴ ТУ 1120-011-54108389-2014 Профили стальные гнутые несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений. Технические условия. – Тюмень : ООО ПФ «АРС-Пром», 2014. – Текст : непосредственный.

⁵ ГОСТ Р 52246-2016 Прокат листовой горячеоцинкованный. Технические условия = Hot-dip zinc-coated steel sheet. Specifications : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 сентября 2016 г. № 1101-ст : введен 2017-07-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200139182> (дата обращения: 05.02.2024).

ширины и прямым прочностным методом. Редуцированные характеристики сечения для метода эффективной ширины определялись из предпосылки о том, что напряжения в сжатых зонах сечения составляют R_y . Прямой прочностной метод применялся в сочетании с методом конечных полюс [8, 9, 16].

3. Результаты и обсуждение

Численный эксперимент

Для определения типа КЭ, наиболее применимого к анализу работы тонкостенного элемента, решалась тестовая задача на образце, аналогичном объекту исследования. Варьируемым параметром являлся тип КЭ: в первом случае модель выполнялась объемными КЭ типа *solid*; во втором – оболочечными КЭ типа *shell*. Контролируемыми параметрами для данной задачи являлись точность полученных результатов и время, затраченное на решение данной задачи. По результатам решения был сделан вывод, что оболочечный КЭ типа *shell* обеспечивает необходимую точность решения, разница в полученных результатах составила порядка 3 %, при этом время, затраченное на решение задачи, существенно снижается.

Для определения оптимальных параметров сетки КЭ также решался ряд задач. Варьируемым параметром являлся размер КЭ исходя из условия 4-узлового КЭ. Контролируемыми параметрами являлись точность полученных результатов и время, затраченное на решение данной задачи. По результатам решения был сделан вывод, что размеры сетки КЭ, при котором ее параметры не влияют на точность полученных результатов, находятся в интервале от 10 до 20 мм, что соответствует: $h/30 - h/15$, где h – высота поперечного сечения тонкостенного элемента; $4t - 5t$, где t – толщина стенки тонкостенного элемента.

Очевидно, что концепция работы стальных тонкостенных конструкций подразумевает за критическую стадию, поэтому в качестве модели, описывающей работу материала, принята билинейная модель, для которой характерно, помимо традиционного модуля упругости, использование дополнительного – касательного модуля

упругости. То есть данная модель представляет собой модифицированную модель Прандтля, позволяющую исследовать работу элемента в за критической стадии.

Граничные условия и нагружение элемента производилось с помощью объединения всех узловых точек поперечного сечения с созданием одного ведущего узла в центре тяжести в базе и оголовке стойки. В данном случае были созданы следующие предпосылки: податливость узловых соединений не учитывается, а сечение, к которому прикладывается граничное условие, – нагрузка, работает жестко и не деформируется. Непосредственно само шарнирное закрепление моделировалось наложением запретов всех линейных перемещений ведущих узлов оголовка и базы стойки. Механизм моделирования раскрепления по длине стойки не включал в себя создание ведущего узла, граничные условия накладывались непосредственно на само поперечное сечение. Нагрузка прикладывалась в ведущий узел оголовка как сосредоточенная сила на этапе линейного расчета, как сосредоточенное перемещение на этапе нелинейного расчета.

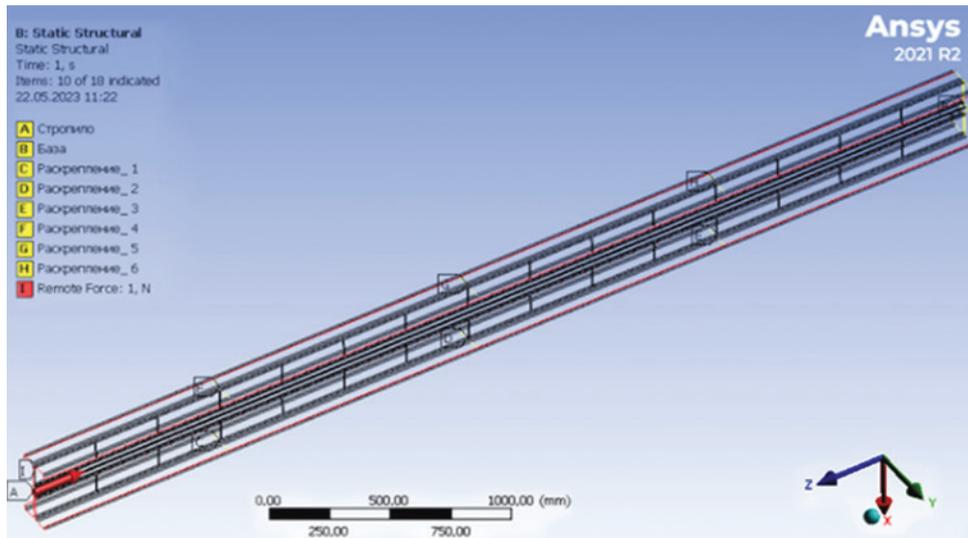
Ввиду того, что работа узловых соединений не являлась предметом исследования, соединительные планки были заменены имитирующими отрезками с контактными поверхностями.

Визуальное отображение модели и ее граничных условий представлено на рис. 2а, схема и параметры контактных поверхностей – на рис. 2б.

Также необходимо отметить, что такие факторы, как начальные геометрические несовершенства и неравномерное распределение свойств стали по сечению профиля, в данной публикации не рассматривались. При этом «дерево проекта» модели соответствовало классическому варианту для учета начальных геометрических несовершенств профилей, позволяющему при необходимости учитывать начальные искривления в соответствии с формами потери устойчивости. «Дерево проекта» модели представлено на рис. 3.

Контролируемым параметром для эксперимента являлась нагрузка, соответствующая потере несущей способности элемента.

a)



b)

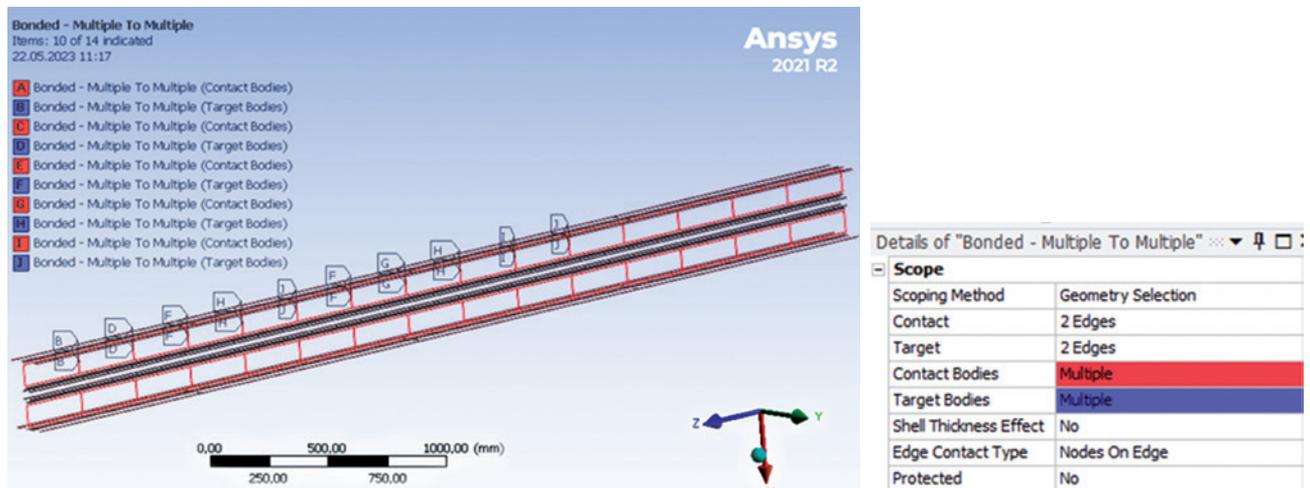


Рис. 2. Визуальное отображение модели: а) граничные условия модели; б) контактные поверхности и параметры контактных поверхностей
 Fig. 2. Visual image of the model: a) model boundary conditions; б) contact surfaces and contact surface parameters

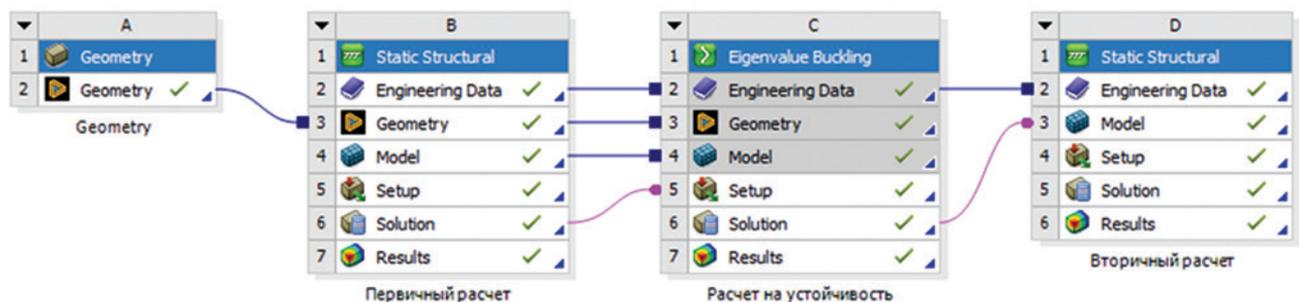


Рис. 3. «Дерево проекта» модели
 Fig. 3. "Project Tree" of the model

Аналитический расчет

Аналитический расчет методом эффективной ширины производился согласно стандартным положениям СП 260.1325800.2016 и Eurocode 3 на редуцированные характеристики, соответствующие напряжению в сжатой зоне сечения, равному R_y . Схема эффективного сечения приведена на рис. 4. По результатам расчета несущая способность элемента составила 61 тс.

Аналитический расчет прямым прочностным методом производился согласно стандартным положениям AISI S100–2016, регламентирующим определение несущей способности через определение напряжений при характерных формах потери устойчивости элемента. По результатам расчета несущая способность объекта исследования составила 61.1 тс.

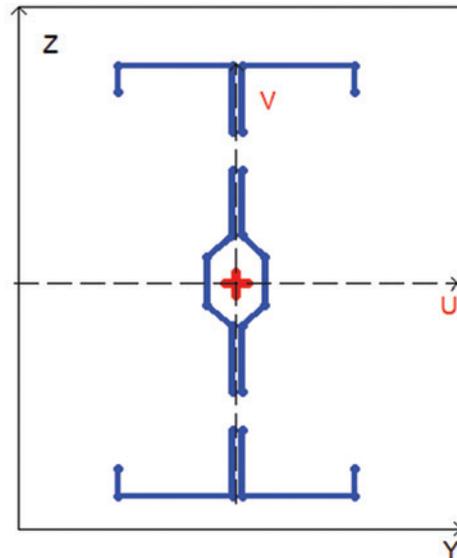


Рис. 4. Схема эффективного сечения элемента
Fig. 4. Scheme of the effective cross-section of the element

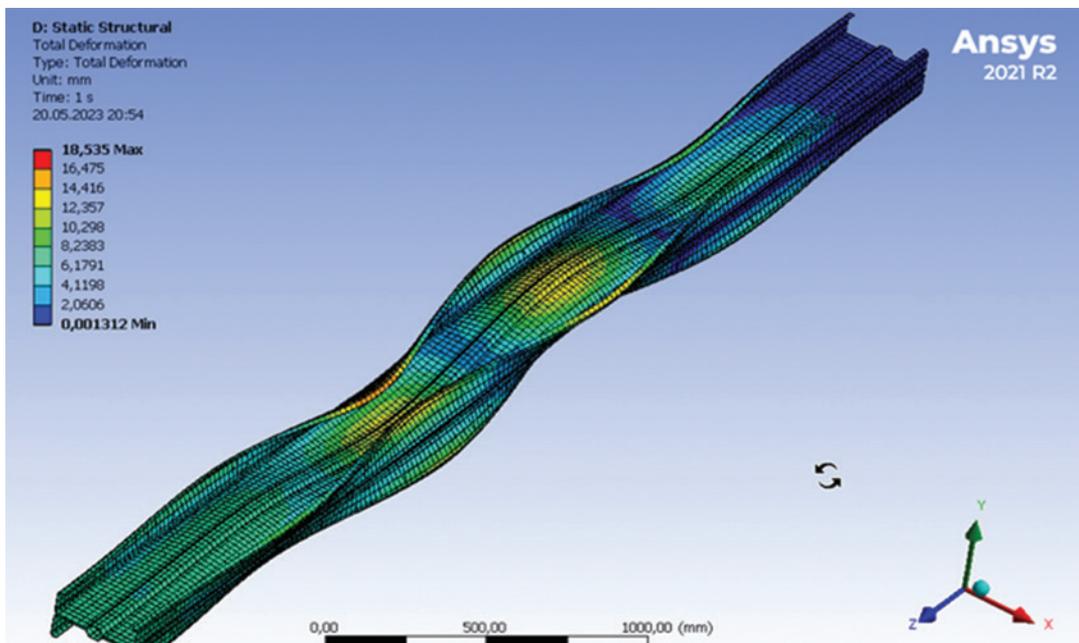


Рис. 5. Деформированная схема образца
Fig. 5. Deformed scheme of the sample

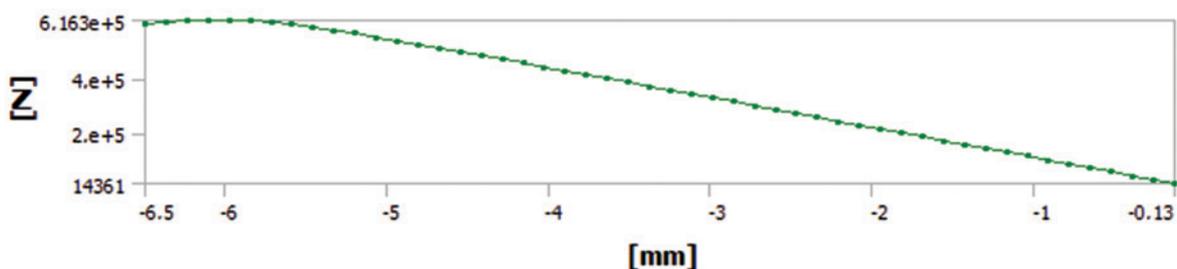


Рис. 6. График зависимости «Перемещение – реакция опоры»
Fig. 6. Diagram of the "Displacement - bearing reaction" dependence

Результаты численного моделирования

По результатам численного исследования была получена деформированная картина образца (рис. 5), а также реакция опоры ведущего узла базы колонны (рис. 6).

Максимальные деформации образца составили 18 мм. Исходя из графика на рис. 6 видно, что образец переходит в нелинейную зону работы при нагрузке, равной 61.16 тс.

4. Заключение

В результате исследования была получена численная модель тонкостенного образца, работающего в условиях продольной осевой силы. Полученные результаты численного моделирования достаточно точно согласуются с результатами расчета, полученными двумя независимыми аналитическими методами. Поэтому основные общие параметры модели можно рекомендовать для численного расчета стальных тонкостенных элементов:

- 1) использовать 4-узловые оболочечные КЭ с 6 степенями свободы в каждом узле;
- 2) размеры сетки КЭ находятся в интервале $h/30 - h/15$, где h – высота поперечного сечения тонкостенного элемента; $4t - 5t$, где t – толщина стенки тонкостенного элемента;
- 3) в качестве нелинейного материала достаточно использовать билинейную модель;
- 4) граничные условия и нагрузки накладывают на ведущие узлы поперечных сечений оголовка и базы элемента, при этом искомые поперечные сечения являются жесткими и не деформируются;

5) нагружение может быть выполнено как сосредоточенной силой, так и сосредоточенным перемещением, однако для простоты чтения результатов второй способ является более предпочтительным;

6) при наличии конструктивных соединительных элементов по высоте стойки их включение в модель не является целесообразным с точки зрения трудоемкости расчета, поэтому рекомендуется заменить элементы имитирующими отрезками с контактными поверхностями;

7) расчет производить с учетом физической нелинейности материала и геометрической нелинейности;

8) учет начальных геометрических несовершенств при отсутствии данных допустимо выполнять по формам потери устойчивости, путем введения масштабного множителя к деформируемой схеме.

Также хочется отметить, что, по мнению авторов, оптимальным способом для анализа за критической работы элемента, вплоть до механизма его разрушения, является использование метода стабилизации. Механизм стабилизации заключается в том, что при нагрузке, для которой невозможно найти решение ввиду нелинейной работы, к узлам модели прикладываются стабилизационные силы. Численным эквивалентом данных сил является коэффициент стабилизации. При этом важно использовать данные силы только в итерациях с отсутствующим решением и существенно малого значения, порядок которого 10^{-5} .

Библиографический список

1. Косых, П. А. Сравнение несущей способности легких стальных тонкостенных профилей различной конфигурации на основе компьютерного моделирования / П. А. Косых. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 2 (49). – С. 135–143.
2. Назмеева, Т. В. Несущая способность сжатых стальных тонкостенных элементов сплошного и перфорированного сечения из холодногнутого С-профиля / Т. В. Назмеева. – DOI 10.5862/MCE.40.5. – Текст : непосредственный // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 5 (40). – С. 44–51.
3. Имитационное моделирование напряженно-деформированного состояния тонколистового профилированного элемента с двойным гофрированием / А. В. Подзоров, В. В. Зверев, Н. Ю. Тезиков [и др.]. – Текст : непосредственный // Наука и бизнес: пути развития. – 2015. – № 5 (47). – С. 103–105.
4. Numerical investigation of CFS beam-columns with and without perforations / V. Zivaljevic, D. Kovacevic, D. Jovanović, D. Ladjinovic. – Текст : непосредственный // Conference: Association of Structural Engineers of Serbia – SYMPOSIUM 2020. – 2021. – P. 394–403.

5. Selection of the initial geometrical imperfection in nonlinear FE analysis of cold-formed steel rack columns / J. Bonada, M. Casafont, F. Roure, M. M. Pastor-Artigues. – DOI 10.1016/j.tws.2011.10.003. – Текст : непосредственный // *Thin-Walled Structures*. – 2011. – Vol. 51. – P. 99–111.
6. Computational modelling of geometric imperfections and buckling strength of cold-formed steel / Z. Sadovský, J. Kriváček, V. Ivančo, A. Ďuricová. – DOI 10.1016/j.jcsr.2012.06.005. – Текст : непосредственный // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2012. – Vol. 78, No. 6. – P. 1–7.
7. Кузнецов, И. Л. Исследование напряженно-деформированного состояния болтового узла соединения из холодногнутых тонкостенных профилей / И. Л. Кузнецов, М. А. Салахутдинов, Р. Г. Гайнетдинов. – DOI 10.22227/1997-0935.2019.7.831-843. – Текст : непосредственный // *Вестник МГСУ*. – 2019. – Т. 14, № 7. – С. 831–843.
8. Geometric imperfections in CFS structural members: Part I: A review of the basics and some modeling strategies / S. Farzarian, A. Louhghalam, B. Schafer, M. Tootkaboni. – DOI 10.1016/j.tws.2023.110619. – Текст : непосредственный // *Thin-Walled Structures*. – 2023. – Vol. 186, No. 6. – P. 1–12.
9. Geometric imperfections in CFS structural members, Part II: Data-driven modeling and probabilistic validation / S. Farzarian, A. Louhghalam, B. Schafer, M. Tootkaboni. – DOI 10.1016/j.tws.2023.110620. – Текст : непосредственный // *Thin-Walled Structures*. – 2023. – Vol. 185, No. 6. – P. 1–10.
10. Guo, Ya. Distortional buckling behavior and design method of cold-formed steel lipped channel with rectangular holes under axial compression / Ya. Guo, X. Yao. – DOI 10.3934/mbe.2021312. – Текст : непосредственный // *Mathematical Biosciences and Engineering*. – 2021. – Vol. 18, No. 5. – P. 6239–6261.
11. Gendy, Bassem L. Effect of geometric imperfection on the ultimate moment capacity of cold-formed sigma-shape section / Bassem L. Gendy, M. T. Hanna. – DOI 10.1016/j.hbrj.2015.04.006. – Текст : непосредственный // *HBRC Journal*. – 2017. – Vol. 13. – P. 163–170.
12. Korsun, N. Modeling thin-walled elements with regard to steel hardening / N. Korsun, D. Prostakishina. – DOI 10.1051/e3sconf/202126302044. – Текст : непосредственный // *E3S Web of Conferences* : 24, Moscow, 22–24 April, 2021. – Moscow, 2021. – Vol. 263.
13. Imperfection amplitudes for nonlinear analysis of open thin-walled steel cross-sections used in rack column uprights / M. M. Pastor-Artigues, M. Casafont, J. Bonada, F. Roure – DOI 10.1016/j.tws.2013.10.025. – Текст : непосредственный // *Thin-Walled Structures*. – 2014. – Vol. 76. – P. 28–41.
14. An analytical solution of distortional buckling resistance of cold-formed steel channel-section beams with web openings / N. Yu, B. Kim, W. Yuan [et al.]. – DOI 10.1016/j.tws.2018.11.012. – Текст : непосредственный // *Thin-Walled Structures*. – 2019. – Vol. 135. – P. 446–452.
15. Корсун, Н. Д. Моделирование и учет зон упрочнения стальных тонкостенных профилей в ПК ANSYS / Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина. – DOI 10.31660/2782-232X-2021-4-44-51. – Текст : непосредственный // *Архитектура, строительство, транспорт*. – 2021. – № 4 (98). – С. 44–51.
16. Zeinoddini, V. M. Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach / V. M. Zeinoddini, B. W. Schafer. – DOI 10.1016/j.tws.2012.07.001. – Текст : непосредственный // *Thin-Walled Structures*. – 2012. – Vol. 60 (3). – P. 105–117.

References

1. Kosih, P. A. (2015). Computer simulation of bearing capacity of light-weight steel slender sections of different configuration. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Journal of Construction and Architecture]*, (2(49)), pp. 135-143. (In Russian).
2. Nazmeeva, T. V. (2013). Bearing capacity of compressed continuous and perforated thin-walled steel members of C-shaped cold-formed profiles. *Magazine of Civil Engineering*, (5(40)), pp. 44–51. (In Russian).
3. Podzorov, A. V., Zverev, V. V., Tezikov, N. Yu., Karmanov, I. V., & Zhidkov, K. E. (2015). Modeling of stress-strain state of a thin-sheet profile element with double corrugation. *Science and Business: Ways of Development*, (5(47)), pp. 103-105. (In Russian).
4. Zivaljevic, V., Kovacevic, D., Jovanović, D., & Ladjinovic, D. (2021). Numerical investigation of CFS beam-columns with and without perforations. *Conference: Association of Structural Engineers of Serbia - SYMPOSIUM 2020*, pp. 394-403. (In English).
5. Bonada, J., Casafont, M., Roure, F., & Pastor-Artigues, M. M. (2011). Selection of the initial geometrical imperfection in nonlinear FE analysis of cold-formed steel rack columns. *Thin-Walled Structures*, 51, pp. 99-111. (In English). DOI 10.1016/j.tws.2011.10.003.

6. Sadovský, Z., Kriváček, J., Ivančo, V., & Ďuricová, A. (2012). Computational modelling of geometric imperfections and buckling strength of cold-formed steel. *Journal of Constructional Steel Research*, 78(6), pp. 1-7. (In English). DOI 10.1016/j.jcsr.2012.06.005.
7. Kuznetsov, I. L., Salakhutdinov, M. A., & Gainetdinov, R. G. (2019). Investigation of the stress-deformation state of a bolt-joint assembly of cold-bent thin-walled profiles. *Vestnik MGSU*, 14(7), pp. 831-843. (In Russian). DOI 10.22227/1997-0935.2019.7.831-843.
8. Farzanian, S., Louhghalam, A., Schafer, B., & Tootkaboni, M. (2023). Geometric imperfections in CFS structural members: Part I: A review of the basics and some modeling strategies. *Thin-Walled Structures*, 186(6), pp. 1-12. (In English). DOI 10.1016/j.tws.2023.110619.
9. Farzanian, S., Louhghalam, A., Schafer, B., & Tootkaboni, M. (2023). Geometric imperfections in CFS structural members, Part II: Data-driven modeling and probabilistic validation. *Thin-Walled Structures*, 185(6), pp. 1-10. (In English). DOI 10.1016/j.tws.2023.110620.
10. Guo, Y., & Yao, X. (2021). Distortional buckling behavior and design method of cold-formed steel lipped channel with rectangular holes under axial compression. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 18(5), pp. 6239-6261. (In English). DOI 10.3934/mbe.2021312.
11. Gendy, Bassem L., & Hanna, M. T. (2017). Effect of geometric imperfection on the ultimate moment capacity of cold-formed sigma-shape section. *HBRC Journal*, 13, pp.163-170. (In English). DOI 10.1016/j.hbrj.2015.04.006.
12. Korsun, N., & Prostackishina, D. (2021). Modeling thin-walled elements with regard to steel hardening. *E3S Web of Conferences : 24, Moscow, 22-24 April, 2021*, 263, pp. 1-9. (In English). DOI 10.1051/e3sconf/202126302044.
13. Pastor-Artigues, M. M., Casafont, M., Bonada, J., & Roure, F. (2014). Imperfection amplitudes for nonlinear analysis of open thin-walled steel cross-sections used in rack column uprights. *Thin-Walled Structures*, 76, pp. 28-41. (In English). DOI 10.1016/j.tws.2013.10.025.
14. Yu, N., Kim, B., Yuan, W., Li, L., & Yu, F. (2019). An analytical solution of distortional buckling resistance of cold-formed steel channel-section beams with web openings. *Thin-Walled Structures*, 135, pp. 446-452. (In English). DOI 10.1016/j.tws.2018.11.012.
15. Korsun, N. D., & Prostackishina, D. A. (2021). Modeling and accounting of strengthening zones of thin-walled steel profiles in ANSYS. *Architecture, construction, transport*, (4(98)), pp. 44-51. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2021-4-44-51.
16. Zeinoddini, V. M., & Schafer, B. W. (2012). Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach. *Thin-Walled Structures*, 60(3), pp. 105-117. (In English). DOI 10.1016/j.tws.2012.07.001.

Сведения об авторах

Корсун Наталья Дмитриевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: korsunnd@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-1796-2615

Простакишина Дарья Анатольевна, старший преподаватель кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: prostakishinada@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-6022-1775

Information about the authors

Natalya D. Korsun, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: korsunnd@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-1796-2615

Darya A. Prostakishina, Senior Lecturer at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: prostakishinada@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-6022-1775