

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СЖАТЫХ ПОЛКАХ АРОЧНЫХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ ХОЛОДНОКАТАНЫХ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЛИСТОВ

С.А. Макеев, В.А. Горьковенко, Е. А. Сеитов, Л.Ф. Рахуба
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Стальные тонкостенные холодногнутые профили широко используются в строительстве. В арочных стальных холодногнутых профилях трапециевидного сечения остаточные нормальные напряжения, ориентированные вдоль профиля, возникают на стадии изготовления арочных заготовок из плоских профилированных листов и обусловлены технологическим процессом продольногогиба в холодном состоянии с вовлечением крайних зон профиля в пластическую стадию с разгрузкой без последующей термообработки. По предварительной оценке остаточные напряжения могут составлять при малых радиусах арочного профиля до одной трети от расчетного сопротивления листовой стали. В настоящее время остаточные технологические напряжения продольногогиба не учитываются при проектировании конструкций из тонкостенного продольно-гнутого проката трапециевидного сечения. Цель данной работы – разработка способа определения остаточных напряжений в сжатых полках арочных стальных тонколистовых холоднокатаных профилированных листов, обеспечивающего простоту методики измерений и расчета, достоверность и высокую точность полученных значений напряжений.

Материалы и методы. Произведен анализ ранее опубликованных материалов, выявлены преимущества и недостатки предыдущих исследований. Показаны преимущества предложенного метода определения остаточных технологических нормальных напряжений в сжатых полках арочного стального тонколистового профилированного проката.

Результаты. Сформирован новый способ выполнения разрезов сжатой полки и проведения измерений деформаций с целью дальнейшего определения остаточных нормальных напряжений в сжатых полках арочного стального тонколистового холоднокатаного профилированного проката. Предложенный способ в значительной степени упрощает существующую методику определения остаточных технологических нормальных напряжений в сжатых полках профиля, повышает точность измерения деформаций в сжатых полках профиля.

Обсуждение и заключение. Данный способ измерения деформация для определения остаточных технологических напряжений позволяет усовершенствовать существующие методы определения остаточных напряжений, упростить вычисления, а также повысить точность определения напряжений. В дальнейшем будет произведено численное моделирование технологического процессагиба арочных профилей, а также экспериментальная оценка адекватности предложенного способа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: остаточные нормальные напряжения, стальные тонколистовые холоднокатаные профилированные листы, физические параметры, продольныйгиб, способ измерения.

Поступила 29.01.2019, принята к публикации 17.12.2019.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Макеев С.А., Горьковенко В.А., Сеитов Е. А., Рахуба Л.Ф. Определение остаточных напряжений в сжатых полках арочных стальных тонколистовых холоднокатаных профилированных листов. Вестник СибАДИ. 2019;16(6): 758–765. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-758-765>

© Макеев С.А., Горьковенко В.А., Сеитов Е. А., Рахуба Л.Ф.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-758-765>

COMPRESSED FLANGES OF ARCHED STEEL THIN-WALLED COLD-ROLLED PROFILED SHEETS: DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES

Sergey A. Makeev, Viktor A. Gorkovenko, Erlan A. Seitov, Lilia F. Rahuba
Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. The construction sphere widely uses steel thin-walled cold-formed profiles. In arched steel cold-formed trapezoidal section profiles, residual normal stresses oriented along the profile occur at the stage of manufacturing arched blanks from flat profiled sheets and are caused by the cold bending process involving the extreme zones of the profile in the plastic stage with unloading without subsequent heat treatment. According to preliminary estimates, the residual stresses are up to one third of the calculated resistance of sheet steel at small radii of the arch profile. At present, the researchers do not take into account the residual technological stresses of the longitudinal bending when designing structures from thin-walled longitudinally bent rolled trapezoidal sections. The purpose of the paper is to develop a method for determining residual stresses in compressed flanges of arched steel thin-walled cold-rolled profiled sheets, which provides simplicity of the measurement and calculation methods, reliability and high accuracy of the obtained stress values.

Materials and methods. The authors made the analysis of previously published materials and identified the advantages and disadvantages of previous studies. Moreover, the authors showed the advantages of the proposed method for determining the residual technological normal stresses in compressed flanges of arched steel thin-rolled profiled steel.

Results. The researches formed a new method for making sections of a compressed shelf and measuring residual normal stresses in the compressed flanges of an arched steel sheet of cold-rolled profiled steel. The proposed method greatly simplified the existing method of determining residual technological normal stresses in compressed profile flanges, improved the accuracy of measuring normal stresses in compressed profile flanges.

Discussion and conclusions. The method of measuring residual process stresses allows improving existing methods for determining residual stresses, simplifying calculations, as well as improving the accuracy of stresses. In the future, the authors will make a numerical simulation of the bending arch profiles, as well as an experimental assessment of the adequacy of the proposed method.

KEYWORDS: residual normal stresses, light cold-rolled profile steel sheet, physical parameters, longitudinal bend, method of determining.

Submitted 29.01.2019, revised 17.12.2019.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Makeev Sergey A., Gorkovenko Viktor A., Seitov Erlan A., Rahuba Lilia F. Compressed flanges of arched steel thin-walled cold-rolled profiled sheets: determination of residual stresses *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6): 758–765 (in Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-758-765>

© Makeev S.A., Gorkovenko V.A., Seitov E.A., Rahuba L.F.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Стальные тонкостенные холодногнутые профили широко используются в строительстве [1, 2, 3, 4, 5], проводится большое количество как теоретических, так и экспериментальных исследований по тонкостенным конструкциям [6, 7, 8, 9, 10, 11]. В результате производственных процессов в данных холодногнутых профилях образуются остаточные напряжения [12, 13, 14, 15, 16]. В арочных стальных холодногнутых профилях трапециевидного сечения¹ остаточные нормальные напряжения, ориентированные вдоль профиля, возникают на стадии изготовления арочных заготовок из плоских профилированных листов и обусловлены технологическим процессом продольногогиба в холодном состоянии с вовлечением крайних зон профиля в пластическую стадию с разгрузкой без последующей термообработки. По предварительной оценке^{2,3} остаточные напряжения могут составлять при малых радиусах арочного профиля до одной трети от расчетного сопротивления листовой стали [17, 18]. В настоящее время остаточные технологические напряжения продольногогиба не учитываются при проектировании конструкций из тонкостенного продольно-гнутого проката трапециевидного сечения [19, 20, 21, 22, 23, 24]. При определенных условиях такой подход может привести к аварийным ситуациям: возможно обрушение конструкций, причинение вреда здоровью людей.

Таким образом, исследование остаточных технологических напряжений в арочных тонкостенных профилях, разработка методик расчета остаточных напряжений является на сегодняшний день актуальной задачей.

Задачей исследования стала разработка экспериментального способа определения остаточных нормальных напряжений в сжатых полках арочных стальных тонколистовых холоднокатаных профилированных листов, обеспечивающего простоту методики, досто-

верность и высокую точность полученных значений напряжений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Допустим, необходимо разработать арочный бескаркасный свод на базе тонкостенного продольно-гнутого проката трапециевидного сечения заданного радиуса. При изготовлении арочного профиля нужно задать параметры технологического оборудования, обеспечивающие получение необходимого радиусагиба $R_{\text{гиб}}$ после проката. При этом проектировщику для проведения статического расчета надо знать распределение остаточных технологических нормальных напряжений продольногогиба по высоте сечения профиля $\sigma_z(y)$ для учета этих напряжений при расчете профиля на прочность и местную устойчивость.

Остаточные напряжения являются интегрально уравновешенной системой внутренних сил в сечении, однако при нагружении складываются с напряжениями, вызванными внешними нагрузками.

Известны экспериментальные способы определения остаточных технологических напряжений путем замера деформаций при помощи проволочных тензорезисторов⁴, путем последовательного удаления слоев металла и замера деформаций стержня, вырезаемого из детали⁵, рентгеновским способом⁶.

В работе [25] предложен способ определения остаточных напряжений в арочных профилях. Сущность способа заключается в том, что полке с известным радиусом верхней поверхности полки арочного стального тонкостенного холодногнутого профиля с трапециевидными гофрами выполняют два базовых отверстия диаметром $d = 3-5$ мм, размещенных вдоль оси Z с расстоянием по дуге между собой $L_1 = 100-200$ мм и производится замер длины хорды s_1 между базовыми отверстиями. Далее, с симметричным охватом базовых отверстий, выполняется сквозной разрез П-образной формы в исследуемой

¹ ТУ 112-235-39124899-2005. Профили стальные гнутые арочные с трапециевидными гофрами / СибНИИстрой. Новосибирск, 2005. 18 с.

² Гришаев Н. А., Макеев С. А. К оценке остаточных напряжений в арочном прокате трапециевидного сечения // Материалы 63-й научно-технической конференции ГОУ «СибАДИ». Омск, 2009. Кн. 1. С. 23–27.

³ Гришаев Н. А. Экспериментальная оценка остаточных напряжений в арочном прокате трапециевидного сечения // Материалы 64-й научно-технической конференции ГОУ «СибАДИ» «Креативные подходы в образовательной научной и производственной деятельности». Омск, 2010. Кн. 2. С. 210–213.

⁴ Ванин В. А. Научные исследования в технологии машиностроения: учебное пособие / В. А. Ванин, В. Г. Однолько, С. И. Пестрецов, В. Х. Фидаров, А. Н. Колодин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. С. 122.

⁵ Пат. 2121666 РФ, МПК G01L1/06 (1998.11). Способ определения остаточных напряжений / Ю. И. Замашников.

⁶ Пат. 2390763 РФ, МПК G01N23/207 (2006.01). Способ определения локальной концентрации остаточных микронапряжений в металлах и сплавах / Л. Е. Алексеева, М. Е. Гетманова, Г. А. Филиппов, Е. Х. Шахпазов.

полке шириной $b = 8-12$ мм с последующим повторным замером длины хорды c_2 между базовыми отверстиями при фиксации вырезанной полосы в створе полки. По результатам измерений длин хорд c_1 и c_2 между базовыми отверстиями до и после выполнения П-образного разреза в полке определяют значения продольно ориентированных нормальных остаточных напряжений $\sigma_{z \text{ ост}}$ в полке арочного стального тонкостенного холодногнутого профиля с трапецевидными гофрами по формуле.

Из известных технических решений наиболее близким по совокупности существенных признаков к предлагаемому способу является способ⁷, основанный на том, что в выпуклой (сжатой) полке профиля выполняются сквозные разрезы в виде двух параллельных пропилов, ориентированных вдоль профиля с последующим измерением физических параметров (прогиба) и вычислением остаточных напряжений по формуле, полученной из адекватной математической модели.

Все вышеперечисленные способы обладают рядом недостатков, таких как сложность и

трудоемкость процесса измерения деформаций для определения остаточных напряжений, необходимость во владении специальными навыками и специальным оборудованием.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сущность предлагаемого способа экспериментального измерения деформаций для дальнейшего определения остаточных технологических напряжений заключается в следующем: в сжатой полке арочного стального тонколистового холоднокатаного профилированного листа, имеющего ширину B , выполняются сквозные разрезы в виде двух параллельных, ориентированных вдоль профиля, пропилов (например длина $2L_0$, $L_0 = 100$ мм), и сквозные разрезы в виде пропилов, ориентированных поперек профиля в середине расчетной длины и по краям, шириной b (рисунок 1). Прорезы выполняются при помощи лазерной⁸ либо гидроабразивной резки⁹.

За счет высвобождения сжимающих остаточных напряжений полуполосы L_0 удлиня-

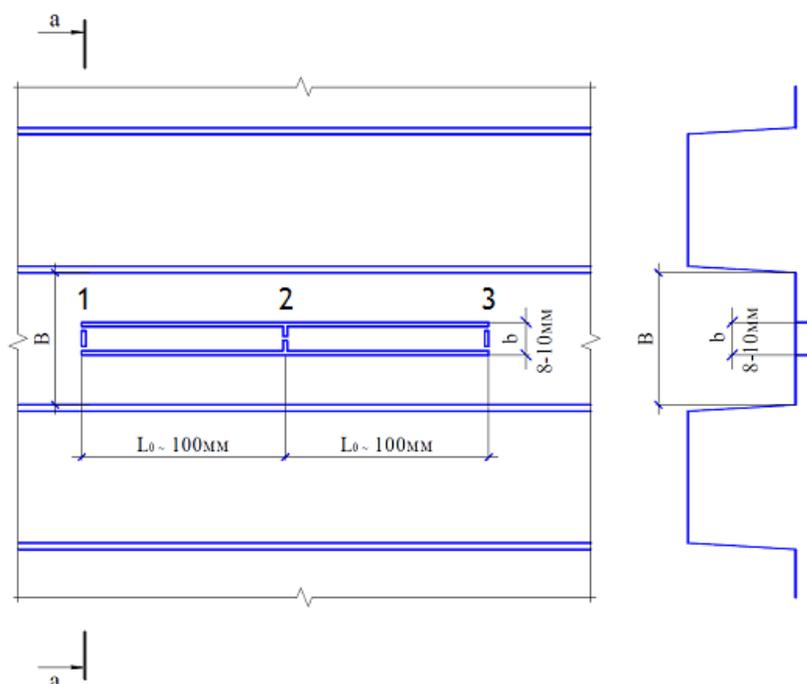


Рисунок 1 – Схема выполнения прорезей в сжатой полке арочного профилированного листа

Figure 1 – Scheme of the slots in the compressed shelf arched profiled steel sheet

⁷ Пат. 2455622 Российская Федерация, МПК G 01 L 1/06. Способ определения остаточных напряжений / С.А. Макеев, Д. А. Кузьмин, Н. А. Гришаев ; СибАДИ. № 2011105715/28 ; заявл. 15.02.2011 ; опубл. 10.07.2012. Бюл. № 19.

⁸ Григорьянц А. Г., Соколов А. А. Лазерная резка металлов. М. : Высш. шк., 1988. 127 с.

⁹ Пат. 2475350 РФ: МПК В 24С 1/00 (2006.01), В 24С 5/02 (2006.01), В 23К 26/42 (2006.01): Способ гидроабразивной резки листового металлического материала / А.А. Барзов, А.А. Лыгина [и др.] ; ГОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана». № 2010154316/02 ; заявл. 30.12.2010 ; опубл. 20.02.2013. Бюл. № 5.

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

ются. В результате таких деформаций образуются три пластических шарнира на концах полуполос 1, 2, 3 с образованием двухзвенного механизма 1-2, 2-3. При этом шарнир 2 получает некое перемещение Δ наружу относительно выпуклой поверхности полки (рисунки 2, 3).

Замерив величину Δ микрометром, можно в первом приближении, считая полуполосы прямолинейными в пределах образовавшихся длин L , определить остаточные напряжения σ_z в сжатой полке профиля. Следующим этапом можно уточнить найденные значения напряжений с учетом технологической кривизны полуполос.

На рисунке 3 представлен эскиз стального тонколистового холоднокатаного профилированного арочного листа на участке выполнения прорезей с указанием качественной картины распределения остаточных напряжений по высоте сечения профиля и поворотом механизма полуполос 1-2, 2-3, в результате которого шарнир 2 переместится на величину Δ .

Теоретический расчет остаточных технологических напряжений:

Абсолютное удлинение полуполосы после ее выреза

$$dL = L - L_0. \quad (1)$$

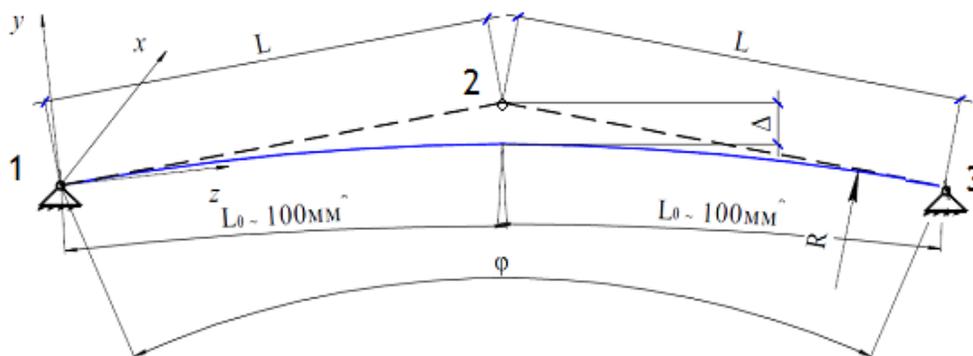


Рисунок 2 – Расчетная схема вырезанных пластин

Figure 2 – Design scheme of cut bands

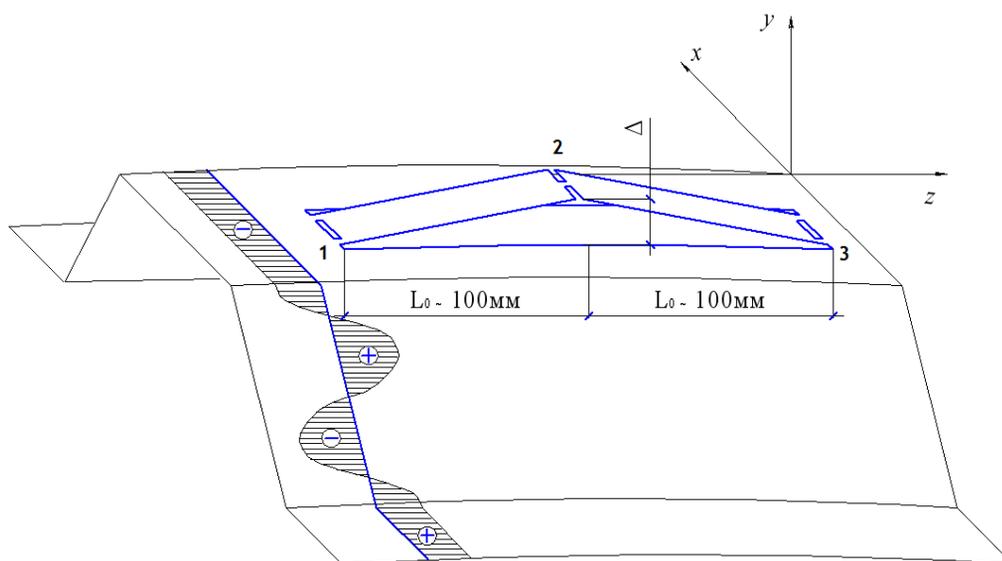


Рисунок 3 – Фрагмент стального арочного профилированного листа и эпюра распределения остаточных напряжений

Figure 3 – Fragment of an arched profiled steel sheet and a plot of residual stress distribution

Остаточные напряжения равны

$$\sigma_{z \text{ ост}} = -E \cdot \varepsilon_z, \quad (2)$$

где $\varepsilon_z = dL/L_0$ – относительные деформации, таким образом

$$\sigma_{z \text{ ост}} = -E \cdot \frac{L-L_0}{L_0}. \quad (3)$$

Величина L вычисляется по теореме Пифагора как гипотенуза прямоугольного треугольника с катетами L_0 и Δ :

$$L = \sqrt{L_0^2 + \Delta^2}. \quad (4)$$

Подставив (4) в формулу (3), получим первое приближение остаточных сжимающих напряжений в полке

$$\sigma_{z \text{ ост}} = -E \cdot \frac{\sqrt{L_0^2 + \Delta^2} - L_0}{L_0}. \quad (5)$$

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан экспериментальный способ определения остаточных нормальных напряжений в сжатых полках арочных стальных тонколистовых холоднокатаных профилированных листов. Данный способ позволяет определять остаточные напряжения в сжатой полке путем измерения фактических параметров деформаций вырезанных элементов.

2. Использование высокотехнологичных операций (выполнение прорезей лазером либо гидроструей) позволяет достаточно быстро, без использования специального оборудования, измерять деформации для дальнейшего определения остаточные напряжения в сжатых полках арочных холоднокатаных профилированных листах.

3. Для подтверждения достоверности и точности предлагаемого экспериментального способа необходимо произвести численное моделированиегиба арочных профилей, например в программе ANSYS Structures¹⁰, а также произвести экспериментальную оценку адекватности данного способа.

4. Данные о распределении расчетных остаточных технологических напряжений продольногогиба арочных прокатных профилей для практического диапазона радиусов строительных конструкций должны быть включены в

параметры сортамента арочных профилей наравне с геометрическими характеристиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жданов Д. А., Уласевич В. П. Бескаркасные арочные покрытия из стальных тонкостенных профилей: история, современное состояние и перспективы применения в Республике Беларусь // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. 2016. № 1 : Строительство и архитектура. С. 30–34.
2. Айрумян Э.Л., Каменщиков Н.И., Липленко М.А. Перспективы ЛСТК в России // СтройПРОФИ. 2013. № 10. С. 12–17.
3. Ведяков И. И., Соловьев Д. В., Арменский М. Ю. Новые типы бескаркасных зданий и перспективы их развития // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 10. С. 27–29.
4. Рудак А. В., Беляев Н. В. Ограждающие конструкции из тонколистового трапециевидного профиля // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2009. Вып. 3 (13). С. 40–45.
5. Красотина Л.В., Краснощеков Ю.В., Мосенкис Ю. М. Использование арочного профнастила при реконструкции зданий // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2009. № 14. С. 41–46.
6. Липленко М.А., Айрумян Э.Л. Особенности работы бескаркасных арочных покрытий из стальных холодногнутых профилей // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 6. С. 42–44.
7. Жданов Д. А., Уласевич В. П. К определению эффективных сечений стальных бескаркасных арочных покрытий по Еврокоду // Строительная наука и техника. 2013. № 2. С. 22–26.
8. Еремеев П.Г., Киселев Д.Б., Арменский М.Ю. К проектированию бескаркасных конструкций арочных сводов из холодногнутых тонколистовых стальных профилей // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2004. № 7. С. 2–3.
9. Красотина Л. В., Краснощеков Ю. В., Макеев С. А., Селиванов А. В. Результаты экспериментального поведения несущего арочного покрытия из трапециевидного профиля // Омский научный вестник. 2007. № 2 (56). С. 38–42.
10. Липленко М.А. Метод нагружения арочный конструкции при испытаниях // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 3 (254). С. 57–61.
11. Липленко М.А., Кунин Ю. С., Володин М. В. Экспериментальные исследования профилированного настила нового типа // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 6 (263). С. 67–76.
12. Quach W.M., Teng J.G., Chung K.F. Residual stresses in steel sheets due to coiling and uncoiling: a closed-form analytical solution // Engineering Structures. 2004. Vol. 26, Issue 9. P. 1249–1259. DOI: 10.1016/j.engstruct.2004.04.005.
13. Quach W.M., Teng J.G., Chung K.F. Residual stresses in press-braked stainless steel sections. I: Coiling and uncoiling of sheets // Journal of Constructional Steel Research. 2009. Vol. 65, Issue 8-9. P. 1803–1815. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.04.007.

¹⁰ ANSYS structures. URL: <https://www.ansys.com/products/structures> (дата обращения: 23.12.2018).

14. Quach W.M., Teng J.G., Chung K.F. Residual stresses in press-braked stainless steel sections. II: Press-braking operations // *Journal of Constructional Steel Research*. 2009. Vol. 65, Issue 8-9. P. 1816–1826. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.04.011.

15. Cristopher D. Moen, Takeru Igusa, Schafer B. W. Prediction of residual stresses and strains in cold-formed steel members // *Thin-Walled Structures*. 2008. Vol. 46, Issue 11. P. 1274–1289. DOI: 10.1016/j.tws.2008.02.002.

16. Jacques Rondal. Residual stresses in cold-rolled profiles // *Construction and Building Materials*. 1987. Vol. 1, Issue 3. P. 150–164. DOI: 10.1016/0950-0618(87)90016-X.

17. Makeev С. А., Колмаков Д. М. Моделирование остаточных напряжений в арочном тонкостенном прокате трапециевидного сечения // *Омский научный вестник*. 2014. № 1 (127). С. 69–73.

18. Makeev С. А., Гришаев Н. А. Численный анализ прочности и местной устойчивости арочных профилей трапециевидного сечения с учетом остаточных напряжений продольногогиба // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2010. № 2. С. 37–40.

19. Makeev С. А. [и др.]. Методы расчета и испытаний легких ограждающих конструкций: монография / Минобрнауки России, ОмГТУ. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. 124 с.: ил.

20. Холкин Е. Г., Соколовский З. Н. Методика расчета трапециевидных тонкостенных профилей с учетом местной потери устойчивости // *Омский научный вестник*. 2010. № 3. С. 50–53.

21. Уласевич В. П., Жданов Д. А. Деформационный расчет бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутому профилей // *Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Строительство и архитектура*. 2015. № 1 : С. 66–72.

22. Makeev С. А., Гришаев Н. А. Численное исследование местной устойчивости арочных профилей трапециевидного сечения // *Омский научный вестник*. 2010. № 1 (87). С. 93–97.

23. Кузьмин Д. А. Математическая модель тонкостенных связей в составе трехслойных цилиндрических покрытий // *Вестник СибАДИ: Научный рецензируемый журнал*. 2012. №4 (26). С. 41–48.

24. Рудак А. В., Makeev С. А. Математическая модель бескаркасного двухслойного арочного свода из холодногнутому тонколистовых стальных профилей // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2009. № 2. С. 1–6.

25. Сеитов Е. А., Makeev С. А. Способ определения остаточных напряжений в арочных профилях // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2019. Том 7, № 1. С. 146–153.

REFERENCES

1. Zhdanov D., Ulasevitch W. Beskarkasnoe arochnye pokrytiya iz stal'nyh tonkostennyh profilej istoriya, sovremennoe sostoyanie i perspektivy primeniya v Respublike Belarus' [Frameless arch coverings made of thin-walled steel profiles: history, current state and prospects of application in the Republic of Belarus]. *Vestn. Brest. gos. tekhn. un-ta*. 2016; 1: Stroitel'stvo i arhitektura: 30–34 (in Russian).

2. Liplenko M.A., Ayrumyan E.L., Kamenshchikov N.I. Perspektivy LSTK v Rossii [Prospects of lsts in Russia]. *StrojPROFI*, 2013; 10: 12–17 (in Russian).

3. Vedjakov I. I., Solov'ev D. V., Armenskij M. Ju. Novye tipy beskarkasnyh zdaniy i perspektivy ih razvitiya [New types and prospects of carless buildings]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2009; 10: 27–29. (in Russian).

4. Rudak A. V., Beljaev N. V. Ograzhdajushhie konstrukcii iz tonkolistovogo trapecievidnogo profi-lj [Enclosing structures of thin-sheet trapezoidal profile] *Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii*. 2009; 3 (13): 40–45 (in Russian).

5. Krasotina L.V., Krasnoshchekov Yu.V., Mosenkis Yu.M. Ispol'zovanie arochnogo profnastila pri rekonstrukcii zdaniy [Use of arched corrugated board during the reconstruction of buildings]. *Vestnik SibADI*. 2009; 4 (14): 41–45 (in Russian).

6. Liplenko M. A., Ayrumyan E.L. Osobennosti raboty beskarkasnyh arochnyh pokrytij iz stal'nyh holodnognutyh profilej [Features of work of frameless arch coverings from steel cold-formed profiles]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2011; 6: 42–44 (in Russian).

7. Zhdanov D. A., Ulasevich V. P. K opredeleniju jeffektivnyh sechenij stal'nyh beskarkasnyh arochnyh pokrytij po Evrokodu [To the definition of effective sections of steel arc-free arch coatings on the Eurocode]. *Stroitel'naja nauka i tehnika*. 2013; 2: 22–26. (in Russian).

8. Ereemeev P.G., Kiselev D.B., Armenskij M.Ju. K proektirovaniyu beskarkasnyh konstrukcij arochnyh svodov iz holodnognutyh tonkolistovyh stal'nyh profile [To design of arch-free structures of arched arches from cold-bent thin-sheet steel profiles]. *Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve*. 2004; 7: 2–3. (in Russian).

9. Krasotina L. V., Krasnoshekov Ju. V., Makeev S. A., Selivanov A. V. Rezul'taty jeksperimental'nogo povedeniya nesushhego arochnogo pokrytija iz trapecievidnogo profilja [Results of experimental behavior of bearing arch coating from trapezoidal profile]. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2007; 2 (56): 38–42. (in Russian).

10. Liplenko M.A. Metod nagruzheniya arochnyj konstrukcii pri ispytaniyah [Method of loading arch structure during tests]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*. 2014; 3 (254): 57–61. (in Russian).

11. Liplenko M.A., Kunin Ju. S., Volodin M. V. Jeksperimental'nye issledovaniya profilirovannogo nastila novogo tipa [Experimental studies of profiled flooring of new type]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*. 2015; 6 (263): 67–76 (in Russian).

12. Quach W. M., Teng J. G., Chung K. F. Residual stresses in steel sheets due to coiling and uncoiling: a closed-form analytical solution. *Engineering Structures*. 2004; 26, iss. 9: 1249–1259. DOI: 10.1016/j.engstruct.2004.04.005.

13. Quach W. M., Teng J. G., Chung K. F. *Residual stresses in press-braked stainless steel sections. I: Coiling and uncoiling of sheets*. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009; 65, iss. 8–9: 1803-1815. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.04.007.

14. Quach W. M., Teng J. G., Chung K. F. *Residual stresses in press-braked stainless steel sections. II: Press-braking operations*. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009; 65, iss. 8–9: 1816-1826. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.04.011.

15. Cristopher D. Moen, Takeru Igusa, Schafer B. W. *Prediction of residual stresses and strains in cold-formed steel members*. *Thin-Walled Structures*. 2008; 46, iss. 11: 1274–1289. DOI: 10.1016/j.tws.2008.02.002.

16. Jacques Rondal. *Residual stresses in cold-*

rolled profiles. Construction and Building Materials, 1987; 1, iss. 3: 150–164. DOI: 10.1016/0950-0618(87)90016-X.

17. Makeev S.A., Kolmakov D.M. Modelirovanie ostatochnykh napryazhenij v arochnom tonkostennom prokate trapecievidnogo secheniya [Modeling of residual stresses in arched thin-walled rolling of a trapezoidal section]. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2014; 1 (127): 69–73 (in Russian).

18. Makeev S A, Grishaev N A Chislennyj analiz prochnosti i mestnoj ustojchivosti arochnykh profilej trapecievidnogo secheniya s uchetom ostatochnykh napryazhenij prodol'nogo giba [Numerical analysis of strength and local stability of trapezoidal arched profiles taking into account residual stresses of longitudinal bending]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 2010; 2: 37–40 (in Russian).

19. Makeev S A et al. *Metody rascheta i ispytaniy legkih ograzhdayushchih konstrukcij* [Methods of calculation and testing of light enclosure structures]. OmSTU, 2016, 124 p (in Russian).

20. Kholkin E.G., Sokolovskiy Z.N. Metodika rascheta trapecievidnykh tonkostennykh profilej s uchetom mestnoj poteri ustojchivosti [Design of trapezoid thin-walled profiles taking into account local loss of stability]. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2010; 3: 50–53 (in Russian).

21. Ulasevich V. P., Zhdanov D. A. Deformacionnyj raschet beskarkasnykh arochnykh pokrytij iz stal'nykh tonkostennykh holodnognutyh profilej [Deformation calculation of cartless arch coatings made of steel thin-walled cold-bent profiles]. *Vestn. Brest. gos. tehn. un-ta. Stroitel'stvo i arhitektura*. 2015; 1: 66–72. (in Russian).

22. Makeev S. A., Grishaev N. A. Chislennoe issledovanie mestnoj ustojchivosti arochnykh profilej trapecievidnogo secheniya [Numerical study of local stability of arched profiles of trapezoidal section]. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2010; 1 (87): 93–97 (in Russian).

23. Kuz'min D. A. Matematicheskaja model' tonkostennykh svyazej v sostave trehslojnykh cilindricheskikh pokrytij [Mathematical model of thin-walled bonds in the composition of three-layer cylindrical coatings]. *Vestnik SibADI*. 2012; 4 (26): 41–48 (in Russian).

24. Rudak A. V., Makeev S. A. Matematicheskaja model' beskarkasnogo dvuh-slojnogo arochnogo svoda iz holodnognutyh tonkolistovykh stal'nykh profilej [Mathematical model of a double-layer arch-free vault of cold-bent thin-sheet steel profiles]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*. 2009; 2: 1–6 (in Russian).

25. Seitov E. A., Makeev S. A. Sposob opredelenija ostatochnykh napryazhenij v arochnykh profiljah [Method of determining residual stresses in arch profiles]. *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin*. 2019; 7, № 1: 146–153 (in Russian).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Makeev C. A. Рекомендации по исследованию материалов. Формирование разделов: «Результаты» (1/2). Проверка статьи.

Горьковенко В. А. Исследование и анализ материалов. Формирование разделов: «Материалы и методы» (1/2), «Обсуждение и заключение» (1/2).

Сеитов Е. А. Исследование и анализ материалов. Формирование разделов: «Введение»,

«Материалы и методы» (1/2), «Результаты» (1/2). *Корректировка статьи*.

Рахуба Л. Ф. Формирование разделов: «Аннотация», «Обсуждение и заключение» (1/2).

AUTHORS' CONTRIBUTION

Sergey A. Makeev – recommendations for the study of materials; formation of the “Results” (1/2) sections.

Viktor A. Gorkovenko – research and analysis of materials; formation of the “Materials and methods” (1/2), “Discussion and conclusions” (1/2) sections.

Erlan A. Seitov – research and analysis of materials; formation of the “Introduction”, “Materials and methods” (1/2), “Results” (1/2) sections.

Lilia F. Rahuba – formation of the “Abstract”, “Discussion and conclusions” (1/2) sections.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Makeev Сергей Александрович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные конструкции», ORCID: 0000-0002-2915-982X, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: makeev608079@mail.ru).

Виктор Александрович Горьковенко – аспирант кафедры «Строительные конструкции», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: otlichnik594@mail.ru).

Сеитов Ерлан Ахтамович – аспирант кафедры «Строительные конструкции», ORCID: 0000-0002-7287-0940, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: simbaev92@mail.ru*).

Рахуба Лилия Федоровна – канд. пед. наук, доц. кафедры «Иностранные языки», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: lira_omsib@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. Makeev – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department of Building Construction, ORCID: 0000-0002-2915-982X, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: makeev608079@mail.ru).

Viktor A. Gorkovenko – Postgraduate Student, Department of Building construction, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: otlichnik594@mail.ru).

Erlan A. Seitov – Postgraduate Student, Department of Building construction, ORCID: 0000-0002-7287-0940, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: simbaev92@mail.ru*).

Lilia F. Rahuba – Cand. of Sci. (Pedagogical), Associate Professor of the Foreign Languages Department, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: lira_omsib@mail.ru).