

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УЧЕТ ЗОН УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ В ПК ANSYS

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

MODELING AND ACCOUNTING OF STRENGTHENING ZONES OF THIN-WALLED STEEL PROFILES IN ANSYS

Natalya D. Korsun, Darya A. Prostakishina
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. В статье описан процесс и отражены результаты моделирования стального тонкостенного сигма-профиля, работающего в условиях осевого сжатия в ПК ANSYS. Моделирование выполнено с учетом зон упрочнения стали по сечению профиля. Приведен анализ полученных результатов, выполнено их сравнение с результатами, полученными в ПК STARK.

Abstract. The article describes the process and reflects the results of modeling a steel thin-walled sigma profile operating under axial compression in the ANSYS software. Modeling is carried out taking into account the zones of hardening of steel along the profile section. The results are analyzed and compared with the results obtained in STARK.

Ключевые слова: стальные тонкостенные профили, упрочнение стали, легкие стальные тонкостенные конструкции, холодногнутый профиль

Key words: thin-walled steel profiles, steel hardening, lightweight thin-walled steel structures, cold-formed profile

Введение

Применение тонкостенных профилей в стальном строительстве является одним из наиболее актуальных и экономичных решений в связи с их малой металлоемкостью, энергоэффективностью производства, а также отсутстви-

ем необходимости применения большой грузоподъемной техники на площадке строительства [1]. В России данная технология получила свое развитие только в конце XX века [2], конструкции стали применять при строительстве ангаров и зданий складского назначения, а также более

крупных объектов [3]. За последние шесть лет объем их использования вырос в четыре раза [4]. Однако более широкому применению мешает несовершенство методики расчета элементов, в частности, это относится к учету упрочнения стали в местахгиба профиля и к учету начальных геометрических несовершенств.

Тонкостенными называют профили, полученные из листового проката толщиной менее 4 мм путем холодногогиба. Проектирование элементов из тонкостенных профилей не может осуществляться по СП 16.13330.2017 именно ввиду того, что толщина металла составляет менее 4 мм. В июне 2017 года вступил в силу СП 260.1325800.2016, представляющий собой адаптированный перевод Еврокода EN 1993-1-3, который предполагает большое количество экспериментов, что неприемлемо для российской системы строительного проектирования.

Упрочнение стали в местахгиба холодногнутого тонкостенного профиля связано с деформацией металла, перемещением и образованием новых дислокаций – дефектов кристаллической решетки. При уплотнении решетки, росте взаимодействия дислокаций уменьшается их подвижность и, как следствие, увеличивается прочность металла.

Следует отметить, что увеличение прочности приводит к снижению пластичности. Из-за холодной обработки изотропного в целом металла формируется направленность микроструктуры и изменяются его свойства в зонегиба с изотропных на анизотропные. В связи с этим при высоком уровне растягивающих напряжений высок риск хрупкого разрушения.

Еще одной особенностью работы тонкостенных профилей является высокая гибкость элементов сечения (стенок, полок). Для элементов из тонкостенных профилей при сжимающих напряжениях несущая способность обеспечивается не полным сечением, а только эффективной его частью, под которой подразумевается часть сечения, не потерявшая устойчивости при местном деформировании и деформировании формы сечения.

Сводом правил 260.1325800.2016 допускается использовать в расчетах изменчивость меха-

нических свойств стали, выделять зоны упрочнения, сопротивления стали задавать на основании экспериментальных данных, предполагающих большое количество опытов. Однако пояснения по поводу учета зон упрочнения в инженерном расчете отсутствуют.

Глобальной целью данного исследования является уточнение методики расчета с учетом неравномерного распределения механических свойств стали по сечению профиля, а также начальных геометрических несовершенств элементов. Для достижения указанной цели авторами поставлены и решены следующие задачи.

1. На основании изученных трудов [5–9] были проведены экспериментальные исследования на крупномасштабных выборках образцов. Серии испытаний прочности стали разрушающими и неразрушающими методами позволили подтвердить наличие зон упрочнения металла в местах холодногогиба в сечении профиля [10]. Выделено четыре зоны: 1) местагиба под прямым углом, коэффициент упрочнения (далее по тексту – k) = 1,32; 2) местагиба под тупым углом, $k = 1,27$; 3) плоские участки, прилегающие к местамгиба, $k = 1,17$; 4) средние зоны плоских участков $k = 1,04$.
2. Решена тестовая задача и проведен анализ учета влияния зон упрочнения стали в модели тонкостенного элемента в прикладном программном комплексе STARK. Полученные результаты показали улучшение работы профиля на сжатие: закритическая работа наступает позже, стержень ведет себя более устойчиво, деформации снижены более чем в три раза [11].

На данном этапе исследования перед авторами стоит задача моделирования условий дальнейшего лабораторного эксперимента по испытанию стоек на сжатие с учетом контролируемых параметров зон упрочнения, начальных несовершенств, НДС на этапах нагружения до разрушающей нагрузки.

Задача решается средствами ПК ANSYS. Использование данного программного комплекса обосновано реализованной в программе физической моделью материала, а также дальнейшим

развитием исследования с учетом начальных геометрических несовершенств профиля. В отличие от прикладных программных комплексов, где в качестве диаграммы стали реализована диаграмма Прандтля, ПК ANSYS реализует в себе билинейную и мультилинейную модели материала, что позволяет описать работу стали в закритической области и получить результаты численного эксперимента, наиболее полно отражающие реальную работу физического образца вплоть до разрушения.

Объект и методы исследования

В качестве объекта исследования принят образец одиночного тонкостенного сигма-профиля высотой сечения 300 мм и толщиной листа 2,5 мм (рис. 1а). Материал образцов – сталь 350 по ГОСТ Р 52246-2016.

Образец длиной 4,5 м закреплен в опорной зоне и в оголовке шарнирно с запретом линей-

ных перемещений. Элемент работает в условиях осевого сжатия. Величина нагрузки принималась исходя из решения задачи устойчивости и полученной критической нагрузки для первой формы 25,5 тс. Для анализа закритической работы профиля была принята нагрузка 32,0 тс. Расчетная схема образца представлена на рис. 1б. Зоны упрочнения стали по сечению профиля, принятые при моделировании, представлены на рис. 1в.

Экспериментальная часть

Численное моделирование производилось в ПК ANSYS. Первым этапом построения модели задавалась геометрическая схема объекта с использованием модуля SpaceClaim. Элемент формировался путем выдавливания твердого тела с заданным эскизом сечения, соответствующим реальной геометрии профиля, без упрощений (рис. 2).

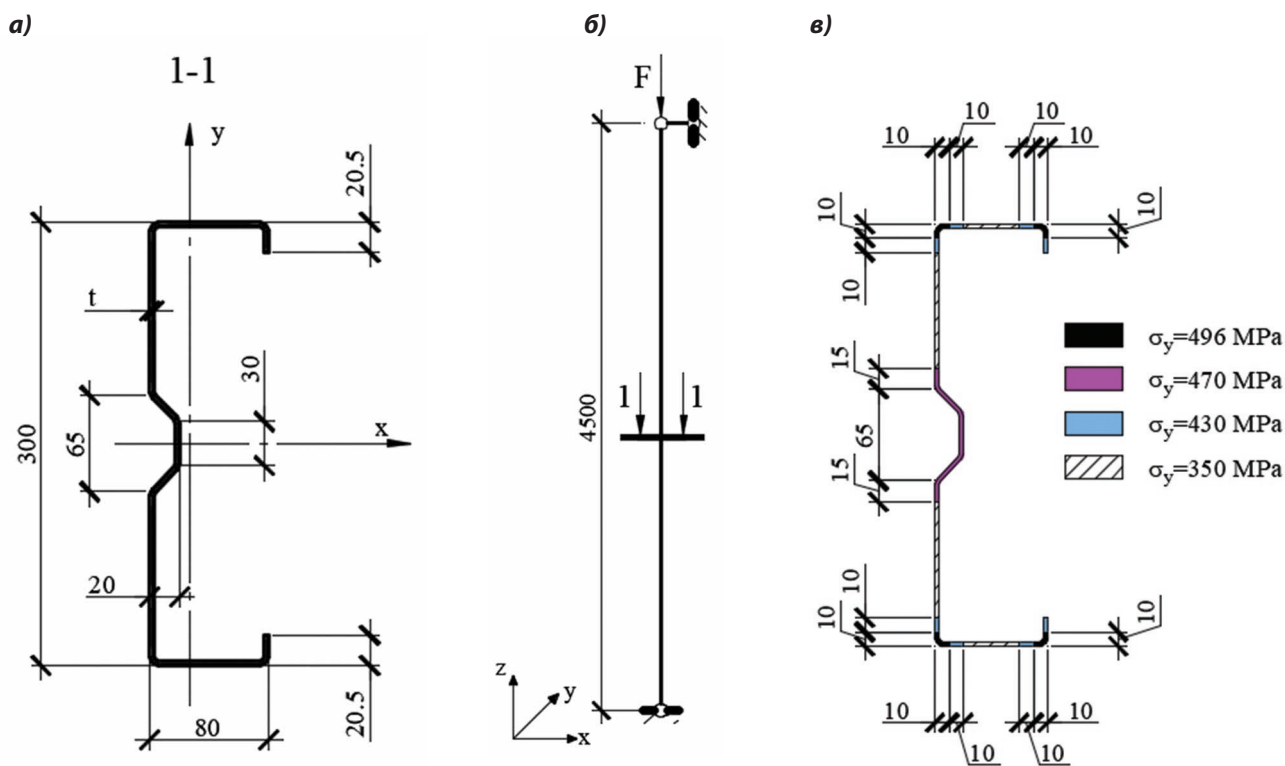


Рис. 1. Объект исследования: а) поперечное сечение профиля объекта исследования; б) расчетная схема объекта исследования; в) распределение механических свойств стали по сечению профиля (здесь σ_T – предел текучести стали)

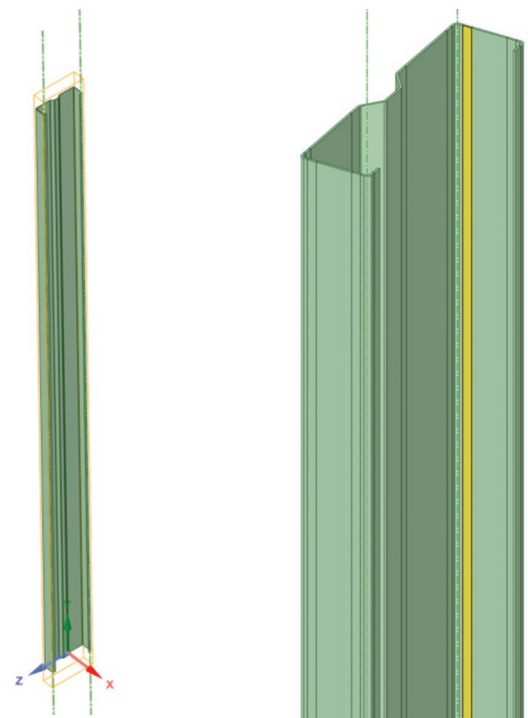
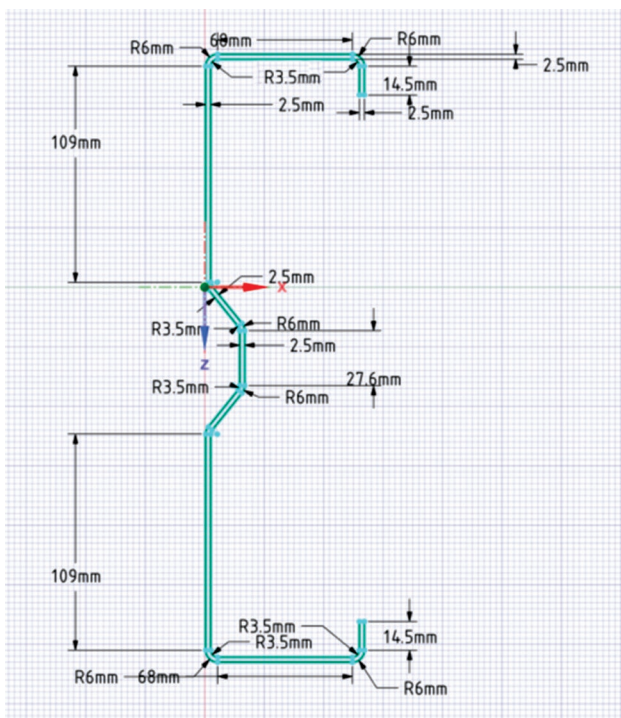


Рис. 2. Формирование геометрии образца

На этапе построения геометрии модель разделялась по сечению на 17 отдельных элементов, соответствующих зоне упрочнения профиля, что связано с особенностями назначения материала. В дальнейшем данная модель передавалась в качестве исходных данных в модуль Workbench для решения задачи Static Structural.

Материалы элементов формировались в блоке Engineering Data как билинейные модели нелинейного материала. Билинейная модель отличается от стандартной диаграммы Прандт-

ля наличием касательного модуля упругости, который определялся в соответствии с AISI. На рис. 3 представлено формирование материала для зоныгиба профиля под прямым углом, для остальных зон формирование выполнялось аналогично.

Формирование сетки конечных элементов выполнялось автоматически с учетом заданных параметров: размеров и углов конечных элементов, в зонахгиба выполнялось сгущение сетки конечных элементов (рис. 4).

Properties of Outline Row 3: Zone 1			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7750	kg m ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
6	Young's Modulus	3E+05	MPa
7	Poisson's Ratio	0.31	
8	Bulk Modulus	2.6316E+11	Pa
9	Shear Modulus	1.145E+11	Pa
10	Bilinear Isotropic Hardening		
11	Yield Strength	495.91	MPa
12	Tangent Modulus	2830	MPa

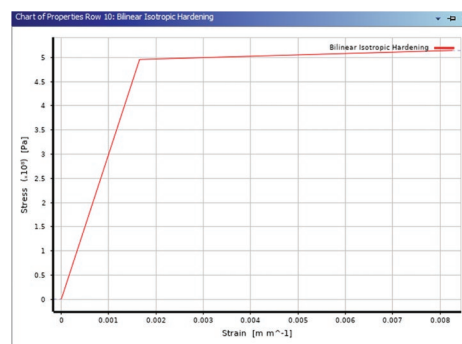


Рис. 3. Формирование материалов образца

Граничные условия формировались нулевыми перемещениями по соответствующим направлениям и задавались для верхнего и нижнего торцов профиля (рис. 5а). Сжимающая нагрузка прикладывалась к верхнему торцу элемента и составила 320 кН (рис. 5б).

Результаты

По итогам решения статической задачи в нелинейной постановке были получены деформации профиля и нормальные напряжения в элементах профиля во времени. Максимальные перемещения в сечении на расстоянии 2,3 м от опоры составили 59 мм в плоскости наименьшей жесткости, что соответствует $H/76$ (рис. 6а). Максимальные сжимающие напряжения в этом же сечении составили 450 МПа, причем они возникают в местахгиба с упрочнением стали до 496 МПа, с обеспечением несущей способности (рис. 6б).

Обсуждения и выводы

Моделирование элемента из стального тонкостенного профиля в ПК ANSYS с учетом зон упрочнения стали по сечению профиля подтвердило результаты по улучшению несущей способности, полученные в ПК STARK. Сравнение полученных результатов по деформациям и напряжениям показало расхождения по нормальным напряжениям в расчетном сечении 2,3 %, расхождения в горизонтальных перемещениях в расчетном сечении – 7,7 %. Полученные ранее результаты позволили провести верификацию более перспективной для исследования численной модели. Они подтверждают адекватное описание поведения элементов из тонкостенного профиля с учетом зон упрочнения стали в обоих программных комплексах.

Вопрос учета начальных геометрических несовершенств требует дальнейшего изучения. Величина и форма начальных геометрических несовершенств носят стохастический характер, при этом снижают несущую способность профиля на 20–25 % [12]. Учет начальных геометрических несовершенств в условиях лабораторного эксперимента, основанный на крупномасштабной выборке, является ресурсозатратным.

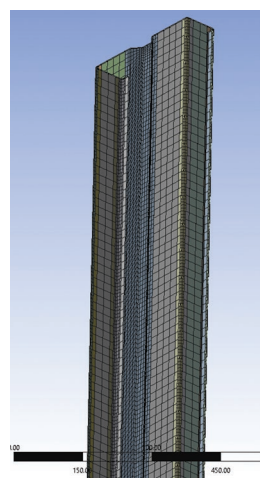
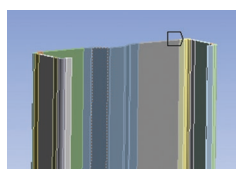
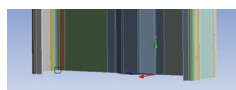


Рис. 4. Формирование сетки конечных элементов образца

а)

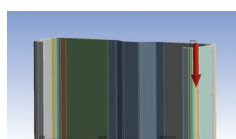


Steps	Time [s]	✓ X [mm]
1	1	0.
2	1	1.
*		



Steps	Time [s]	✓ X [mm]	✓ Y [mm]	✓ Z [mm]
1	1	0.	0.	0.
2	1	0.	0.	0.
*				

б)



Steps	Time [s]	✓ X [N]	✓ Y [N]	✓ Z [N]
1	1	0.	0.	0.
2	1	0.	-3.2e+005	0.
*				

Рис. 5. Формирование: а) граничных условий; б) нагрузки

а)



б)

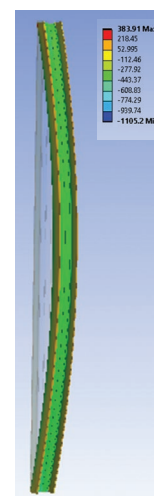


Рис. 6. Результаты эксперимента: а) деформации; б) нормальные напряжения

В прикладных ПК невозможно точно реализовать начальную геометрию элемента с погрешностью. Реализованная в ПК ANSYS возможность использовать деформированные схемы форм потери устойчивости с масштабным фактором позволит

выполнить крупномасштабный эксперимент в численной постановке. Также авторами был сделан вывод о необходимости проработки модели на участках опирания для более полного отражения действительной работы элемента в краевых зонах.

Библиографический список

1. Юрченко, В. В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде «SCAD Office» / В. В. Юрченко. – Текст : непосредственный // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 8 (18). – С. 38–46.
2. Илюхина, Е. А. Мировая практика применения технологии ЛСТК в строительстве / Е. А. Илюхина, А. А. Соболев. – Текст : непосредственный // Ползуновский альманах. – 2018. – № 1. – С. 89–92.
3. Рыбаков, В. А. Применение полусдвиговой теории В. И. Сливкера для анализа напряженно-деформированного состояния систем тонкостенных стержней : специальность 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Рыбаков Владимир Александрович ; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – Санкт-Петербург, 2012. – 21 с. – Место защиты : Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – Текст : непосредственный.
4. Любавская, И. В. Технологичность изготовления ЛСТК / И. В. Любавская, М. В. Сотников. – Текст : непосредственный // Тенденции развития современной науки : Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета : в 2-х частях, Липецк, 24–26 апреля 2017 года. – Липецк : Липецкий государственный технический университет, 2017. – С. 414–416.
5. Арктиков, Г. А. Влияние холодной формовки на механические свойства стали замкнутых гнутосварных профилей холодной формовки / Г. А. Арктиков, В. Ф. Беляев, Л. И. Гладштейн. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 1994. – № 5. – С. 16–24.
6. Астахов, И. В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутого профиля / И. В. Астахов, Г. И. Белый – Текст : непосредственный // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2006. – № 9. – С. 21–25.
7. Landesmann, A. Experimental Investigation of the Mechanical Properties of ZAR-345 Cold-Formed Steel at Elevated Temperatures / A. Landesmann, F. C. M. Moreira da Silva, E. M. Batista. – DOI: 10.1590/1516-1439.297014. – Direct text // Materials Research-Ibero-American Journal of Materials. – 2014. – Т. 17. – No. 4. – Pp. 1082–1092.
8. Ranawaka, T. Experimental study of the mechanical properties of light gauge cold-formed steels at elevated temperatures / T. Ranawaka, M. Mahendran. – DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.06.006. – Direct text // Fire Safety Journal. – 2009. – Т. 44. – No. 2. – Pp. 219–229.
9. Lee, J. Prediction of mechanical properties of light gauge steels at elevated temperatures / J. Lee, M. Mahendran, P. Makelainen. – DOI: 10.1016/S0143-974X(03)00087-7. – Direct text // Journal of Constructional Steel Research. – 2003. – Т. 59. – No. 12. – Pp. 1517–1532.
10. Корсун, Н. Д. Адаптация методики и анализ результатов лабораторных испытаний прочности стали тонкостенного холодногнутого профиля / Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина. – Текст : электронный // Вестник Евразийской науки. – 2020. – № 6. – URL : <https://esj.today/PDF/63SAVN620.pdf> (дата обращения : 10.11.2021).
11. Корсун, Н. Д. Анализ работы тонкостенных профилей с учетом упрочнения стали / Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина. – Текст : электронный // Научные исследования XXI века. – 2021. – № 3 (11). – С. 48–52. – URL : <https://esj.today/PDF/63SAVN620.pdf> (дата обращения : 10.11.2021).

12. Корсун, Н. Д. Анализ НДС составного сечения из тонкостенных профилей с учетом начальных геометрических несовершенств / Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина. – Текст : непосредственный // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2018. – № 4 (39). – С. 83–89.

References

1. Yurchenko, V. V. (2010). Proektirovanie karkasov zdaniy iz tonkostennykh kholodnogutykh profiley v srede «SCAD Office». Magazine of Civil Engineering, 8 (18), pp. 38-46. (In Russian).
2. Ilyukhina, E. A., & Sobolev, A. A. (2018). Mirovaya praktika primeneniya tekhnologii LSTK v stroitel'stve. Polzunovskiy al'manakh, (1), pp. 89-92. (In Russian).
3. Rybakov, V. A. (2012). Primenenie polusdvigovoy teorii V.I. Slivkera dlya analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistem tonkostennykh sterzhney. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Saint-Petersburg, 21 p. (In Russian).
4. Lyubavskaya, I. V., & Sotnikova, M. V. (2017). Manufacturability of manufacturing of light gauge steel framing manufacturability. Tendentsii razvitiya sovremennoy nauki: Sbornik tezisev dokladov nauchnoy konferentsii studentov i aspirantov Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta: v 2-kh chastyakh, April, 24–26, 2017. Lipetsk, Lipetsk State Technical University Publ., pp. 414-416. (In Russian).
5. Arktikov, G. A., Belyaev, V. F., & Gladshteyn, L. I. (1994). Vliyaniye kholodnoy formovki na mekhanicheskiye svoystva stali zamknytykh gnutosvarenykh profiley kholodnoy formovki. Industrial and Civil Engineering, (5), pp. 16-24. (In Russian).
6. Astakhov, I. V., & Belyy, G. I. (2006). Prostranstvennaya ustoychivost' elementov konstruksiy iz kholodnogutykh profiley. Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve, (9), pp. 21-25. (In Russian).
7. Landesmann, A., Moreira da Silva, F. C. M., & Batista, E. M. (2014). Experimental Investigation of the Mechanical Properties of ZAR-345 Cold-Formed Steel at Elevated Temperatures. Materials Research-Lbero-American Journal of Materials, 17(4), pp. 1082-1092. (In English). DOI: 10.1590/1516-1439.297014
8. Ranawaka, T., & Mahendran, M. (2009). Experimental study of the mechanical properties of light gauge cold-formed steels at elevated temperatures. Fire Safety Journal, 44(2), pp. 219-229. (In English). DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.06.006
9. Lee, J., Mahendran, M., & Makelainen, P. (2003). Prediction of mechanical properties of light gauge steels at elevated temperatures. Journal of Constructional Steel Research, 59(12), pp. 1517-1532. (In English). DOI: 10.1016/S0143-974X(03)00087-7
10. Korsun, N. D., & Prostakishina, D. A. (2020). Adaptation of the methodology and analysis of laboratory testing of the strength of cold-formed thin-walled steel. The Eurasian Scientific Journal, 6(12). (In Russian). Available at: <https://esj.today/PDF/63SAVN620.pdf> (date of application 10.11.2021).
11. Korsun, N. D., & Prostakishina, D. A. (2021). Analysis of the operation of thin-walled profiles taking into account the strengthening of steel. Nauchnye issledovaniya XXI veka, 3(11), pp. 48-52. (In Russian). Available at: <https://esj.today/PDF/63SAVN620.pdf> (date of application 10.11.2021).
12. Korsun, N. D., & Prostakishina, D. A. (2018). Structural analysis of stress and strain state of paired thin-walled section with initial geometric imperfections. Akademicheskij Vestnik Uralniiproekt RAASN, 4(39), pp. 83-89. (In Russian).

Сведения об авторах

Корсун Наталья Дмитриевна, к. т. н., профессор кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: korsunnd@tyuiu.ru

Information about the authors

Natalya D. Korsun, Candidate of Engineering, Professor at the Department of Building Constructions, Industrial University of Tyumen, e-mail: korsunnd@tyuiu.ru

Простакишина Дарья Анатольевна, ассистент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: prostakishinada@tyuiu.ru

Darya A. Prostakishina, Assistant at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: prostakishinada@tyuiu.ru

Для цитирования: 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. – С. 44–51.

For citation: Korsun, N. D., & Prostakishina, D. A. (2021). Modeling and accounting of strengthening zones of thin-walled steel profiles in ANSYS. Architecture, construction, transport, (4), pp. 44-51. (In Russian). DOI: 10.31660/2782-232X-2021-4-44-51.