УДК 69.07:624.07

© Н. Д. Корсун, канд. техн. наук, доцент
© Д. А. Простакишина, аспирант
(Тюменский индустриальный университет)
E-mail: korsunnd@tyuiu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-5-83-89

© N. D. Korsun, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© D. A. Prostakishina, post-graduate student
(Industrial University of Tyumen)
E-mail: korsunnd@tyuiu.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЛЕГКИХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КАК СПОСОБ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В СТАЛЬНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

APPLICATION OF THIN-WALLED STRUCTURES FOR ENERGY-SAVINGS IN STEEL STRUCTURE CONSTRUCTION

Рассматривается применение легких тонкостенных конструкций как возможность экономии ресурсов в строительстве, использующем стальные конструкции. Выделены основные проблемы проектирования и обоснована необходимость учета начальных геометрических несовершенств и неравномерного распределения механических свойств стали. Представлен аналитический расчет тонкостенного профиля, работающего в условиях осевого сжатия, осевого сжатия с изгибом с учетом начальных геометрических несовершенств. Анализ изменения эффективных характеристик и напряжений в сечении показал существенное влияние начальных геометрических несовершенств профилей в целом и расположения дополнительного эксцентриситета от начальных искривлений элемента. Обоснована необходимость учета неравномерного распределения механических свойств стали по сечению профиля.

Ключевые слова: стальные тонкостенные профили, начальные геометрические несовершенства, механические свойства стали.

The paper discusses the use of lightweight thin-walled structures, which allows saving resources in steel structure construction. The major problems in this field are considered and the need to take into account the initial geometric imperfections and the uneven allocation of the steel mechanical properties over the profile cross-section is substantiated. Analytical calculation of a thin-walled profile operating under axial compression, axial compression with bending, taking into account the initial geometric imperfections, is presented. Analysis of changes in the effective characteristics and stresses in the cross section has shown a significant influence of the initial geometric imperfections of the profiles as a whole and the location of the additional eccentricity from the initial bending of the element. The necessity of taking into account the uneven distribution of mechanical properties of steel over the profile cross-section is substantiated.

Keywords: steel thin-walled profiles, initial geometric imperfections, steel mechanical properties.

На сегодняшний день наиболее остро стоит вопрос рационального потребления невозобновляемых энергоресурсов, вследствие чего одним из приоритетных направлений технологического развития экономики России является решение проблем энергоэффективности и энергосбережения.

Строительная отрасль является активным потребителем энергетических ресурсов, поэтому

первоочередная задача отрасли в сфере использования энергии — снижение потребления энергии на всех этапах жизненного цикла сооружения. Эта задача включает разработку эффективных проектно-технических решений и систем жизнеобеспечения, использование альтернативных источников энергии, усовершенствование нормативно-правовой базы, а также ряд других ресурсосберегающих мероприятий.

Анализируя данный вопрос, можно сделать вывод о том, что в настоящее время наибольшее внимание уделяется увеличению тепловой защиты сооружений [1–5], то есть рациональному расходованию энергии путем разработки и внедрения различных теплоизоляционных материалов, энергоэффективных светопрозрачных конструкций и фасадных систем [6–9]. Стоит отметить рациональность такого подхода, поскольку потери тепловой энергии через ограждающие конструкции составляют через стены — 30–49 %, окна — 25–35 %, подвальные и чердачные перекрытия — 10–18 % в зависимости от этажности здания, материала ограждающих конструкций и срока эксплуатации [10].

Другим путем решения вопроса по снижению энергетических затрат является снижение энергетических затрат за счет экономного использования топливно-энергетических ресурсов при производстве материалов и изделий. В отрасли строительных конструкций один из способов решения вопроса — применение конструкций с меньшей материалоемкостью и наиболее эффективной технологией производства.

Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК), изготавливаемые из холоднокатаной тонколистовой стали путем холодной гибки на прокатных станах с последующей оцинковкой, выступают эффективной альтернативой традиционным горячекатаным профилям [11–17]. Строительство с применением ЛСТК является наиболее индустриализованным и легко управляемым процессом, так как включает в себя максимальную заводскую готовность. Сооружения, возводимые из ЛСТК, представляют собой легкие каркасы, рамы которых объединяются в пространственную систему. В качестве основных несущих конструкций каркаса из ЛСТК наиболее часто используются спаренные профили, соединенные между собой в симметричное сечение болтами, самонарезающими винтами, а также заклепками.

К основным преимуществам данной технологии, непосредственно влияющим на вопрос энергосбережения, следует отнести:

1. Малый удельный вес каркаса и, как следствие, снижение энергозатрат на его производство. Данный фактор также позволяет существенно снизить нагрузки на возводимый фундамент, что снижает стоимость его возведения.

2. Скорость монтажа. Довольно быстрая сборка каркаса снижает время и трудозатраты на возведение сооружений, а также технология возведения из ЛСТК позволяет обходиться без грузоподъемных механизмов, что эффективно при новом строительстве или реконструкции в стесненных условиях городской застройки.

3. Отсутствие «мокрых процессов». Данный фактор позволяет не учитывать сезонность строительства и производить строительномонтажные работы на протяжении всего года.

Также к достоинствам технологии следует отнести ее экологичность, возможность разнообразия архитектурных форм и экономию затрат, связанных с внутренней отделкой помещений.

В качестве примера, демонстрирующего возможное ресурсосбережение, сравним показатели удельной металлоемкости одноэтажных рамных и рамно-связевых каркасов серийного производства из легких металлических конструкций (ЛМК) и ЛСТК в зависимости от нагружения вертикальной нагрузкой. В качестве исходных габаритов каркаса приняты следующие параметры: пролет — 18 м, длина — 60 м, высота низа стропильных конструкций — 6 м. Для сравнения использовались каркасы из ЛМК типов «Орск», «Канск», «Молодечно», УНИТЕК и из ЛСТК типа УНИТЭКС-Р1 (рис. 1).

Исходя из результатов сравнения можно сделать вывод о том, что наиболее эффективными конструкциями каркаса являются каркасы УНИТЭКС-Р1 (ЛСТК) и УНИТЕК (ЛМК), при этом серийный каркас из ЛСТК способен воспринимать большие вертикальные нагрузки, нежели каркас из ЛМК. Таким образом, обосновывается актуальность использования конструкций из ЛСТК в стальном строительстве в качестве мер, обеспечивающих энергосбережение данной отрасли.

Однако существуют проблемы, ограничивающие развитие тонкостенных конструкций в отечественной строительной индустрии, основной из которых является недостаточная проработанность отечественной нормативной базы по проектированию элементов из ЛСТК. Введенный в 2016 году Свод правил на стальные тонкостенные конструкции СП 260.1325800.2016, в основу которого положен европейский стандарт EN 1993-1-3:2006, рекомендует для оценки реального пове-

Рис. 1. Зависимость металлоемкости каркасов серийного производства от нагружения вертикальной нагрузкой

дения конструкций проводить расчеты, основываясь на экспериментальных данных, что требует дополнительных затрат при проектировании.

Особенности расчета тонкостенных профилей определяются рядом существенных факторов: потеря местной устойчивости отдельных участков сечения сжатой зоны; потеря устойчивости формы сечения; потеря общей устойчивости элемента; начальные геометрические несовершенства; неравномерное распределение механических свойств по сечению элемента.

Геометрические несовершенства возникают вследствие наличия упругих и упругопластических деформаций при изготовлении профиля способом холодной прокатки. Величины начальных геометрических несовершенств тонкостенных профилей рекомендуется назначать в зависимости от класса точности изготовления исходя из ГОСТ 23188–2012. Для тонкостенных профилей класс точности должен быть не ниже 5. Несмотря на то что необходимость учета начальных геометрических несовершенств прописана в нормах, методика их учета отсутствует.

Необходимость учета неравномерного распределения механических характеристик по сечению возникает вследствие особенностей технологии, применяемой для производства тонкостенных холодногнутоэлементов. Технология изготовления данных конструкций следующая: сталь из рулонов режется на продольные поло-

ски (штрипсы) под вид профиля, затем штрипсы устанавливаются в станок. Используется способ холодной гибки между валками. Гибку полосы в нужный профиль осуществляют последовательно расположенными парами роликов (валков), число которых зависит от сложности профиля. При холодной гибке металла в местахгиба формируется зона наклепа.

СП 260.1325800.2016 регламентирует определение нормативных и расчетных сопротивлений стали на основе статистической обработки, используя минимальные значения распределения. Вместе с тем допускается учитывать в расчетах изменчивость механических свойств стали по сечению гнутого профиля, полученную на основании экспериментальных данных, что связано с упрочнением стали в местах холодногогиба. Аналитическая методика для учета неравномерного распределения механических свойств по сечению профиля отсутствует. Исследования, проведенные П. А. Косых в 2015 году в Пермском НИПУ на тонкостенных профилях из стали 08пс, показали значения предела текучести и временного сопротивления, значительно превышающие стандартные значения [19], что подтверждает необходимость исследования влияния данного фактора на НДС элемента.

Выбор объекта исследования и его расчетной схемы обусловлен работой колонн и ригелей в составе каркасов из ЛСТК как элементов, подвер-

женных действию продольной сжимающей силы и изгибающего момента в плоскости поперечной рамы и раскрепленных из плоскости связевыми элементами. Загружение обусловлено аналогичными факторами, характерными для работы элементов рамы в составе рамно-связевого каркаса здания.

В качестве объекта исследования принят элемент из двух спаренных сигма-профилей высотой сечения 300 мм (рис. 2). Длина элемента $L = 15h = 4500$ мм. Закрепление в плоскости действия момента принято шарнирное на концах элемента, и через 1500 мм из плоскости действия момента. Материал — сталь 350 по ГОСТ Р 52246–2016.

Метод расчета тонкостенных конструкций основан на использовании эффективной площади сечения и предусматривает замену участков сечения отдельными пластинами с различным закреплением. Соответственно, геометрические характеристики сжатых участков сечения заменяются редуцированными с учетом потери местной устойчивости, для растянутых участков эффективные и полные геометрические характеристики совпадают. На редуцированных участках сечения при расчете изменяются толщина и ширина пластины путем умножения начальной толщины на коэффициент редукции ρ , который зависит от соотношения напряжений в элементе сечения, его гибкости, граничных условий закреп-

Рис. 2. Геометрические размеры сигма-профиля и форма спаренного сечения

Геометрические характеристики сечения

Случай нагружения	A , см ²	W_y , см ³	W_x , см ³
Без нагрузки	20,03	28,36	167,34
1) Осевое сжатие	6,7	3,79	59,96
2) Сжатие с изгибом	11,63	17,93	32,70
3а) Сжатие с изгибом и искривлением по оси y	9,84	17,78	42,45
3б) Сжатие с изгибом и искривлением по оси x и угловым смещением	8,75	9,73	48,54

A — площадь сечения, W_y и W_x — моменты сопротивления относительно осей y и x соответственно

пления пластины, а также коэффициента потери устойчивости.

Учет величины начальных геометрических несовершенств профилей производился согласно СП 260.1325800.2016 для местных несовершенств исходя из соотношения $e_0/L = 1/250$, а для общих несовершенств — в соответствии с ГОСТ 23188–2012 для элементов класса точности 5.

Так как начальные несовершенства являются не контролируемой численно и по направлению величиной, но создающей дополнительный эксцентриситет приложения продольной сжимающей силы, для объекта исследования была принята максимально возможная величина искривлений 30 мм в вариантах расположения.

Для определения влияния на НДС стержня составного симметричного сечения из сигма-профилей продольного изгиба и начальных геометрических несовершенств профилей было рассмотрено три случая нагружения: 1) осевое сжатие; 2) сжатие с изгибом; 3) сжатие с изгибом с учетом начальных геометрических несовершенств. При этом начальные геометрические несовершенства рассматривались по множеству вариантов возможного положения искривлений, из которых было выделено два характерных: а) смещение продольной силы по оси y на 30 мм без углового смещения; б) смещение продольной силы по оси x с угловым смещением на $\pm 45^\circ$.

Определение характерных зон для проведения эксперимента по оценке прочностных характеристик основывалось на исследованиях распределения механических свойств стали по сечению и толщине профиля, проведенных советскими учеными в XX веке [20–24]. На основании полученных теоретических данных были выделены

следующие характерные зоны в сечении сигма-профиля: зоны изгиба под прямым и тупым углами, зоны, прилегающие к местам изгиба шириной $(3...6)t$, и прямолинейные участки.

В результате расчета эффективного сечения для трех расчетных случаев получены значения геометрических характеристик, представленные в таблице.

Анализируя эффективные геометрические характеристики, можно сделать вывод о том, что случае с наименьшей расчетной площадью сечения является случай осевого сжатия ($A_{red} = 6,7 \text{ см}^2$, что составляет 0,33 от полной площади сечения A), так как для всех пластин характерна местная потеря устойчивости, в случаях внецентренного сжатия без учета и с учетом начальных геометрических несовершенств эффективная площадь сечения увеличивается, однако осевое сжатие является идеализированной работой элемента, поэтому опираться на результаты работы в условиях осевого сжатия нецелесообразно.

Для случаев внецентренного сжатия с учетом начальных геометрических несовершенств профилей происходит уменьшение площади сечения в сравнении со случаем, не учитывающим начальные геометрические несовершенства на 15 и 24 % соответственно для случаев 3а и 3б (см. таблицу). Это связано с увеличением сжатой зоны сечения, также наблюдается увеличение момента сопротивления относительно оси x (смещение оси центра тяжести эффективного сечения в сторону растянутого волокна) и уменьшение — относительно оси y . Максимальные напряжения в эффективном сечении наблюдаются для случая с начальными геометрическими несовершенствами в плоскости, перпендикулярной плоскости изгиба.

Расчет напряжений в эффективном сечении при сжатии с изгибом без учета начальных геометрических несовершенств показал, что прирост напряжений происходит вследствие потери местной устойчивости отдельных элементов сечения, при этом упругопластическая работа материала наступает при достижении напряжений в полном сечении, равных $0,71R_y$.

При учете начальных несовершенств материал переходит в зону упругопластической работы при напряжениях в полном сечении, равных

$0,58R_y$. Прирост напряжений связан с возникновением дополнительных усилий ΔM_x и ΔM_y .

Определение механических свойств производилось прямым и косвенным методами на малой партии образцов, результаты эксперимента показали прирост временного сопротивления в зоне наибольшего упрочнения на 10 % в сравнении с прямолинейными малоупрочненными участками и на 17 % в сравнении со стандартными значениями. Однако на основании проведенных испытаний был сделан вывод о несовершенстве косвенного метода для тонкостенных образцов и необходимости его адаптации, что является дальнейшей перспективой исследования данной темы.

Согласно СП 294.1325800.2017 и ГОСТ Р 52246–2016 для стали 350 с пределом прочности 475–485 Н/мм² и пределом текучести 390–400 Н/мм² $1,2 < \sigma_u / \sigma_y < 1,3$. Следовательно, для данного элемента не допускается развитие неупругих деформаций и переход в стадию самоупрочнения в зоне растяжения, однако неупругие деформации учитываются в сжатой зоне, что обеспечивает более полное использование материала и его свойств. Распределение напряжений по сечению при внецентренном сжатии позволяет сделать вывод о том, что закритическая работа наступает вначале для сжатой зоны сечения, что позволяет учесть резервы ее работы при уточнении напряжений сжатия от влияния начальных геометрических несовершенств и упрочнения стали в зонах холодного гiba.

Библиографический список

1. Cheng Y., Niu J., Gao N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation // Building and Environment. 2012. Vol. 47. Pp. 13–22. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.05.011.
2. Orr H., Wang J., Fetsch D., Dumont R. Technical note: Airtightness of older-generation energy-efficient houses in Saskatoon // Journal of Building Physics. 2013. Vol. 36 (3). Pp. 294–307. DOI: 10.1177/1744259112460748.
3. Rohdin P., Molin A., Moshfegh B. Experiences from nine passive house in Sweden — Indoor thermal environment and energy use // Building and Environment. 2014. Vol. 71. Pp. 176–185.
4. Dodoo A., Gustavsson L., Sathre R. Primary energy implications of ventilation heat recovery in residential

buildings // *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43 (7). Pp. 1566–1572. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.02.019.

5. Gorshkov A. S., Vatin N. I., Rymkevich P. P., Kydrevich O. O. Payback period of investments in energy saving // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 78 (2). Pp. 65–75. DOI: 10.18720/MCE.78.5.

6. Orlova A. V., Zhmarin E. N., Paramonov K. O. Power efficiency of houses from light-gauge steel structures // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013. № 11 (6). Pp. 1–13.

7. Petritchenko M. R., Kotov E. V., Nemova D. V., Tarasova D. S., Sergeev V. V. Numerical simulation of ventilated facades under extreme climate conditions // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 77 (1). Pp. 130–140. DOI: 10.18720/MCE.77.12.

8. Petrichenko M. R., Nemova D. V., Kotov E. V., Tarasova D. S., Sergeev V. V. Ventilated facade integrated with the HVAC system for cold climate // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 77 (1). Pp. 47–58. DOI: 10.18720/MCE.77.5.

9. Petritchenko M. R., Subbotina S. A., Khairutdinova F. F., Reich E. V., Nemova D. V., Olshevskiy V. Ya., Sergeev V. V. Effect of rustication joints on air mode in ventilated facade // *Magazine of Civil Engineering*. 2017. № 73 (5). Pp. 40–48. DOI: 10.18720/MCE.73.4.

10. Владимиров А. С., Абакумов Р. Г. Динамика производства и внедрения энергоэффективных строительных конструкций, материалов и изделий в Российской Федерации // *Инновационная наука*. 2017. Т. 1, № 3. С. 145–147.

11. Schafer B. W. Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design // *Journal of Constructional Steel Research*. 2008. № 64. Pp. 766–778. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.01.022.

12. Young Bong Kwon, Bong Sun Kim, Hancock G. J. Compression tests of high strength cold-formed steel channels with buckling interaction // *Journal of Constructional Steel Research*. 2009. Vol. 65 (2). Pp. 278–289. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.07.005.

13. Mohebbi S. et al. Experimental work on single and double-sided steel sheathed cold-formed steel shear walls for seismic actions // *Thin-Walled Structures*. 2015. Vol. 91. Pp. 50–62. DOI: 10.1016/j.tws.2015.02.0070263-8231.

14. Vatin N., Sinelnikov A., Garifullin M., Trubina D. Simulation of cold-formed steel beams in global and distortional buckling // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 633–634. Pp. 1037–1041. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.1037.

15. Kikot A. A. Design of cold-formed tension members using the CFSteel software // *Magazine of Civil Engineering*. 2016. № 61 (1). Pp. 42–59. DOI: 10.5862/MCE.61.5.

16. Pavlenko A. D., Rybakov V. A., Pikht A. V., Mikhailov E. S. Non-uniform torsion of thin-walled open-section multi-span beams // *Magazine of Civil Engineering*. 2016. № 67 (7). Pp. 55–69. DOI: 10.5862/MCE.67.6.

17. Rybakov V. A., Al Ali M., Panteleev A. P., Fedotova K. A., Smirnov A. V. Bearing capacity of rafter systems made of steel thin-walled structures in attic roofs // *Magazine of Civil Engineering*. 2017. № 76 (8). Pp. 28–39. DOI: 10.18720/MCE.76.3.

18. Vedishcheva I. S., Ananin M. Yu., Al Ali M., Vatin N. I. Influence of heat conducting inclusions on reliability of the system “sandwich panel — metal frame” // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 78 (2). Pp. 116–127. DOI: 10.18720/MCE.78.9.

19. Косых П. А. Сравнение несущей способности легких стальных тонкостенных профилей различной конфигурации на основе компьютерного моделирования // *Вестник ТГАСУ*. 2015. № 2 (49). С. 135–143.

20. Богоявленский К. Н., Григорьев А. К. Определение механических свойств листовых материалов для расчета маршрутов холодного деформирования // *Обработка металлов давлением*. М.; Л.: Машгиз, 1963. С. 135–139. (Труды ЛПИ; № 222).

21. Богоявленский К. Н., Ясев Д. М. Расчет на прочность гнутых профилей с учетом упрочнения // *Обработка металлов давлением*. Л.: Машгиз, 1961. С. 83–89. (Труды ЛПИ; № 218).

22. Тришевский И. С. Изменение механических свойств в процессе профилирования // *Механические свойства гнутых профилей проката*. Киев: Техніка, 1977. С. 58–61.

23. Немкова И. С. Статистический анализ свойств материала и обоснование расчетных сопротивлений гнутых профилей для строительных металлических конструкций: дис. ... канд. техн. наук. М., 1984. 165 с.

24. Арктиков Г. А., Беляев В. Ф., Глазштейн Л. И. Влияние холодной формовки на механические свойства стали замкнутых гнутосварных профилей холодной формовки // *Промышленное и гражданское строительство*. 1994. № 5. С. 16–24.

References

1. Cheng Y., Niu J., Gao N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation. *Building and Environment*, 2012, vol. 47, pp. 13–22. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.05.011.

2. Orr H., Wang J., Fetsch D., Dumont R. Technical note: Air tightness of older-generation energy-efficient houses in Saskatoon. *Journal of Building Physics*, 2013, vol. 36 (3), pp. 294–307. DOI: 10.1177/1744259112460748.

3. Rohdin P., Molin A., Moshfegh B. Experiences from nine passive houses in Sweden — Indoor thermal environment and energy use. *Building and Environment*, 2014, vol. 71, pp. 176–185.

4. Dadoo A., Gustavsson L., Sathre R. Primary energy implications of ventilation heat recovery in residential

buildings. *Energy and Buildings*, 2011, vol. 43 (7), pp. 1566–1572. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.02.019.

5. Gorshkov A. S., Vatin N. I., Rymkevich P. P., Kydrevich O. O. Payback period of investments in energy saving. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Magazine of Civil Engineering*, 2018, no. 78 (2), pp. 65–75. DOI: 10.18720/MCE.78.5.

6. Orlova A. V., Zhmarin E. N., Paramonov K. O. Power efficiency of houses from light-gauge steel structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2013, no. 11 (6), pp. 1–13.

7. Petritchenko M. R., et al. Numerical simulation of ventilated facades under extreme climate conditions. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Magazine of Civil Engineering*, 2018, no. 77 (1), pp. 130–140. DOI: 10.18720/MCE.77.12.

8. Petrichenko M. R., et al. Ventilated facade integrated with the HVAC system for cold climate. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Magazine of Civil Engineering*, 2018, no. 77 (1), pp. 47–58. DOI: 10.18720/MCE.77.5.

9. Petritchenko M. R., et al. Effect of rustication joints on air mode in ventilated façade. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Magazine of Civil Engineering*, 2017, no. 73 (5), pp. 40–48. DOI: 10.18720/MCE.73.4.

10. Vladimirova A. S., Abakumov R. G. *Dinamika proizvodstva i vnedreniya energoehfektivnykh stroitel'nykh konstruktsiy, materialov i izdeliy v Rossiyskoy Federatsii* [Dynamics of production and implementation of energy-efficient building structures, materials and products in the Russian Federation]. *Innovatsionnaya nauka – Innovative science*, 2017, vol. 1, no. 3, pp. 145–147.

11. Schafer B. W. Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, no. 64, pp. 766–778. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.01.022.

12. Young Bong Kwon, Bong Sun Kim, Hancock G. J. Compression tests of high strength cold-formed steel channels with buckling interaction. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, vol. 65 (2), pp. 278–289. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.07.005.

13. Mohebbi S., et al. Experimental work on single and double-sided steel sheathed cold-formed steel shear walls for seismic actions. *Thin-Walled Structures*, 2015, vol. 91, pp. 50–62. DOI: 10.1016/j.tws.2015.02.0070263-8231.

14. Vatin N., Sinelnikov A., Garifullin M., Trubina D. Simulation of cold-formed steel beams in global and distortional buckling. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 633–634, pp. 1037–1041. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.1037.

15. Kikot A. A. Design of cold-formed tension members using the CFSteel software. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Magazine of Civil Engineering*, 2016, no. 61 (1), pp. 42–59. DOI: 10.5862/MCE.61.5.

16. Pavlenko A. D., Rybakov V. A., Pikht A. V., Mikhailov E. S. Non-uniform torsion of thin-walled open-section multi-span beams. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Magazine of Civil Engineering*, 2016, no. 67 (7), pp. 55–69. DOI: 10.5862/MCE.67.6.

17. Rybakov V. A., et al. Bearing capacity of rafter systems made of steel thin-walled structures in attic roofs. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Magazine of Civil Engineering*, 2017, no. 76 (8), pp. 28–39. DOI: 10.18720/MCE.76.3.

18. Vedishcheva I. S., Ananin M. Yu., Al Ali M., Vatin N. I. Influence of heat conducting inclusions on reliability of the system “sandwich panel – metal frame”. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Magazine of Civil Engineering*, 2018, no. 78 (2), pp. 116–127. DOI: 10.18720/MCE.78.9.

19. Kosykh P. A. *Sravnenie nesushchey sposobnosti legkikh stal'nykh tonkostennykh profiley razlichnoy konfiguratsii na osnove komp'yuternogo modelirovaniya* [Comparison of the bearing capacity of light weight steel thin-walled profiles of various configurations on the basis of computer modeling]. *Vestnik TGASU – Bulletin of TGASU*, 2015, no. 2 (49), pp. 135–143.

20. Bogoyavlenskiy K. N., Grigor'ev A. K. *Opreделение mekhanicheskikh svoystv listovykh materialov dlya rascheta marshrutov kholodnogo deformirovaniya* [Determination of mechanical properties of sheet materials for calculating the routes of cold deformation]. *Trudy LPI; no. 222 «Obrabotka metallov davleniem»* [Proceedings of the LPI; no. 222 “Processing of metals by pressure”]. Moscow, Leningrad, Mashgiz Publ., 1963, pp. 135–139.

21. Bogoyavlenskiy K. N., Yasev D. M. *Raschet na prochnost' gnutyykh profiley s uchetom uprochneniya* [Calculation of the strength of bent profiles with account for the hardening]. *Trudy LPI; no. 222 «Obrabotka metallov davleniem»* [Proceedings of the LPI; no. 222 “Processing of metals by pressure”]. Leningrad, Mashgiz Publ., 1961, pp. 83–89.

22. Trishevskiy I. S. *Izmenenie mekhanicheskikh svoystv v protsesse profilirovaniya* [Change of mechanical properties in the process of profiling]. *Mekhanicheskie svoystva gnutyykh profiley prokata* [Mechanical properties of bent rolled profiles]. Kiev, Tekhnika Publ., 1977, pp. 58–61.

23. Nemkova I. S. *Statisticheskii analiz svoystv materiala i obosnovanie raschetnykh soprotivleniy gnutyykh profiley dlya stroitel'nykh metallicheskh konstruktsiy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Statistical analysis of the properties of the material and substantiation of the design resistance of cold-formed sections for construction metal structures. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1984, 165 p.

24. Arktikov G. A., Belyaev V. F., Gladshcheyn L. I. *Vliyaniye kholodnoy formovki na mekhanicheskikh svoystva stali zamknutykh gnutosvarnykh profiley kholodnoy formovki* [Influence of cold forming on mechanical properties of steel of closed bent-welded profiles of cold forming]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 1994, no. 5, pp. 16–24.