

УДК 624.011.

**Кузнецов И.Л.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [kuz377@mail.ru](mailto:kuz377@mail.ru)

**Гимранов Л.Р.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [leenur@mail.ru](mailto:leenur@mail.ru)

**Салахутдинов М.А.** – кандидат технических наук, старший преподаватель

E-mail: [lider-kazan@mail.ru](mailto:lider-kazan@mail.ru)

**Фахрутдинов А.Э.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [faxrutdinoff@yandex.ru](mailto:faxrutdinoff@yandex.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

## Совершенствование узлов стальных ферм с поясами из многогранных труб

### Аннотация

*Постановка задачи.* Целью работы являлось исследование способов усиления поясов стропильных ферм, выполненных из оцинкованных труб с сечением в виде многогранника из листовой стали толщиной от 4 до 6 мм с выпуском одной из кромок листа для образования фасонки.

*Результаты.* Установлено, что усилия, воспринимаемые фасонкой толщиной от 4 до 6 мм, превышают максимально допустимые значения. Предложены 4 варианта усиления фасонки для обеспечения надежной передачи усилия между поясами и раскосами. Все варианты усиления исключают сварку, которая повреждает оцинкованное покрытие. Разработаны и исследованы конечно-элементные модели фрагментов поясов ферм для 4-х вариантов усиления.

*Выводы.* Значимость для строительной отрасли заключается в том, что получены коэффициенты эффективности усиления. Усиление путем загиба фасонки рационально при всех рассмотренных толщинах; усиление путем установки промежуточной пластины менее эффективно по сравнению с загибом; преднатяжение болтов в случае загиба наиболее эффективно проявляет себя при толщине 6 мм, при толщине 4 мм не эффективно.

**Ключевые слова:** стальные фермы, многогранные сечения, оцинкованные элементы, компьютерное моделирование.

В работе [1] предлагается при изготовлении стальных ферм в качестве поясов использовать многогранные оцинкованные трубы. Многогранные трубы широко применяются в строительстве [2, 3, 4], особенно, в энергетическом [5, 6, 7]. В основном данные трубы используются в качестве опор линий электропередач, ветрогенераторных установок и т.д. При этом могут быть изготовлены многогранные трубы переменного по длине сечения, а также переменной площади сечения [8]. Для изготовления поясов ферм было предложено выполнять обратный отгиб кромок исходной заготовки с целью образования по всей длине фасонки [1], которая нужна не только для крепления стержней решетки, но также для восприятия усилий, действующих в поясах.

Однако для рационального и надежного крепления стержней решетки требуется значительная ее толщина [9, 10]. В практике строительства стальных конструкций толщина фасонки зависит от усилия в опорном раскосе и находится в пределах от 6 до 20 мм при усилении в раскосе от 150 до 1800 кН соответственно. Например, при усилении в раскосе порядка 600 кН толщина фасонки должна быть не менее 14 мм.

Толщина рекомендуемого отгиба кромки для образования фасонки недостаточна для обеспечения прочного крепления раскосов, так как изготовление многогранных труб выполняется из заготовок от 4 до 6 мм. Предлагается при изготовлении многогранных поперечных сечений образование продольных фасонки достаточной толщины выполнять согласно вариантам, приведенным на рис. 1-2.

На рис. 1 приводятся методы усиления фасонки:

а) созданием загиба одной из кромок листа заготовки, обрамляющего другую кромку (образец 1 и образец 2 – с преднатяжением болтов);

б) расположением промежуточной пластины между кромками листа заготовки (образец 3).

На рис. 2 приводятся методы усиления фасонки путем образования загиба одной из кромок листа заготовки под другую кромку (образец 4 на рис. 2 б) и контрольный образец без усиления (рис. 2 а).

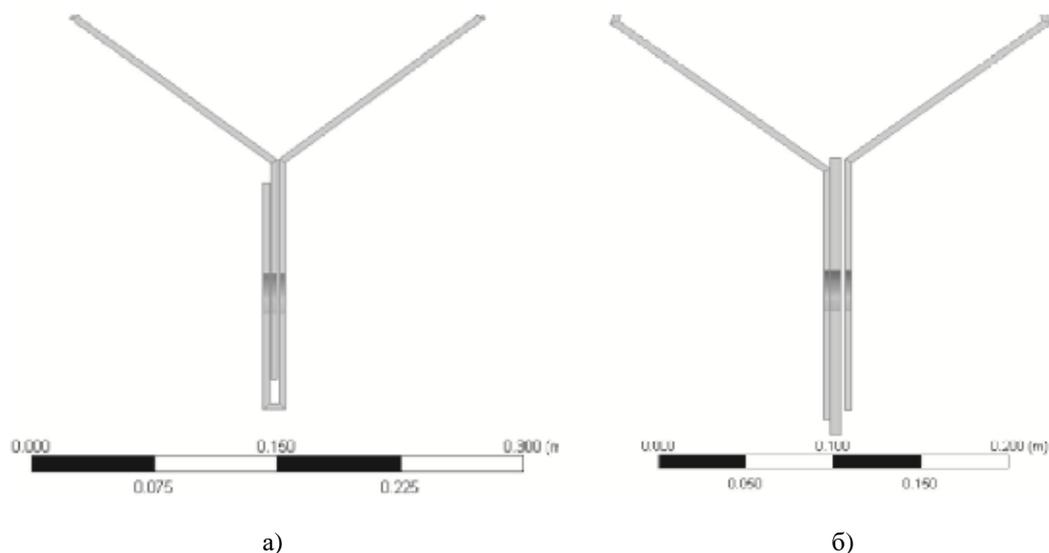


Рис. 1. Усиление области фасонки верхнего пояса из многогранного сечения

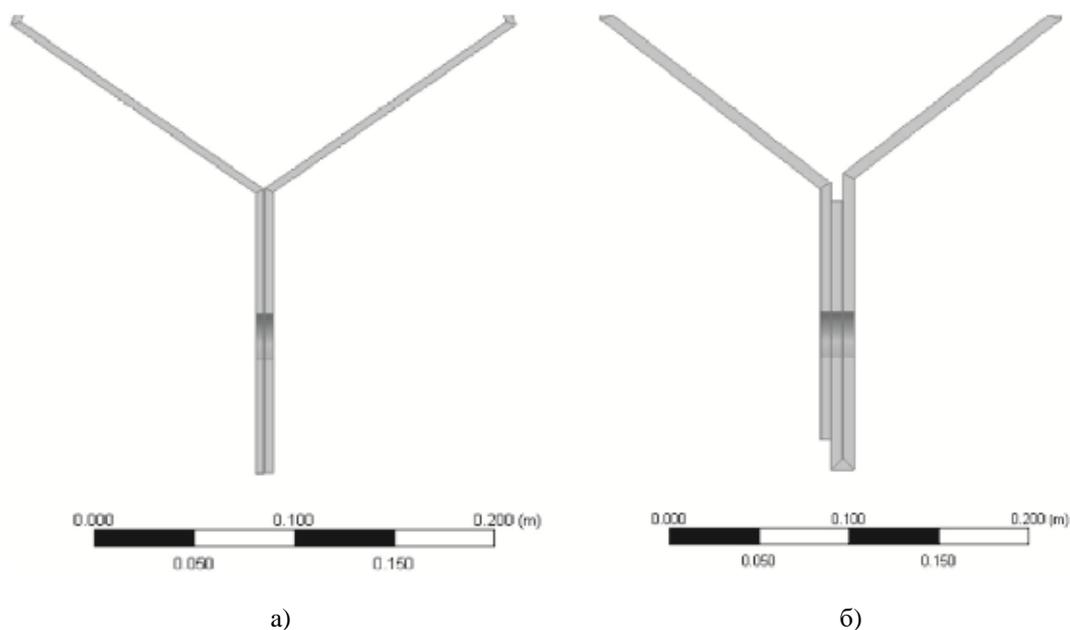


Рис. 2. Усиление области фасонки верхнего пояса из многогранного сечения

Компьютерное моделирование производится в ПК «Ansys Academics». Расчетная модель представляет собой участок верхнего пояса фермы длиной 1 м с пятиугольным поперечным сечением и толщиной листа 4 и 6 мм (рис. 3). Участок верхнего пояса, образующий фасонку, имеет сквозные отверстия для болтов диаметром 24 мм. Также моделируется тело болта с головочной и гаечной частями, объединенными в единое тело. Конечно-элементная сетка выполнена из объемных конечных элементов. Пояс закреплен от вертикального и горизонтального смещения, а усилие от раскосов прикладывается к наружным кромкам тела, моделирующего болт. Усилие между болтом и фасонкой передается контактным способом, подразумевающим передачу усилий через поверхность контакта и образование зазоров при коэффициенте трения 0,15. Верхний пояс и фасонка

также моделируются с учетом физической нелинейности (диаграмма Прандтля) с пределом текучести 255 МПа и тангенсальным модулем упругости, равным 0. Материал болтов принимается линейным, соответствующим классу болтов 10.9 с расчетным сопротивлением 900 МПа. Контакт между поверхностями разных кромок фасонки моделируется с коэффициентом трения 0,15 с возможностью передачи контактного давления и образования зазоров.

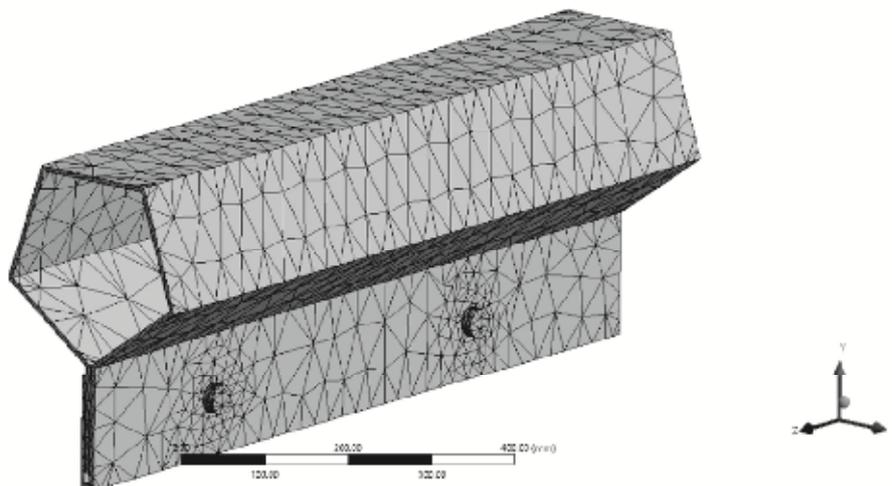


Рис. 3. Расчетная конечно-элементная модель верхнего пояса с узлами соединения

В качестве параметра для оценки несущей способности соединения принято нетто перемещение (мм) внутренней плоскости отверстия под действием соответствующего усилия. Нетто перемещение – это чистое перемещение внутри отверстия за вычетом деформации всей модели. Нетто деформация отверстия – это разница перемещений между максимальным и минимальным значением в плоскости отверстия. Она позволяет оценить деформации внутри отверстия, очищенные от деформаций всей модели (деформация фасонки из плоскости, деформация поперечного сечения верхнего пояса).

Для оценки деформативности болтового соединения принято соотношение действующего усилия к нетто перемещению, измеряемое в (кгс/мм).

Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 4-10.

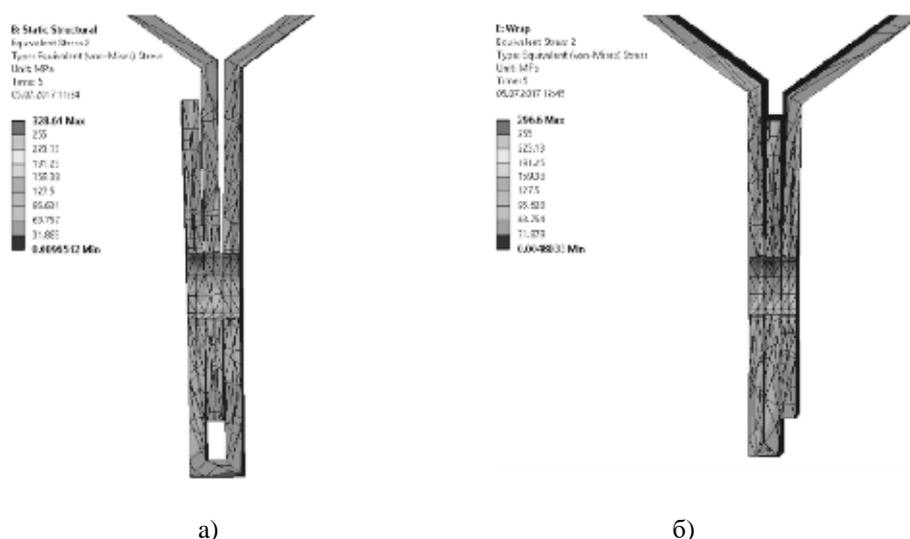


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние образца 2 и образца 4 от действия максимальной нагрузки (закритическая стадия)

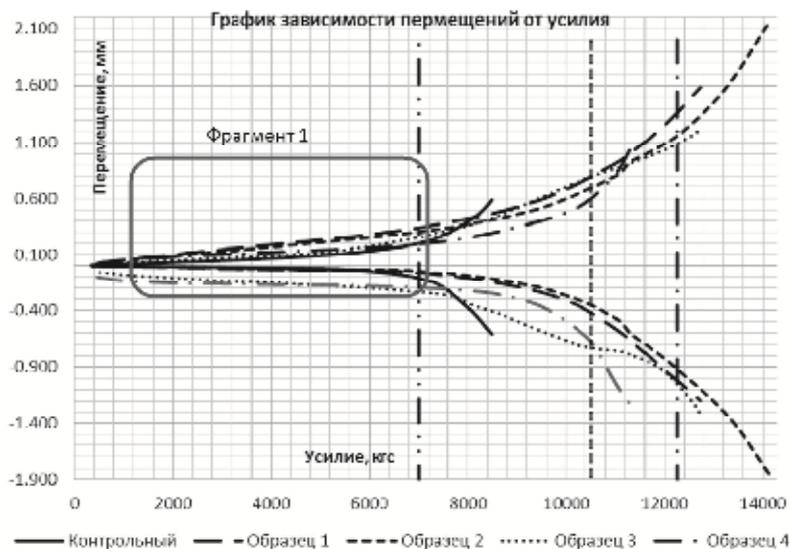


Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования в упругой и за критической стадиях при  $t=4$  мм



Рис. 6. Результаты моделирования в упругой стадии при  $t=4$  мм (фрагмент 1)

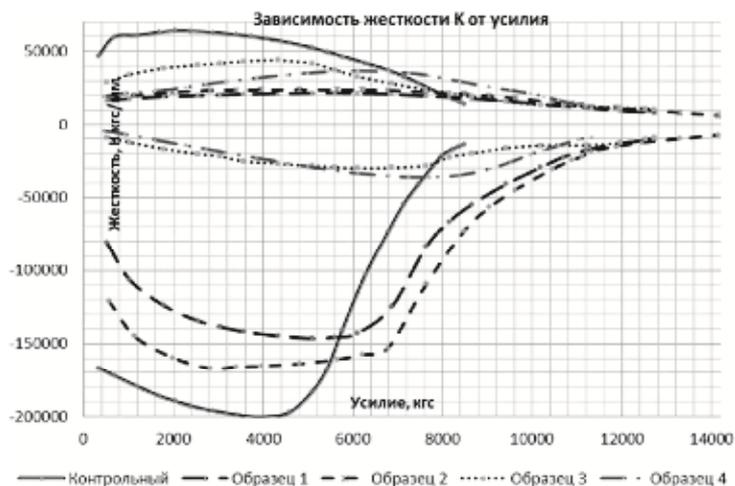


Рис. 7. Результаты моделирования жесткости соединения при  $t=4$  мм (фрагмент 1)



Рис. 8. Результаты моделирования в упругой и за критической стадиях при t=6 мм

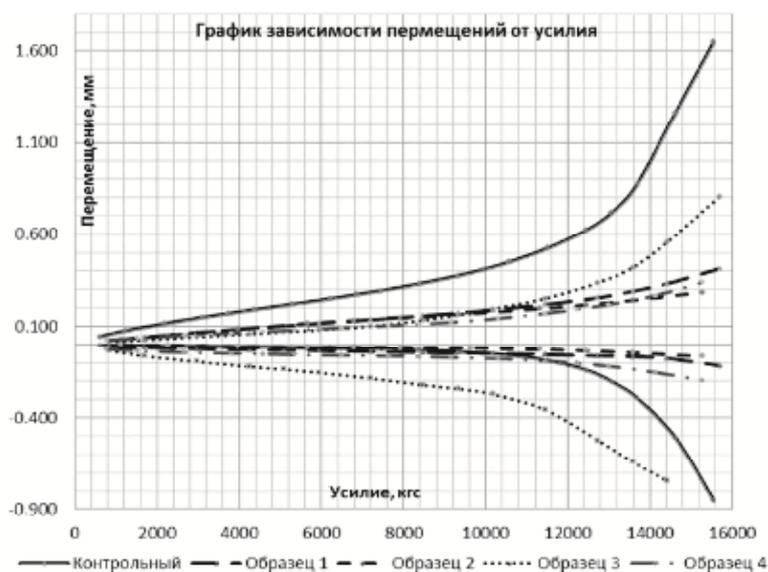


Рис. 9. Результаты моделирования в упругой стадии при t=6 мм (фрагмент 2)

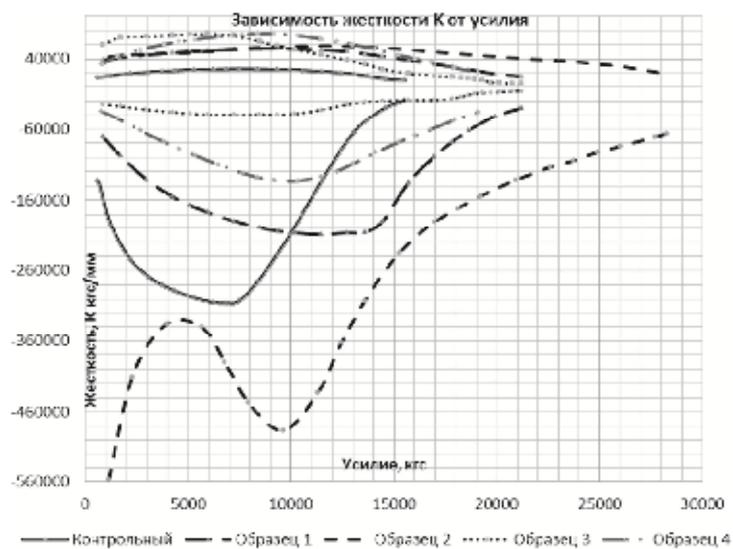


Рис. 10. Результаты моделирования жесткости соединения при t=6 мм (фрагмент 2)

Анализируя результаты компьютерного моделирования работы на срез усиленного болтового соединения, можно утверждать о повышении несущей способности соединения в целом. Для качественной оценки усиления можно использовать значение усилия, соответствующего упругой работе соединения, т.е., когда зависимость между усилием и нетто-деформацией отверстия является линейной, а также в дополнение оценить изменение значения жесткости «К» от усилия. Существенное падение значение жесткости «К» свидетельствует о переходе узла в закритическую стадию работы.

Жесткость «К» болтового соединения отличается в случаях приложения срезающего усилия в противоположных направлениях (например, для соседних раскосов фермы), однако, критическое значение усилия при этом не меняется, т.к. изменение угла наклона касательной к кривой графика для каждого образца начинается при приблизительно одинаковых усилиях. Теоретическое значение несущей способности болтового соединения на смятие торцевой поверхности, определяемое по существующим нормативным методикам, зависит от временного сопротивления стали. Оно приведено на графиках в виде вертикальной линии и рассчитано с учетом включения в работу всей толщины сплавляемого пакета.

В таблице на основании вышеизложенного приведено сравнение вариантов усиления при толщине заготовок 4 и 6 мм. Стоит отметить, что эффективность усиления выше в том случае, когда отношение фактической и теоретической суммарных толщин пакета, сминаемого в одном направлении ( $\Sigma t_{\text{факт}}/\Sigma t_{\text{теор}}$ ) стремится к 1. Таким образом, достижение единицы означает, что суммарная толщина пакета полностью включается в работу, если же меньше единицы, то появляется некоторая податливость.

Таблица

Сравнение вариантов усиления

Способ усиления по номеру образца	Теоретическое значение толщины усиленного пакета в зависимости от толщины исходного металла (см)		Усилие критическое по результатам моделирования (кгс)		Фактическое значение толщины усиленного пакета (см)		Эффективность усиления $\Sigma t_{\text{факт}}/\Sigma t_{\text{теор}}$	
	t=4 мм	t=6 мм	t=4 мм	t=6 мм	t=4 мм	t=6 мм	t=4 мм	t=6 мм
Контрольный	0,8	1,2	7200	12500	0,8	1,2	-	-
Образец 1	1,2	1,8	9200	16000	10,5	1,78	0,875	0,99
Образец 2	1,2	1,8	9600	22000	10,96	1,8	0,913	1,0
Образец 3	1,4	1,8	8000	14500	0,91	1,65	0,652	0,92
Образец 4	1,2	1,8	9600	15900	10,96	1,78	0,913	0,99

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- усиление соединения путем загиба фасонки рационально при всех рассмотренных толщинах, при этом для листа заготовки толщиной 4 мм жесткость соединения «К» снижается, а для толщины 6 мм – повышается;
- преднапряжение болтов в случае загиба наиболее эффективно проявляет себя при толщине 6 мм, при толщине 4 мм преднапряжение не эффективно;
- усиление путем установки промежуточной пластины менее эффективно по сравнению с загибом;
- полученные коэффициенты эффективности усиления могут быть использованы при расчете прочности узлов.

#### Список библиографических ссылок

1. Салахутдинов М. А., Кузнецов И. Л., Саянов С. Ф. Стальные фермы с поясами из труб многогранного сечения // Известия КГАСУ. 2016. № 4 (38). С. 236–242.
2. Хусаинов Д. М., Дымолазов М. А., Пеньковцев С. А. Расчет несущих элементов конструкций рекламных конструкций с использованием методов теории надежности // Известия КГАСУ. 2014. № 4 (30). С. 183–187.

3. Veljkovic M., Johansson B. Thin-walled steel columns with partially closed cross-section: Tests and computer simulations // Original Research Article Journal of Constructional Steel Research. Vol. 64. Issues 7-8. July-August 2008. P. 816–821.
4. Mamalis A. G., Manolakos D. E., Ioannidis M. B., Kostazos P. K., Dimitriou C. Finite element simulation of the axial collapse of metallic thin-walled tubes with octagonal cross-section // Original Research Article Thin-Walled Structures. Vol. 41. Issue 10. October 2003. P. 891–900.
5. Стальная многогранная опора ЛЭП : пат. 2248434 Рос. Федерация. № 2003134575/03 ; заявл. 28.11.2003; опубл. 20.03.2005. 4 с.
6. Длинномерная несущая конструкция стойка опоры линии электропередачи : пат. 2347049 Рос. Федерация. № 2007118190/03 ; заявл. 16.05.2007; опубл. 20.02.2009. 4 с.
7. Способ изготовления стальной опоры многогранного сечения : пат. 2556603 Рос. Федерация. № 2014121172/03 ; заявл. 26.05.2014 ; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 19. 5 с.
8. Yamashita M., Gotoh M., Sawairi Y. Axial crush of hollow cylindrical structures with various polygonal cross-sections: Numerical simulation and experiment // Original Research Article Journal of Materials Processing Technology. Vol. 140. Issues 1-3. 22 September 2003. P. 59–64.
9. Кузнецов И. Л., Рамазанов Р. Р., Фахрутдинов А. Э. Разработка и исследование новых типов соединений тонкостенных элементов // Известия КГАСУ. 2014. № 3 (29). С. 51–55.
10. Кузнецов И. Л., Фахрутдинов А. Э., Рамазанов Р. Р. Результаты экспериментальных исследований работы соединений тонкостенных элементов на сдвиг // Вестник МГСУ. 2016. № 12. С. 34–43.

**Kuznetsov I.L.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [kuz377@mail.ru](mailto:kuz377@mail.ru)

**Gimranov L.R.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [leenur@mail.ru](mailto:leenur@mail.ru)

**Salakhutdinov M.A.** – candidate of technical sciences, senior lecturer

E-mail: [luder-kazann@yandex.ru](mailto:luder-kazann@yandex.ru)

**Fakhrutdinov A.E.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [faxrutdinoff@yandex.ru](mailto:faxrutdinoff@yandex.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Joints perfection of steel trusses with chords of hollow polygonal cross section**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The purpose of this research work was the development of reinforcement solutions of roof trusses chords consisting of zinc-coated pipes of polygonal hollow section with constant thickness ranged from 4–6 mm. Cross sections is formed from blank plate of constant width in such a way that it has gusset along of the length of a chord.

*Results.* It's determined that forces which act on a gusset with thickness from 4 to 6 mm are larger than allowed by statical calculations. Therefore 4 different reinforcement solutions are developed for achieving robust force transferring from brace members of the truss to chords. All reinforcement options exclude welding, which damages the galvanized coating. Finite element models of a part of the top chord of the truss in reinforced state were created and analyzed for all four types of reinforcement solutions.

*Conclusions.* The significance for the construction industry lies in the fact that the coefficients of the efficiency of amplification are obtained. The reinforcement by bending the slots is rational for all the thicknesses considered; reinforcement by installing the intermediate plate is less effective than bending; the preload of bolts in the case of bending is most effective at a thickness of 6 mm, with a thickness of 4 mm is not effective.

**Keywords:** polygonal cross section, cold forming profile, chord of truss, longitudinal plate, bolted connection, finite element model.

## References

1. Salakhutdinov M. A., Kuznetsov I. L., Sayanov S. F. Steel truss with chords of multi-faceted cross-section tubes // *Izvestiya KGASU*. 2016. № 4 (38). P. 236–242.
2. Khusainov D. M., Dymolasov M. A., Penkovcev S. A. Calculation of bearing structural elements of advertising designs using the methods of reliability theory // *Izvestiya KGASU*. 2014. № 4 (30). P. 183–187.
3. Veljkovic M., Johansson B. Thin-walled steel columns with partially closed cross-section: Tests and computer simulations // *Original Research Article Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 64. Issues 7-8. July-August 2008. P. 816–821.
4. Mamalis A. G., Manolakos D. E., Ioannidis M. B., Kostazos P. K., Dimitriou C. Finite element simulation of the axial collapse of metallic thin-walled tubes with octagonal cross-section // *Original Research Article Thin-Walled Structures*. Vol. 41. Issue 10. October 2003. P. 891–900.
5. Steel multi-faceted cross-section support of power line : the patent 2248434 Rus. Federation. № 2003134575/03 ; decl. 28.11.2003; publ. 20.03.2005. 4 p.
6. A lengthy load-bearing structure support stand for power transmission line : the patent 2347049 Rus. Federation. № 2007118190/03 ; decl. 16.05.2007; publ. 20.02.2009. 4 p.
7. A method of making steel support of multi-faceted cross-section : the patent 2556603 Rus. Federation. № 2014121172/03 ; decl. 26.05.2014; publ. 10.07.2015. Bull. in № 19. 5 p.
8. Yamashita M., Gotoh M., Sawairi Y. Axial crush of hollow cylindrical structures with various polygonal cross-sections: Numerical simulation and experiment // *Original Research Article Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 140. Issues 1-3. 22 September 2003. P. 59–64.
9. Kuznetsov I. L., Ramazanov R. R., Fakhrutdinov A. E. Development and research of new types of joints of thin-walled elements // *Izvestiya KGASU*. 2014. № 3 (29). P. 51–55.
10. Kuznetsov I. L., Fakhrutdinov A. E., Ramazanov R. R. Results of experimental research for shear strain of connections of thin-walled elements // *Vestnik MGSU*. 2016. № 12. P. 34–43.