Исследование напряженно-деформированного состояния болтового узла соединения из холодногнутых тонкостенных профилей

И.Л. Кузнецов, М.А. Салахутдинов, Р.Г. Гайнетдинов

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ);
420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

АННОТАЦИЯ

Введение: холодногнутые тонкостенные профили с частью вогнутой плоской стенки используются при изготовлении стропильных ферм. В данных фермах соединение между поясами и решеткой выполняется посредством листовых фасонки, которые крепятся болтами. Учитывая форму профилей, болты могут быть установлены лишь в два крайних ряда, при этом их стенка в месте плоской вогнутости не может быть плотно соединена с фасонкой, поэтому действительная работа таких узлов требует исследований.

Цель работы — численное и экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) узла соединения из холодногнутых тонкостенных профилей с частью вогнутой плоской стенки при установке двух рядов болтов.

Материалы и методы: для проведения натурных испытаний использованы спаренные холодногнутые профили с частью вогнутой плоской стенки, соединенные при помощи фасонки на болтах. Компьютерное моделирование и расчет выполнены в программном комплексе SolidWorks. Проведено испытание узла с двумя рядами болтов.

Результаты: проведенные расчеты и натурные испытания болтового узла соединения показали, что усилия в болтах и в профилях изменяются. Предложено исключить зазор между стенками холодногнутых профилей и листовой фасонкой, что позволит установить увеличенное число рядов болтов и уменьшить напряжения в тонкостенном профиле узла соединения.

Выводы: определено, что установка только двух рядов болтов в узле соединения тонкостенных профилей с частью вогнутой плоской стенки ухудшает их НДС. При заполнении вогнутого участка стенки листовой сталью можно увеличить число рядов установки болтов при уменьшении их количества, повышая несущую способность холодногнутого тонкостенного профиля и узла в целом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: компьютерное моделирование, болтовой узел, холодногнутый тонкостенный профиль, натурные испытания, листовая фасонка, усиливающий элемент, экспериментальные исследования

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А., Гайнетдинов Р.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния болтового узла соединения из холодногнутых тонкостенных профилей // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 7. С. 831–843. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.831-843

Investigation of the stress-deformation state of a bolt-joint assembly of cold-bent thin-walled profiles

Ivan L. Kuznetsov, Marat A. Salakhutdinov, Rishat G. Gainetdinov

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE);
1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: cold-bent profiles with a segment of the concave flat wall are used for manufacturing trusses. In these trusses, the connection between the chords and the webbing is made using gusset plates attached with bolts. Due to the shape of these profiles, the bolts can only be installed in two outer rows. While the profile wall at the place of flat concavity cannot be tightly connected with the gusset plate, so the actual work of such joints is to be studied. The aim of the study is numerical and experimental research of the stress-deformation state of the attachment of a cold-bent thin-walled profile with a segment of the concave flat wall using two rows of bolts.

Materials and methods: paired cold-bent profiles with a segment of the concave flat wall connected utilizing bolted gusset plate were used for full-scale tests. Computer simulation and calculation were performed using the SolidWorks software. An examination of the assembly with two rows of bolts was carried out.

Results: calculations and full-scale tests of the bolted assembly showed the variation of the forces in the bolts and profiles. It is suggested to eliminate the gap between the walls of cold-bent profiles and gusset plates that allows installing an increased number of bolt rows and reducing stresses in the thin-walled profile of the joint.

Conclusions: the results of the study showed that the installation of only two rows of bolts in the joint of thin-walled profiles with a segment of the concave flat wall worsens their stress-deformation state. When filling the concave segment of the wall with sheet steel pieces, it is possible to increase the number of bolt rows and reduce the number of the bolts, increasing the bearing capacity of the cold-bent thin-walled profile and the joint as a whole.

KEYWORDS: computer simulation, bolt joint, cold-bent thin-walled profile, full-scale test, gusset plate, reinforcing element, experimental research

FOR CITATION: Kuznetsov I.L., Salakhutdinov M.A., Gainetdinov R.G. Investigation of the stress-deformation state of a bolt-joint assembly of cold-bent thin-walled profiles. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(7):831-843. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.831-843

ВВЕДЕНИЕ

В современной практике строительства широко используются фермы из тонкостенных профилей [1–4]. Фермы изготавливаются из холодногнутых тонкостенных профилей, соединенных в узлах при помощи болтов [5–8] и листовых фасонки [9–11]. Применение большого количества болтов, увеличение габаритов фасонки является причиной повышенной трудоемкости изготовления и монтажа таких конструкций, особенно узловых соединений верхнего пояса, где возникают сжимающие усилия. Согласно работам [13–14] узлы соединения верхнего пояса фермы представляют особый интерес.

Для изготовления верхнего пояса фермы используются спаренные тонкостенные профили с частью вогнутой плоской стенки, обеспечивающей ее местную устойчивость [15–18]. Поскольку верхний пояс фермы выполнен с уклоном и из элементов заданной длины, то в ее центре предусматривают соединяющий узел, включающий концы профилей, листовую фасонку и болты. Однако стенки профилей в зоне их плоской вогнутости не соприкасаются с листовой фасонкой. Поэтому болты могут быть установлены по двум рядам вблизи углов профилей, где происходит контакт с фасонкой. В этом случае возможен шаг болтов только вдоль профиля, при этом шаг болтов поперек сечения не может быть выполнен, так как это расстояние занято вогнутым плоским участком стенки. Именно в этой зоне не происходит контакт с листовой фасонкой, поэтому организация полного болтового крепления невозможна.

Учитывая существующие решения узлов соединений, разработаны методики расчета тонкостенных холодногнутых профилей и рекомендации по их усилению [19–21].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для численного и экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) рассмотрен опытный образец — болтовой узел соединения (рис. 1), который является близким по конструктивному исполнению к центральному узлу верхнего пояса стропильной фермы пролетом 24 м. Описание применяемых профилей и геометрические параметры фермы приведены в статье [3]. Этот узел состоит из двух профилей АСГ-400-100-30-4.0 согласно ТУ 1122-023-129063390-2009 длиной 400 мм из стали класса С350. Профили по верху соединены объединяющим стальным листом размерами 400 × 240 × 16 мм на сварке. Крепление профилей между собой и фасонкой выполнено болтами М16 класса прочности 5,8 двумя рядами. В каждом ряду расположено семь болтов с шагом 50 мм. Между профилями установлена листовая фасонка толщиной 16 мм из стали класса С245. Данная фасонка соединена по низу опорной пластиной 400 × 100 × 16 мм.

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В первом приближении расчетная нагрузка, прикладываемая к узлу, принята исходя из минимальной несущей способности болтов на срез или на смятие.

Несущая способность одного болта на срез: $N_{bs} = R_{bs} \cdot A_b \cdot n_s \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c = 2000 \cdot 2,01 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,9 = 7236$ кг, где R_{bs} — расчетное сопротивление болта на срез; A_b — площадь сечения стержня болта; n_s — число расчетных срезов одного болта; γ_b — коэффициент условий работы болтового соединения; γ_c — коэффициент условий работы.

Несущая способность одного болта на смятие: $N_{bp} = R_{bp} \cdot d_b \cdot \Sigma t \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c = 6450 \cdot 1,6 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 =$

Рис. 1. Опытный образец болтового узла соединения

Fig. 1. Test specimen of bolted joint

$= 8256$ кг, где R_{bp} — расчетное сопротивление смятию соединяемых элементов болтами класса точности В; d_p — наружный диаметр болта; Σt — наименьшая суммарная толщина соединяемых элементов, сминаемых в одном направлении.

Основываясь на предположении, что усилие в болтовом соединении распределяется равномерно, расчетная нагрузка на узел будет равна: $N = 14 \cdot N_{bmin} = 14 \cdot N_{bs} = 14 \cdot 7236 = 101\,304$ кг = 101,304 т.

Рис. 2. Конечно-элементная модель болтового узла соединения

Fig. 2. Finite element model of bolted joint

Для определения возникающих напряжений в профиле и усилий в болтах создана модель узла в программном комплексе SolidWorks (рис. 2).

Расчет модели узла выполнялся в программном модуле SolidWorks Simulation с учетом геометрической и физической нелинейности. Модель узла разбивалась на прямоугольные и треугольные конечные элементы с размерами 20×22 мм. В результате при узловой нагрузке $N = 101,304$ т в крайних нижних узлах болтов возникает усилие — 11599,31 кг, а в верхних — 6801,16 кг. Видно, что нижние болты нагружаются больше, чем верхние, при этом превышена несущая способность болтов на срез. Выполнено уточнение расчетной нагрузки на узел $N = \frac{7236}{11599,308} \cdot 101\,304 = 63196$ кг = 63,2 т. Графики распределения напряжений от расчетной нагрузки по высоте тонкостенного холодногнутого профиля в характерных сечениях показаны на рис. 3.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проведены в НОЦ «Прочность» КГАСУ. Для определения НДС болтового узла соединения установлено 11 тензочувствительных датчиков ВЕ-120-10АА(11) в характерных местах, которые соединяются с тензостанцией National Instruments NI cDAQ-9188, которая в свою очередь подключается к персональному компьютеру, где через программу NI LabVIEW 2015 проходит обработка данных НДС болтового узла соединения. Загружение выполняется прессом ASTM-Digital.

Рис. 3. Распределение напряжений по сечению профиля: *a* — сечение по верхним болтам (1–1); *b* — сечение по средним (2–2); *c* — сечение по нижним болтам (3–3), где по оси абсцисс узлы конечно-элементной модели, по которым определялись значения напряжений: 3, 19 — напряжения под болтами; 10, 11, 12 — напряжения в стенке по высоте профиля; напряжения в полках сечения профиля не показаны, их значения примерно равны величине крайних узлов

Fig. 3. Stress distribution across profile cross-section: *a* — section at upper bolts (1–1); *b* — section at medium bolts (2–2); *c* — section at lower bolts (3–3); where the abscissa axis shows the finite element model nodes by which the stress values were determined: 3, 19 — stresses under bolts; 10, 11, 12 — stresses in the middle of profile height. Stresses in the profile cross-section flanges are not shown; their values are approximately equal to the values at the extreme nodes

Рис. 4. Испытание болтового узла соединения

Fig. 4. Test of bolted joint

Скорость движения штока пресса, прикладываемая нагрузка регулируются и задаются при помощи программы Testing_M-auto. Перемещения холодногнутого профиля болтового узла соединения замерялись двумя индикаторами часового типа с ценой

деления 0,01 мм и величиной перемещения штока пресса (рис. 4).

По результатам испытания получен график зависимости перемещения штока пресса L , мм, и узловой нагрузки N , кН (рис. 5).

Рис. 5. График зависимости перемещения штока пресса L , мм, от узловой нагрузки N , кН, на прессе ASTM-Digital

Fig. 5. Dependence graph of press stock travel L , mm, on nodal load N , kN, in ASTM-Digital press

Рис. 6. Потеря устойчивости стенки холодногнутого профиля

Fig. 6. Loss of stability of cold-bent profile wall

Разрушение болтового узла соединения произошло в результате потери местной устойчивости стенки профиля выше зоны расположения верхних болтов при нагрузке $N = 97,6$ т, что в 1,54 раза больше расчетной нагрузки (рис. 6). Такая потеря устойчивости узла точно не объясняется проведенными расчетами, что требует специального рассмотрения, так как разрушение похожих узлов произошло в фермах [2, 5], а также согласно работе [10] известно влияние начальных дефектов на расчетную несущую способность. Перемещение холодногнутого профиля узла по показаниям левого и правого индикатора равно 1,0 и 1,1 мм, в то время как перемещение штока пресса показано на рис. 5.

Тензометрические датчики на протяжении всего испытания фиксировали изменения напряжений. Согласно полученным данным построены графики распределения напряжений по высоте профиля по сечениям верхних, средних и нижних болтов при нагрузке $N = 63,2$ т (рис. 7). Датчики 3, 4, 7 и 11 установлены не по оси установки болтов, а смещены несколько в сторону середины профиля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ графиков распределения напряжений показывает, что в местах установки болтов в верхней части узла усилия меньше, а в нижней больше. Однако в верхней части сечения стенки профиля узла усилия больше, чем в нижней. Из этого следует, что необходимо установить дополнительные ряды болтов в зоне плоской вогнутости стенки профиля для более равномерного восприятия возникающих усилий в сечении от действующей нагрузки. Следует отметить, что рассмотренный опытный образец болтового узла соединения (созданный аналогично центральному узлу верхнего пояса стропильной фермы) противоречит требованиям СП 16.13330.2017, где в п. 14.2 регламентированы максимальные и минимальные расстояния между отверстиями соединения. В нашем случае минимальное расстояние должно быть: $2,5 \cdot d = 2,5 \cdot 17 = 42,5$ мм, где $d = d_b + 1 = 17$ мм — диаметр отверстия, d_b — диаметр болта; максимальное расстояние: $18 \cdot t = 18 \cdot 4 = 72$ мм, где t — толщина наиболее

Рис. 7. Распределение напряжений по высоте профиля по данным тензометрических датчиков: *a* — по верхним; *b* — по средним; *c* — по нижним болтам, где 4–18 — узлы по численному расчету (рис. 3), 1'–11' — тензометрические датчики и их показания (рис. 6)

Fig. 7. Stress distribution by profile height according to tension sensor readings: *a* — in upper bolts; *b* — in medium bolts; *c* — in lower bolts; where 4–18 are nodes by numerical calculation (see Fig. 3), 1'–11' are tension sensors and their readings (see Fig. 6)

Рис. 8. Усиленное болтовое узловое соединение: 1 — листовая фасонка; 2 — усиливающий элемент из листовой стали
Fig. 8. Reinforced bolted joint: 1 — gusset plate; 2 — the reinforcing element of sheet steel

Рис. 9. Напряженно-деформированное состояние болтового узла соединения при многорядной установке болтов
Fig. 9. Stress-deformation state of bolt joint for multi-row bolt installation

Рис. 10. Распределение напряжений по сечению профиля при многорядной постановке болтов: *a* — по сечению 1–1; *b* — по верхним болтам 2–2; *c* — по нижним болтам 3–3 (рис. 9), где в сечениях 3, 8, 12, 16, 20 — напряжения под болтами

Fig. 10. Stress distribution across profile cross-section for multi-row bolt installation: *a* — in cross-section 1–1; *b* — in upper bolts 2–2; *c* — in lower bolts 3–3 (see Fig. 9) where 3, 8, 12, 16, 20 are stresses under bolts in corresponding sections

тонкого наружного элемента. Однако в фактическом исполнении для рассмотренного узла расстояние между болтами составляет 336 мм. Вышеуказанные требования СП для узла (рис. 1) не могут выполняться, так как в стенке холодногнутого профиля имеется плоский вогнутый участок, где исключена постановка болтов.

Для того чтобы выполнить постановку болтов в зоне плоской вогнутости стенки, предложено установить усиливающий элемент из листовой стали, что позволит исключить зазор между фасонкой и стенкой холодногнутого профиля (рис. 8). Предложенное исполнение узла позволяет уменьшить число болтов и длину листовой фасонки и улучшить работу холодногнутого профиля.

Установка дополнительных рядов болтов в зоне плоской вогнутости показала, что напряжения в крайних рядах снижаются. Происходит выравнивание напряжений за счет установки болтов в стенке сечения профиля. Это означает, что холодногнутый профиль по всей длине и высоте воспринимает усилия более равномерно. Также достигается экономический эффект при выполнении многорядного расположения болтов за счет сокращения длины фасонки и количества болтов (рис. 9).

Распределение напряжений по высоте холодногнутого профиля с частью вогнутой плоской стенки усиленной стальными пластинами при многорядной постановке болтов приведено на рис. 10.

Анализ напряжений (рис. 10) показывает, что несущая способность данного узла соединения при двухрядном горизонтальном расположении и пятирядном вертикальном расположении болтов примерно равна $N = 63,2$ т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При болтовом узле соединения двух тонкостенных холодногнуемых профилей с частью вогнутой плоской стенки возможна установка только двух рядов болтов в зоне контакта профилей. Такая постановка болтов приводит к изменению НДС, в верхних болтах узла возникают минимальные напряжения, а в нижних — максимальные. В стенке профиля узла, наоборот — сверху действуют максимальные напряжения, а в нижней части минимальные. Если несущую способность одного болта умножить на их количество, то определится величина расчетной нагрузки на узел соединения. Однако это далеко не так, напряжения под болтами распределяются неравномерно, а именно, как это показано в исследовании в нижних болтах отмечаются максимальные, а в верхних — минимальные значения. Поэтому, чтобы определить несущую способность узла соединения нужно узнать напряжение в профиле по нижним болтам при заданном их количестве. Это напряжение должно создать расчетную несущую способность узла. Экспериментальные исследования подтвердили и показали, что в узловом соединении нижние болты ряда наиболее нагружены, а верхние менее. При этом сокращения количества болтов можно достичь при увеличенном числе их рядов, согласно нормативным данным расстояние между рядами болтов не более $12d$ или $18t$. Для увеличения числа рядов болтов необходимо исключить зазор в пределах вогнутого плоского участка стенки за счет установки стальных листовых пластин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айрумян Э.Л., Белый Г.И. Исследования работы стальной фермы из холодногнуемых профилей с учетом их местной и общей устойчивости // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 5. С. 41–44.
2. Зверев В.В., Семенов А.С. Влияние податливости болтовых соединений на деформативность фермы из тонкостенных гнутых профилей // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. № 2 (10). С. 9–17.
3. Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А., Гайнетдинов Р.Г. Стенд и результаты испытания фермы пролетом 24 м со стержнями из оцинкованных холодногнуемых профилей // Известия КГАСУ. 2018. № 4 (46). С. 193–199.
4. Je Chenn Gan, Jee Hock Lim, Siong Kang Lim, Horng Sheng Lin. Experimental study on the effect of heel plate thickness on the structural integrity of cold-formed steel roof trusses // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 431. Pp. 1–9. DOI: 10.1088/1757-899X/431/1/112009
5. Предотвращение аварий зданий и сооружений // PAMAG.RU : ежедн. интернет-изд. 2009. URL: <http://prevdis.ru/naturnye-ispytaniya-stropilnoj-fermy-iz-tonkostennyh-holodnognutyh-profilej.html> (дата обращения: 15.03.2019).
6. Колесов А.И., Лапшин А.А., Ямбаев И.А., Морозов Д.А. Опытные исследования стальных ферм из тонкостенных холодногнуемых профилей на самонарезающих винтах // Приволжский научный журнал. 2013. № 4 (28). С. 15–19.

7. *Elkersh I.* Experimental investigation of bolted cold formed steel frame apex connections under pure moment // *Ain Shams Engineering Journal*. 2010. Vol. 1. Issue 1. Pp. 11–20. DOI: 10.1016/j.asej.2010.09.002
8. *Кузнецов И.Л., Фахрутдинов Р.Р., Рамазанов Р.Р.* Результаты экспериментальных исследований работы соединений тонкостенных элементов на сдвиг // *Вестник МГСУ*. 2016. № 12. С. 34–43. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.34-43
9. *Žilvinas B., Gintas Š.* The behavior of cold formed steel structure connections // *Engineering Structures and Technologies*. 2014. Vol. 5. Issue 3. Pp. 113–122. DOI: 10.3846/2029882X.2013.869416
10. *Жидков К.Е., Семенов А.С.* Совершенство конструктивных решений ферм из тонкостенных холодногнутых профилей // *Прикладные и фундаментальные исследования : XIII Междунар. науч. конф., 9–10 декабря, 2017, Сент-Луис, Миссури, США*. С. 79–83.
11. *Rahima Umami Kulsum Nadya, Fathoni Usman.* Bolted connection of cold-formed steel section — a review // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. No. 17. Pp. 4737–4745.
12. *Корсун Н.Д., Простакишина Д.А.* Анализ НДС составного сечения из тонкостенных профилей с учетом начальных геометрических несовершенств // *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. 2018. № 4. С. 83–88.
13. *Кузнецов И.Л., Гайнетдинов Р.Г.* Центральный узел верхнего пояса стропильной фермы из стержней холодногнутого профиля // *Известия КГАСУ*. 2019. № 1 (47). С. 140–146.
14. *Жидков К.Е., Зверев В.В., Семенов А.С., Стуканев Ю.Л.* Повышение несущей способности узловых соединений конструктивных элементов ферм // *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. 2015. № 4. С. 88–90.
15. *Anna Green Antony.* Cold formed steel sigma section joints // *International journal of Innovative research in technology*. 2016. Vol. 3. Pp. 231–237.
16. *Anna Green Antony.* Study on cold formed steel sigma sections and the effect of stiffeners // *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2016. Vol. 5. Issue 9. Pp. 16249–16255. DOI: 10.15680/IJRSET.2016.0509084
17. *Gendy B.L., Hanna M.T.* Effect of geometric imperfections on the ultimate moment capacity of cold-formed sigma-shape sections // *HBRC Journal*. 2017. Vol. 13. Issue 2. Pp. 163–170. DOI: 10.1016/j.hbrj.2015.04.006
18. *Rzeszut K., Szewczak I.* Experimental studies of sigma thin-walled beams strengthen by CFRP tapes // *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Structural and Construction Engineering*. 2017. Vol. 11. No. 7. Pp. 888–895.
19. *Ведяков И.И., Одесский П.Д., Соловьев Д.В.* Несущая способность болтовых соединений легких конструкций из холодногнутого профиля малых толщин // *Промышленное и гражданское строительство*. 2010. № 3. С. 19–22.
20. *Белый Г.И.* К расчету на устойчивость стержневых элементов конструкций из тонкостенных холодногнутого профиля // *Вестник гражданских инженеров*. 2016. № 3 (56). С. 46–51.
21. *Кунин Ю.С., Колесов А.И., Ямбаев М.А., Морозов Д.А.* Усиление и расчет стальных конструкций из тонкостенных холодногнутого профиля с учетом податливости узловых соединений // *Вестник МГСУ*. 2012. № 11. С. 74–81. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.11.74-81

Поступила в редакцию 9 апреля 2019 г.

Принята в доработанном виде 20 мая 2019 г.

Одобрена для публикации 24 июня 2019 г.

О Б АВТОРАХ: **Иван Леонидович Кузнецов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлических конструкций и испытаний сооружений; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; kuz377@mail.ru;

Марат Айдарович Салахутдинов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических конструкций и испытаний сооружений; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; lider-kazann@yandex.ru;

Ришат Габдулхаевич Гайнетдинов — магистр кафедры металлических конструкций и испытаний сооружений; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; rishat.gajnetdinov@bk.ru.

REFERENCES

1. Ayrumyan E.L., Belyy G.I. Investigations of the work of a steel truss from cold-formed profiles taking into account their local and general stability. *Industrial and Civil Engineering*. 2010; 5:41-44. (rus.).
2. Zverev V.V., Semenov A.S. Influence of bolted connections compliance on deformability of girder made from slender roll-formed sections. *Scientific Bulletin of Voronezh state University of architecture and construction. Construction and architecture*. 2008; 2(10):9-17. (rus.).
3. Kuznetsov I.L., Salakhoutdinov M.A., Gainetdinov R.G. Stand and test results of a 24m span truss with elements of galvanized cold-formed profiles. *News of the KSUAE*. 2018; 4(46):193-200. (rus.).
4. Je Chenn Gan, Jee Hock Lim, Siong Kang Lim, Horng Sheng Lin. Experimental study on the effect of heel plate thickness on the structural integrity of cold-formed steel roof trusses. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 431:1-9. DOI:10.1088/1757-899X/431/11/112009
5. Preventing accidents of buildings and structures. *PAMAG.RU : daily. internet-edit*. 2010. URL: <http://prevdis.ru/naturnye-ispytaniya-stropilnoj-fermy-iz-tonkostennyh-holodnognutyh-profilej.html> (reference date: 15.03.2019). (rus.).
6. Kolesov A.I., Lapshin A.A., Yambaev I.A., Morozov D.A. Experimental studies of thin-walled steel trusses of cold-formed profiles on self-tapping screws. *The Privolzhsky Scientific Journal*. 2013; 4(28):15-19. (rus.).
7. Elkersh I. Experimental investigation of bolted cold formed steel frame apex connections under pure moment. *Ain Shams Engineering Journal*. 2010; 1(1):11-20. DOI: 10.1016/j.asej.2010.09.002
8. Kuznetsov I.L., Fakhrutdinov A.E., Ramazanov R.R. Results of experimental research for shear strain of connections of thin-walled elements. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 12:34-43. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.34-43 (rus.).
9. Žilvinas B., Gintas Š. The behavior of cold formed steel structure connections. *Engineering Structures and Technologies*. 2013; 5(3):113-122. DOI: 10.3846/2029882X.2013.869416
10. Zhidkov K.E., Semenov A.S. The improvement of girders from thin-walled cold-formed profiles. *Applied and Fundamental Studies, December 9-10, 2017, St. Louis, Missouri, USA*. 2017; 79-83. (rus.).
11. Rahima Umami Kulsum Nadya, Fathoni Usman. Bolted connection of cold-formed steel section — a review. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018; 13(17):4737-4745.
12. Korsun N.D., Prostakishina D.A. Structural analysis of stress and strain state of paired thin-walled section with initial geometric Imperfections. *Academic Bulletin UralNIIproekt of RASN*. 2018; 4: 83-88. (rus.).
13. Kuznetsov I.L., Gainetdinov R.G. The central node of the upper belt truss from rods cold-formed profile. *News of the KSUAE*. 2019; 1(47):140-146. (rus.).
14. Zhidkov K.E., Zverev V.V., Semenov A.S., Stukanov Y.L. Increasing of the load bearing capacity of the nodal connections of structural elements of the trusses made. *Academic Bulletin UralNIIproekt of RASN*. 2015; 4:88-90. (rus.).
15. Anna Green Antony. Cold formed steel sigma section joints. *International journal of Innovative research in technology*. 2016; 3:231-237.
16. Anna Green Antony. Study on cold formed steel sigma sections and the effect of stiffeners. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2016; 5(9):16249-16255. DOI: 10.15680/IJIRSET.2016.0509084
17. Gendy B.L., Hanna M.T. Effect of geometric imperfections on the ultimate moment capacity of cold-formed sigma-shape sections. *HBRC Journal*. 2017; 13(2):163-170. DOI: 10.1016/j.hbrj.2015.04.006
18. Rzeszut K., Szewczak I. Experimental studies of sigma thin-walled beams strengthen by CFRP tapes. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Structural and Construction Engineering*. 2017; 11(7):888-895.
19. Vedyakov I.I., Odesskiy P.D., Solov'yev D.V. Bearing capacity of bolted connections of light structures from cold-formed profiles of small thicknesses. *Industrial and Civil Engineering*. 2010; 3:19-22. (rus.).
20. Belyy G.I. Methods for calculating the rod elements of structures from thin-walled cold-formed profiles. *Bulletin of Civil Engineers*. 2016; 3(56):46-51. (rus.).
21. Kunin Yu.S., Kolesov A.I., Yambaev I.A., Morozov D.A. Strengthening and analysis of steel structures made of thin-walled cold-bent profiles with account for the yield of joint connections. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 11:74-81. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.11.74-81 (rus.).

Received April 9, 2019

Adopted in a modified form May 20, 2019

Approved for publication June 24, 2019

B I O N O T E S: **Ivan L. Kuznetsov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Metal Structures and Testing of Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; KUZ377@mail.ru;

Marat A. Salakhutdinov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Metal Structures and Testing of Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; lider-kazann@yandex.ru;

Rishat G. Gainetdinov — magister of Department of Metal Structures and Testing of Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; rishat.gajnetdinov@bk.ru.