

**ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ИССЛЕДОВАНИИ СТАЛЬНОЙ ФЕРМЫ,
УСИЛИВАЕМОЙ ПОД НАГРУЗКОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВАРКИ**

© 2015

И.К. Родионов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и хозяйство»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: натурный эксперимент; стальная ферма со стержнями из парных уголков; усиление под нагрузкой; метод усиления увеличением сечения стержней; ручная сварка; технологические параметры.

Аннотация: В статье представлена экспериментально полученная информация об особенностях работы стальной стропильной фермы, усиливаемой под нагрузкой путём увеличения сечения её сжатых стержней. Ферма была выполнена из уголкового проката с присоединением стержней к узловым фасонкам.

Испытания проводились на стенде с использованием имеющейся оснастки. Нагрузка прикладывалась в виде узловой к верхнему поясу. Напряжения в стержнях и фасонках в процессе испытаний контролировались с помощью петлевых проволочных тензодатчиков сопротивления. Для фиксирования выгибов усиливаемых стержней и прогибов в целом фермы были установлены проволочные прогибомеры.

Перед проведением основных испытаний с целью изучения работы фермы до усиления была испытана неусиленная конструкция.

После предварительных проводились основные испытания: усиление двух восходящих раскосов и двух панелей верхнего пояса. В качестве элементов усиления были приняты стержни из уголков с присоединением их на сварке по схеме «коробочка». Сварка производилась вручную штучными электродами. С помощью электроизмерительных клещей контролировались сварочный ток и напряжение; измерялась скорость сварки.

Нагрузка назначалась в соответствии с принятой при усилении каждого стержня величиной усилия. Один из раскосов усиливался при усилении, равном 0,9 от нормативной несущей способности, остальные стержни при усилении, равном 0,8 от нормативной величины.

Порядок присоединения принимался в соответствии с выводами теории: с первоначальным наложением концевых сплошных швов в пределах фасонки и последующей наплавкой связующих прерывистых швов по длине элемента.

Подъем промышленности в России невозможен без реконструкции производственных зданий. В основном это здания с каркасом из стали, оборудованные кранами. Многие претерпели износ. Доведение их до современного уровня требует, как правило, усиления отдельных несущих конструкций.

Вопросам усиления уделяется значительное внимание [1–17]. Из последних работ интерес представляют исследования, посвященные эксплуатации и усилению пролётных балок мостовых кранов [1–3]. Значительно меньше внимание уделено вопросам усиления стальных ферм покрытия, несмотря на то, что это конструкции, довольно часто требующие ремонта. Усиление таких ферм, представляющих собой, в основном, фермы со стержнями из парных уголков, наиболее часто достигается увеличением сечений стержней путем присоединения на сварке дополнительных элементов.

Вопросу усиления стержней методом увеличения сечения посвящено значительное внимание. Из последних источников можно отметить [11] и [17]. Наиболее известны работы Б.И. Десятова [4], Р. Кизингера [5], В.М. Колесникова [6], И.С. Реброва [7–8]. Авторы исследовали в основном напряженное состояние усиленных элементов с экспериментальным подтверждением теоретических положений на отдельных стержневых элементах. Сам процесс усиления, технологические его параметры, рассматривался фрагментарно. Экспериментальное исследование на конструкции фермы проводилось только Р. Кизингером и лишь при усилении растянутых стержней.

Целью данного исследования было в основном качественное подтверждение на конструкции теоретически полученных автором статьи закономерностей, в особенности главной из них: о возможности регули-

рования при усилении сжатых стержней сварочных прогибов технологическими приемами сварки. Также необходимо было получить информацию о работе стержней, усиливаемых в составе конструкции и о влиянии производства усиления на напряженное состояние остальных элементов и в целом на работу фермы (её прогибы).

Это необходимо было выполнить для обеспечения возможности дальнейшей количественной отработки теоретически полученных сварочных технологий на натуральных стержневых образцах.

Исследование проводилось на ферме пролётом 24 м и высотой 3,1 м (рис. 1).

Элементы поясов и решётки были выполнены из уголкового проката: верхний пояс – 2 L 140×10, нижний пояс – 2 L 100×10, раскосы P_1, P_2, P_3, P_4 соответственно 2 L 100×10, 2 L 75×5, 2 L 90×8, 2 L 75×5, стойки C_1, C_2 – 2 L 75×5. Все стержни с компоновкой сечений втавр, кроме центральной стойки C_2 крестового сечения. Раскосы P_1, P_2 и панель нижнего пояса H_2 были усилены до основных испытаний 2 L 63×6. Элементы фермы были выполнены из низкоуглеродистой стали марки ВСтЗпс6. Пределы текучести для элементов, которые должны были подвергаться усилению (B_4, B_4^1, P_3 и P_3^1), составляли: для верхнего пояса – $\sigma_m^0 = 25$ кН/см², для раскосов – $\sigma_m^0 = 25,4$ кН/см².

Испытание фермы проводилось на стенде с использованием имеющейся оснастки. Схема загрузки показана на рис. 2.

Работа стержней фермы в процессе испытаний контролировалась с помощью петлевых проволочных тензодатчиков сопротивления. Тензодатчики с базой 20 мм были наклеены после установки фермы на стенде

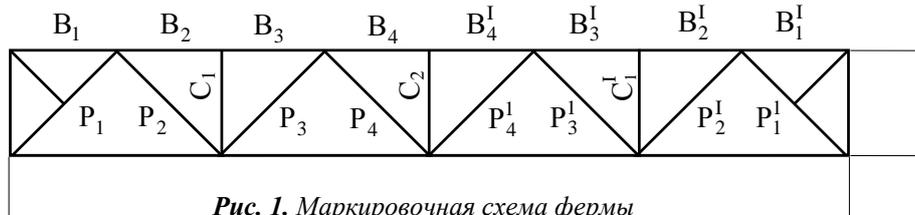


Рис. 1. Маркировочная схема фермы

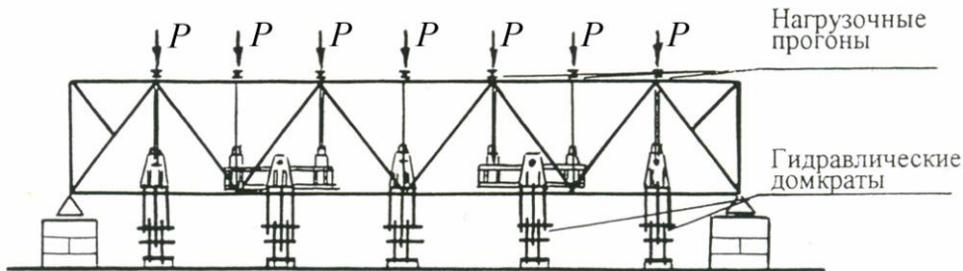


Рис. 2

Рис.2. Схема загрузки фермы

в средних по длине сечениях всех стержней и на фасонках, примыкающих к усиливаемым элементам.

Для фиксирования выгибов усиливаемых стержней были установлены проволочные прогибомеры: в средних сечениях – по 2 штуки на стержень (в плоскости и из плоскости фермы).

Прогибы в целом конструкции фиксировались по показаниям проволочных прогибомеров, установленных в узлах нижнего пояса фермы и на опорах.

Перед проведением основных испытаний была испытана неусиленная конструкция [19]. Целью являлось изучение работы фермы до усиления.

Испытание конструкции производилось на последовательно прикладываемые нагрузки $P=38, 63, 76, 88, 101$ кН. Наибольшая узловая нагрузка $P=101$ кН составляла порядка 90 % от её нормативной величины, определённой по несущей способности наиболее слабого элемента – раскоса P_3 .

Порядок проведения испытаний был следующим: осуществлялось нагружение фермы нагрузкой 1-го этапа, давалась выдержка, около 5 минут, и производилось снятие отсчётов по приборам, затем давалась нагрузка 2-го этапа, опять снимались отсчеты и так до наибольшей нагрузки. Далее конструкция разгружалась, давалась выдержка 15 минут и снимались отсчёты по показаниям всех приборов.

После предварительных испытаний проводились основные: усиление стержней P_3^I, P_3, B_4 и B_4^I уголковыми элементами, двумя уголками $L 63 \times 6$ по схеме «коробочка» (рис. 3).

Нагрузка P назначалась в соответствии с принятой при усилении каждого стержня величиной усилия $N_0^y = K \gamma_c \varphi_o \sigma_m A_o$, где φ_o , σ_m^o , A_o соответственно коэффициент продольного изгиба, предел текучести и площадь поперечного сечения основного стержня. Коэффициент K принимался 0,8 при усилении раскоса P_3^I и стержней B_4, B_4^I и 0,9 – раскоса P_3 , что больше тре-

буемого в [4–16]; коэффициент условий работы γ_c принимался в соответствии с требованиями норм [20].

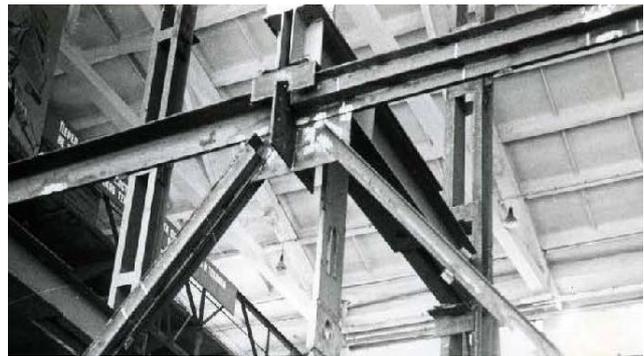


Рис. 3. Узел усиленной фермы

Усилия в стержнях в момент усиления N_0^y и соответствующие им нагрузки P были следующие: $P_3^I – 180$ и 90 кН, $P_3 – 202$ и 101 кН, $B_4^I, B_4 – 846$ и 116 кН.

Испытание каждого элемента производилось в следующем порядке: ферма нагружалась до появления требуемого усилия в усиливаемом элементе; элементы усиления с тензодатчиками прикреплялись струбцинами; производилось присоединение элементов усиления путём наплавки сварных швов.

Порядок присоединения принимался в соответствии с выводами теории: с первоначальным наложением концевых сплошных швов в пределах фасонки и последующей наплавкой связующих прерывистых швов по длине элемента.

Общая протяжённость каждого из 4-х связующих швов составляла около 160–180 см для стержней B_4, B_4^I и 260–280 см для P_3 и P_3^I . Катеты всех швов принимались порядка 5–6 мм.

Сварка производилась вручную электродами типа Э-42 диаметром 4 мм. С помощью электродклещей контролировались сварочный ток и напряжение; измерялась скорость сварки [18]. Значения этих величин были в пределах: 185–210 А; 20–22 В; 10–12 см/мин.

В процессе усиления осуществлялось наблюдение за работой усиливаемого стержня и примыкающих к нему элементов (фасонки и стержней) по показаниям измерителей деформаций и проволоочных прогибомеров. Работа в целом конструкции контролировалась по показаниям проволоочных прогибомеров. Снятие отсчетов по приборам производилось после наложения каждого участка шва, обозначенного цифрами (этапы сварки) на рис. 4, а также после остывания усиленных стержней.

После выполнения усиления всех четырех стержней была испытана усиленная конструкция: ферма нагружалась узловой нагрузкой ступенями по 10 кН до потери несущей способности.

Предварительные испытания дали результаты, свидетельствующие о достоверности эксперимента: экспериментальные значения усилий в стержнях N , незначительно отличались от теоретически полученных значений N_m . Разброс конструктивных поправок $K_s = N_s/N_m$ составил 0,934...0,997.

Результаты основных испытаний фермы показали, что при усилении сжатых стержней изменялось их напряженное состояние: появлялись прогибы, отмечалось перераспределение напряжений по сечениям.

В частности, наблюдения за показаниями прогибомеров, установленных на усиливаемом раскосе P_3 , показали следующее (рис. 4): в процессе наплавки концевых швов (швы этапов 1 и 2) изменения прогибов усиливаемых элементов не отмечались; они появлялись лишь при наплавке промежуточных швов-шпонок (этапы 3...18).

Наплавка промежуточных швов на полки основных уголков, расставленных в стороны (этапы 3...10), приводила к появлению стрелок прогибов в направлении

отрицательной оси f_y ; нанесение связующих валиков на спаренные полки основных уголков (этапы 11...18) – в направлении положительной оси f_y . Это даёт основание считать характер изгибных деформаций, как явно выраженный остаточный, от усадки швов.

Наблюдения за изменениями прогибов в направлении оси «X» в целом подтвердили этот вывод: наплавка швов позиций 3...6 и 7...10 приводила к появлению прогибов противоположных направлений.

Всё вышеотмеченное позволяет сделать вывод о возможности регулирования амплитуды прогибов при усилении путём варьирования порядка наплавки промежуточных швов по сечению.

Наблюдения за напряженным состоянием средних сечений усиливаемых стержней показали, что при наплавке концевых швов напряжения практически не изменялись. Наплавка промежуточных швов приводила к перераспределению напряжений по сечению: происходило порой уменьшение сжимающих напряжений (и даже переход в растягивающие) в перьях основных уголков и увеличение сжимающих напряжений в обухах.

Такое перераспределение напряжений, происходящее при усилении сжатых стержней, объясняется наложением полей сварочных напряжений на эпюры напряжений, имеющихся в усиливаемых стержнях от нагрузки. В большей степени оно имело место при усилении раскосов P_3^1 и P_3 . В среднем, в результате усиления уменьшение сжимающих напряжений в перьях уголков этих раскосов составило 10 кН/см². Увеличение сжимающих напряжений в обухах уголков составило порядка 10...14 кН/см². Причем величина изменений напряжений росла с увеличением длин наплавляемых швов.

Исследование влияния производимого усиления на работу усиливаемой фермы дало результаты, которые показывают, что процесс усиления одного из сжатых стержней (процесс сварки) крайне незначительно влияет на поведение остальных элементов конструкции.

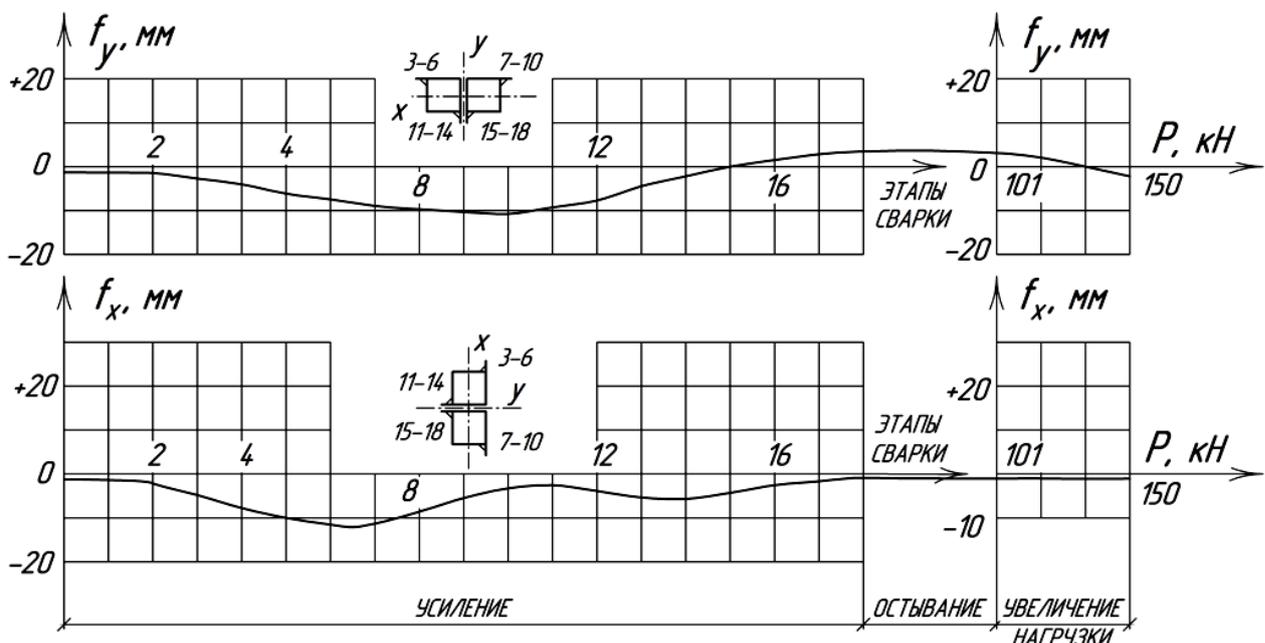


Рис. 4. Графики изменения прогибов раскоса P_3

В основном, это влияние (в виде появления дополнительных напряжений) имело место в фасонках, примыкающих к усиливаемым элементам и практически не наблюдалось в смежных с этими элементами стержнях.

Изменение напряжений в фасонках, как правило, происходило в процессе присоединения концов усиливающих элементов. Величина дополнительных напряжений, зарегистрированных в процессе испытаний, составила 0,6...1,2 кН/см². В дальнейшем в процессе наложения остальных швов эти напряжения имели тенденцию к уменьшению и, в основном, после остывания усиленных стержней становились близкими к нулю.

Наблюдения за прогибами фермы в процессе усиления её сжатых стержней показали отсутствие влияния процесса усиления на прогибы конструкции в целом.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

1) в процессе усиления сжатых стержней ферм происходит перераспределение напряжений в сечениях, появляются деформации изгиба;

2) перераспределение напряжений и изгиб связаны с наложением только промежуточных швов;

3) величина изменений напряжений и стрелок выгиба усиливаемых стержней прямо пропорциональна размерам накладываемых связующих швов;

4) направление стрелок выгиба сжатых усиливаемых стержней зависит от положения связующих швов в сечении, что подтверждает возможность регулирования амплитуды прогибов при усилении технологическими приемами сварки;

5) процесс усиления оказывает очень незначительное влияние на работу фасонки, не влияет на работу стержней, смежных с усиливаемыми, и на прогибы в целом конструкции фермы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липатов А.С., Емельянова Г.А. Об учете ненормируемых условий эксплуатации при назначении показателей риска грузоподъемных кранов // *Механизация строительства*. 2014. № 5. С. 60–64.
2. Ольшевский И.Ю., Пояркова Е.В., Камышев О.Г., Авдонин А.М. Восстановление несущей способности пролетных балок мостовых кранов // *Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. трудов XI междунар. научно-практ. конф. Оренбург*, 2013. С. 399–406.
3. Пояркова Е.В., Кузеев И.Р., Авдонин А.М., Полухина В.И., Диньмухаметова Л.С. Тотальный контроль ремонтно-монтажных работ крупногабаритной металлоконструкции // *Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки*. 2013. Т. 18. № 4-2. С. 1856–1858.
4. Десятов Б.И. Исследование работы усиливаемых под нагрузкой элементов сварных стальных ферм : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1969. 24 с.
5. Кизингер Р. Исследование напряжённого состояния растянутых стержней металлических ферм при их усилении под нагрузкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1973. 22 с.
6. Колесников В.М. Исследование работы некоторых стальных конструкций и отдельных элементов, усиленных под нагрузкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1967. 24 с.

7. Ребров И.С. Работа сжатых элементов стальных конструкций, усиленных под нагрузкой. Л.: Стройиздат, 1976. 176 с.
8. Ребров И.С. Усиление стержневых металлических конструкций. Проектирование и расчет. Л.: Стройиздат, 1988. 288 с.
9. Бельский М.Р., Лебедев А.И. Усиление стальных конструкций. Киев: Будівельник, 1981. 120 с.
10. Валь В.Н., Горохов Е.В., Уваров Б.Ю. Усиление стальных конструкций одноэтажных производственных зданий при их реконструкции. М.: Стройиздат, 1987. 220 с.
11. Иванов Ю.В. Реконструкция зданий и сооружений: усиление, восстановление и ремонт. М.: АСВ, 2012. 312 с.
12. Лашенко М.Н. Повышение надёжности металлических конструкций зданий и сооружений при реконструкции. Л.: Стройиздат, 1987. 135 с.
13. Металлические конструкции. Т. 2. Конструкции зданий / под ред. В.В. Горева. 2-е изд. М.: Высш. шк., 2002. 520 с.
14. Металлические конструкции. Справочник проектировщика. Т. 3 / под общ. ред. В.В. Кузнецова. М.: АСВ, 1999. 528 с.
15. Металлические конструкции / под ред. Ю.И. Кудишина. 10-е изд. М.: Академия, 2007. 688 с.
16. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81*). М.: Стройиздат, 1989. 160 с.
17. Прошин И.В., Родионов И.И. Экономические аспекты усиления стропильных ферм покрытий промышленных зданий // Молодежь и XXI век–2015: сб. материалов V Междунар. молодеж. науч. конф. Т. 2. Курск, 2015. С. 309–312.
18. Сварка. Резка. Контроль. Т. 1 / под ред. Н.П. Алёшина, Г.Г. Чернышёва. М.: Машиностроение, 2004. 480 с.
19. СП 53–101–98. Изготовление и контроль качества стальных строительных конструкций. М.: Госстрой России, 2005. 30 с.
20. СП 53–102–2004. Общие правила проектирования стальных конструкций. М.: Госстрой России, 2005. 132 с.

REFERENCES

1. Lipatov A.S., Emelyanova G.A. Allowing for unstandartizable operating conditions for appointing risk settings for cranes. *Mekhanizatsiya stroitelstva*, 2014, no. 5, pp. 60–64.
2. Olshevsky I.Yu., Poyarkova E.V., Kamyshev O.G., Avdonin A.M. Restoration of bearing capacity of longitudinal girder of bridge cranes. *Sbornik trudov XI mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Progressivnie tekhnologii v transportnikh sistemakh"*. Orenburg, 2013, pp. 399–406.
3. Poyarkova E.V., Kuzeyev I.R., Avdonin A.M., Polukhina V.I., Dinmukhametova L.S. Total control of repair and installation work of large metal structures. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennie i tekhnicheskie nauki*, 2013, vol. 18, no. 4-2, pp. 1856–1858.
4. Desyatov B.I. *Issledovanie raboti usilyaemikh pod nagruzkoy elementov svarnikh stalnikh ferm*. Avtoref.

- diss. kand. tekhn. nauk [Study of work of strengthened under the load elements of welded steel trusses]. Moscow, 1969, 24 p.
5. Kizinger R. *Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya rastyanutikh sterzhney metallicheskih ferm pri ikh usilenii pod nagruzkoy*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Study of stressed state of tension members of metal trusses when strengthening them under the load]. Moscow, 1973, 22 p.
 6. Kolesnikov V.M. *Issledovanie raboti nekotorykh stalnykh konstruksiy i odelnykh elementov, usilennykh pod nagruzkoy*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Study of work of some steel constructions and separate elements strengthened under the load]. Leningrad, 1967, 24 p.
 7. Rebrov I.S. *Rabota szhatykh elementov stalnykh konstruksiy, usilennykh pod nagruzkoy* [Operation of fixed members of steel constructions strengthened under the load]. Leningrad, Stroyizdat publ., 1976, 176 p.
 8. Rebrov I.S. *Usilenie sterzhnevnykh metallicheskih konstruksiy. Proektirovanie i raschet* [Column metal constructions strengthening. Design and calculation]. Leningrad, Stroyizdat publ., 1988, 288 p.
 9. Belskiy M.R., Lebedev A.I. *Usilenie stalnykh konstruksiy* [Steel structures strengthening]. Kiev, Budivelnik publ., 1981, 120 p.
 10. Val' V.N., Gorokhov E.V., Uvarov B.Yu. *Usilenie stalnykh konstruksiy odnoetazhnykh proizvodstvennykh zdaniy pri ikh rekonstruktsii* [Strengthening of steel structures of one-storey production buildings during their reconstruction]. Moscow, Stroyizdat publ., 1987, 220 p.
 11. Ivanov Yu.V. *Rekonstruktsiya zdaniy i sooruzheniy: usilenie, vosstanovlenie i remont* [Buildings and installations reconstruction: strengthening, restoration and repair]. Moscow, ASV publ., 2012, 312 p.
 12. Lashchenko M.N. *Povishenie nadezhnosti metallicheskih konstruksiy zdaniy i sooruzheniy pri rekonstruktsii* [Safety improvement of metal structures of buildings and installations during the reconstruction]. Leningrad, Stroyizdat publ., 1987, 135 p.
 13. Gorev V.V., ed. *Metallicheskie konstruksii. Vol. 2. Konstruksii zdaniy* [Metal structures. V.2. Buildings constructions]. 2nd ed. Moscow, Visshaya shkola publ., 2002, 520 p.
 14. Kuznetsov V.V., ed. *Metallicheskie konstruksii. Spravochnik proektirovshchika* [Metal structures. Design engineer reference book]. Moscow, ASV publ., 1999, vol. 3, 528 p.
 15. Kudishin Yu.I., ed. *Metallicheskie konstruksii* [Metal structures]. 10th ed. Moscow, Akademiya publ., 2007, 688 p.
 16. *Posobie po proektirovaniyu usileniya stalnykh konstruksiy (k SNIp P-23-81*)* [Manual on steel structures strengthening design (to SNIp P-23-81*)]. Moscow, Stroyizdat publ., 1989, 160 p.
 17. Proshin I.V., Rodionov I.I. Economic aspects of strengthening of roof trusses of industrial buildings. *Sbornik materialov V mezhdunar. molodezhnoy nauchnoy konf. "Molodezh' i XXI vek-2015"*. Kursk, 2015, vol. 2, pp. 309–312.
 18. Aleshin N.P., Chernishov G.G., eds. *Svarka. Rezhka. Kontrol'* [Welding. Cutting. Control]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2004, vol. 1, 480 p.
 19. SP 53–101–98. *Izgotovlenie i kontrol' kachestva stalnykh stroitelnykh konstruksiy* [Production and quality control of steel building structures]. Moscow, Gosstroy Rossii publ., 2005, 30 p.
 20. SP 53–102–2004. *Obshchie pravila proektirovaniya stalnykh konstruksiy* [General rules for steel structures designing]. Moscow, Gosstroy Rossii publ., 2005, 132 p.

ABOUT THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF STEEL TRUSS STRENGTHENED UNDER THE LOAD WITH THE USE OF WELDING

© 2015

I.K. Rodionov, candidate of technical sciences,
assistant professor of the department «Urban Construction and Management»
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: natural experiment; steel truss with column of doubled angle bends; strengthening under the load; method of strengthening by increasing the section of columns; manual welding; process parameters.

Abstract: The article presents the experimentally obtained information about the peculiarities of operation of steel roof truss strengthened under the load by means of increase of the section of its fixed columns. The truss was made of angle bend bar with the joining of columns to the gasket plates.

The testing was carried out on the testing facility using the existing equipment. The author used the load in the form of panel load to the top-chord. Stresses in the columns and plates were controlled using the loop strength resistance strain gauges. To fix the offsets of strengthened columns and deflections in the whole truss, the strain flexometers were installed.

Non-strengthened structure was tested before the main testing in order to study the operation of truss before the strengthening.

The following main testing was carried out: strengthening of two rising diagonals and two top-chord panels. Angle bend columns with welded joining according to the “box” scheme were used as the elements of strengthening. The welding was carried out manually by stick electrodes. Welding current and voltage were controlled using the clip-on instrument; the welding speed was measured.

The loading was specified according to the accepted while strengthening each column forcing value. One of the rising diagonals was strengthened by the forcing equal to 0,9 of specified bearing capacity, the other columns by the forcing equal to 0,8 of specified value.

The order of joining was according to the theory conclusions: with the initial applying of end continuous seams within the plates and the following weld facing of joining intermitted seams along the length of the element.