

**СВАРОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ, МЕТОД «ФИКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР»  
И УСИЛЕНИЕ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ СТАЛЬНЫХ ФЕРМ ПОКРЫТИЯ**

© 2015

**И.К. Родионов**, кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Городское строительство и хозяйство»  
*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*  
**И.И. Родионов**, инженер по эксплуатации зданий и сооружений  
*ЖЭУ «Комсомольский», Тольятти (Россия)*

*Ключевые слова:* стальные фермы покрытия; усиление сжатых стержней; методика расчета сварочных напряжений и деформаций.

*Аннотация:* Усиление стальных ферм покрытия часто достигается увеличением сечений стержней путем присоединения на сварке стержневых элементов. Сварка дает разогрев сечений и появление изгибных деформаций. Для рационального усиления необходим учет этих воздействий.

В этой связи разработана методика расчета сварочных прогибов, появляющихся при усилении способом увеличения сечений в сжатых стержнях стальных ферм покрытий. Методика базируется на методе определения сварочных напряжений и деформаций, известном под названием метода «фиктивных температур». Она учитывает основные особенности усиления: наличие в усиливаемых элементах сжимающих напряжений от нагрузки, наплавку нескольких продольных швов, сложность сечений.

В основу методики положена идея разделения тепловой мощности при сварке элементов в зависимости от их толщин. Для случаев усиления от наплавки каждого шва определяются распределения сварочных напряжений отдельно от тепловой мощности, приходящейся на усиливаемые и усиливающие элементы.

Порядок расчета сварочных напряжений от тепловой мощности, приходящейся на элементы усиления, аналогичен порядку их расчета в ненапряженном элементе. При расчете напряжений от тепловой мощности, приходящейся на основные элементы, производится учет сжимающих напряжений от нагрузки.

Изгибающие моменты и, таким образом, сварочные прогибы стержней определяются от совместного действия усадочных сил, появляющихся в усиливаемом и усиливающем элементах.

Полученная методика расчета явилась базой для обоснования сварочных технологий, дающих возможность проводить усиление стержней стальных уголкового ферм при любых усилиях, включая предельные расчетные величины, и довольно существенно (до 30 %) повысить эффект от проводимого усиления (по сравнению с традиционными технологиями).

Дальнейший подъем российской экономики будет связан в значительной степени с модернизацией и реконструкцией промышленных предприятий. Необходимо будет заменить устаревшее оборудование, внедрить передовые технологии, осуществить некоторые другие меры, которые позволят выпускать современную продукцию без расширения производственных площадей, со значительно меньшими затратами по сравнению с новым строительством.

Эти задачи теснейшим образом связаны с использованием инженерных строительных конструкций, в том числе и металлических. Существует обширный парк строительных конструкций, выполненных из металла, в той или иной степени претерпевших моральный или физический износ. Одним из наиболее эффективных приемов продления срока их службы является усиление.

Усиления требуют основные несущие элементы каркаса, в том числе и стальные фермы покрытия. Значительная часть таких ферм – это конструкции со стержнями, выполненными из парных уголков, и узловыми фасонками.

Для увеличения их несущей способности обычно не требуется усиление большого количества стержней. В этом причина широкого применения методов усиления, связанных с увеличением несущей способности лишь отдельных из них, наиболее слабых, напряженных. Среди таких методов наиболее технологически простым и эффективным является метод увеличения сечений стержней путем присоединения на сварке дополнительных стержневых элементов.

Сварка значительно влияет на работу стержней усиливаемых ферм: появляются тепловые ослабления сечений, сварочные напряжения и деформации.

Комплексно влияние технологических параметров сварки на напряженное состояние усиливаемых стержней ферм не исследовалось [1–6]. Отсюда разноречивость отдельных указаний по технологиям усиления [8–15].

В частности, имеются рекомендации присоединять элементы усиления и сплошными, и прерывистыми швами. Предлагаются самые разнообразные порядки их наплавки. Нагрузки, при которых возможно безопасное усиление стержней, предлагается ограничивать значениями в пределах 0,4...0,8 от полных расчетных величин. Очевидна необходимость проведения исследований для аргументированного обоснования рациональных технологий сварки, правильной оценки влияния сварки на работу стержней, как в процессе усиления, так и усиленных.

Такие исследования проводятся в Тольяттинском государственном университете. Одним из результатов их явилась разработка методики расчета сварочных деформаций, появляющихся при усилении сжатых стержней стальных ферм. В основу методики положен аналитический метод определения сварочных напряжений и деформаций профессора В.С. Игнатевой, известный под названием метода «фиктивных температур» [16; 17]. Метод получил развитие в работах учеников, в частности В.А. Белова, В.Р. Вершинина, И.И. Родионова, В.С. Парлашкевича [18].

Методика позволяет решать задачу определения деформаций (прогибов) для общего случая наплавки

нескольких продольных швов любой длины с учетом наличия в основных элементах в момент усиления сжимающих напряжений от нагрузки. Общий план решения заключается в определении прогибов от наложения каждого шва в отдельности и затем нахождения результирующей величины этих прогибов с учетом их направления. Прогибы стержня от наплавки каждого шва определяются следующим образом: находятся доли погонной тепловой мощности ( $q_n$ ), приходящиеся на основной ( $q_n^o$ ) и усиливающий ( $q_n^y$ ) элементы [16; 17; 19]; определяются остаточные сварочные напряжения в усиленном сечении, учитывая напряженное состояние этих элементов перед началом усиления; определяются прогибы усиленного стержня с учетом совместности работы составляющих его элементов.

Более подробно особенности методики определения прогибов рассмотрим на примере сжатого уголкового стержня, усиливаемого уголками (рис. 1).

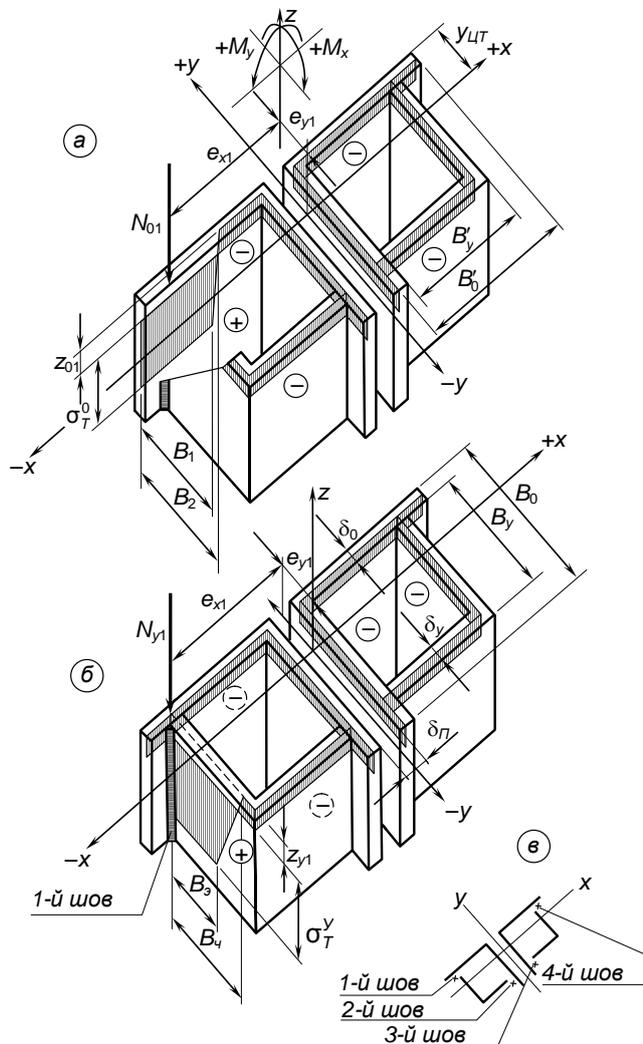


Рис. 1. Распределения остаточных сварочных напряжений

Порядок расчета сварочных напряжений от тепловой мощности, приходящейся на элементы усиления, аналогичен порядку их расчета в ненапряженном элементе [16; 17]: в расчетный момент времени  $t_p$  (момент,

соответствующий остыванию металла на оси шва до  $T_p=600$  °С) в предположении упругой работы материала определяется распределение условных упругих температурных напряжений; определяются временные сварочные напряжения; находится величина пластической составляющей временных сварочных напряжений; определяется распределение остаточных сварочных напряжений, рассматривая пластическую составляющую как свободную температурную деформацию от фиктивного источника тепла.

В отличие от элементов усиления, развитие сварочных деформаций в основном стержне происходит при наличии сжимающих напряжений от нагрузки. Учет этого при определении остаточных напряжений от тепловой мощности, приходящейся на основной стержень, производится следующим образом:

1. Аналогично вышеприведенному в расчетный момент времени  $t_p$  определяется распределение условных упругих температурных напряжений  $\sigma_x^{ycl}$  (рис. 2):

$$\sigma_x^{ycl} = \alpha_m E T(y, t_p),$$

где  $\alpha_m$  – коэффициент линейного температурного расширения;

$E$  – модуль упругих деформаций стали;

$T(y, t_p)$  – распределение температуры по ширине усиливаемого элемента в расчетный момент времени  $t_p$ .

Распределение  $T(y, t_p)$  может быть определено с помощью выражения предельного состояния процесса распределения тепла при нагреве пластины толщиной  $\delta_0$  мощным быстро движущимся линейным источником [16; 17; 19]:

$$T(y, t_p) = \frac{q_n^o}{\delta_0 \sqrt{4\pi\lambda c \gamma_p}} \exp\left(-\frac{y^2}{4\alpha t_p}\right),$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$c\gamma$  – удельная, объемная теплоемкости;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

2. Определяется пластическая составляющая временных напряжений, для чего производится следующее:

- выполняя требование равенства внутренних сил нулю, уравнивается распределение напряжений  $\sigma_x^{ycl}$ , то есть определяется положение нулевой линии  $y_o^1$  (в первом приближении);

- от нулевой линии  $y_o^1$  откладывается, как функция температуры, предел текучести  $\sigma_m(T, y)$ , отсекая, таким образом, в первом приближении пластическую составляющую временных напряжений;

- после вычитания пластической составляющей условие равновесия вновь нарушается и определяется новое положение нулевой линии  $-y_o^{11}$ , то есть во втором приближении; от линии  $y_o^{11}$  вновь откладывается  $\sigma_y(T, y)$  и производится уточнение пластической составляющей. При этом вновь нарушается условие равновесия. Уточнение пластической составляющей производится до тех

пор, пока напряжения на участках сечения не будут превышать предел текучести.

Полученное распределение временных напряжений не удовлетворяет второму условию равновесия, выражающемуся равенством нулю суммы моментов внутренних сил. Однако, как показывают расчеты, выполнение этого условия крайне незначительно влияет на величину пластической составляющей временных напряжений, и им можно пренебречь.

3. Пластическая составляющая временных напряжений корректируется с учетом напряжений  $\sigma_0$ , действующих от нагрузки. На рис. 2 она представлена часто заштрихованной частью эпюры напряжений

$$\sigma = \alpha_m ET(y, t_p) + \sigma_0.$$

4. Скорректированная пластическая составляющая временных напряжений рассматривается как свободные температурные напряжения от фиктивного источника тепла и последовательным уравниванием ее, подобно приведенным в п. 2, определяется распределение остаточных сварочных напряжений. В случае наплавки 1-го шва (рис. 1 в) распределения остаточных напряжений от тепловой мощности, приходящейся на основной и усиливающий элементы, будут иметь вид, представленный, соответственно, на рис. 1 а, б.

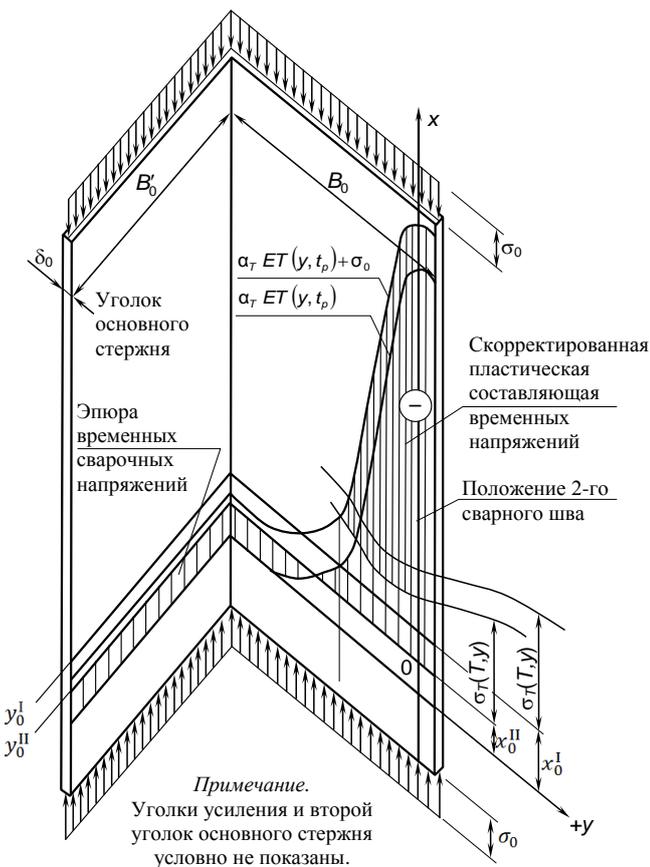


Рис. 2. К вопросу корректировки пластической составляющей временных сварочных напряжений

Распределения являются неуравновешенными: в плоскостях, перпендикулярных осям X и Y, действуют

изгибающие моменты, соответственно,  $M_{x1}$  и  $M_{y1}$ . Величина моментов может быть определена, как:

$$M_{x1} = -(N_{o1} + N_{y1})e_{y1}, \quad M_{y1} = (N_{o1} + N_{y1})e_{x1},$$

где  $N_{o1}$ ,  $N_{y1}$  – усадочные усилия, определенные при расчетах от тепловой мощности, приходящейся, соответственно, на основной и усиливающий уголок;

$e_{y1}$ ,  $e_{x1}$  – плечи усилий относительно, соответственно, осей X и Y.

В случае наплавки 1-го шва длиной  $l_{o1}$ , меньшей длины усиливаемого стержня  $l$ , выражения для определения прогибов  $f_{x1}$  и  $f_{y1}$  в направлении осей X и Y будут иметь вид:

$$f_{x1} = \frac{M_{y1}(2ll_{o1} - l_{o1}^2)\mu_y^2}{8EI_y},$$

$$f_{y1} = \frac{M_{x1}(2ll_{o1} - l_{o1}^2)\mu_x^2}{8EI_x},$$

где  $I_x$ ,  $I_y$  – моменты инерции усиленного сечения относительно осей X и Y;

$\mu_x$ ,  $\mu_y$  – коэффициенты приведения геометрической длины к расчетным в плоскостях, перпендикулярных, соответственно, осям X и Y.

Аналогичным образом могут быть получены выражения для определения прогибов стержня в направлении осей X и Y при наплавке 2-го, 3-го и 4-го швов:  $f_{x2}$ ,  $f_{y2}$ ,  $f_{x3}$ ,  $f_{y3}$ ,  $f_{x4}$ ,  $f_{y4}$ .

Прогибы стержня в случае наплавки всех четырех швов могут быть получены как результирующие величины прогибов, определенных для случаев раздельной наплавки всех швов (с учетом направления каждого из этих прогибов). В рассматриваемом примере результирующие прогибы  $f_x$  и  $f_y$  в направлении осей X и Y определяются, как:

$$f_x = f_{x1} + f_{x2} - f_{x3} - f_{x4}, \quad f_y = -f_{y1} + f_{y2} + f_{y3} - f_{y4}.$$

Предлагаемая методика расчета хорошо подтверждается экспериментально. Прогибы, полученные при усилении 18 натуральных сжатых стержней различной гибкости ( $\lambda = 86-124$ ), отличались от расчетных не более чем на 7 %.

На базе методики разработаны алгоритмы решения, позволяющие достаточно просто определять сварочные напряжения и деформации для различных вариантов усиления с использованием программных средств [20].

Полученные зависимости позволили предложить (впервые в области усиления) идею регулирования сварочных напряжений и деформаций с целью улучшения работы сжатых стержней, как в процессе усиления, так и уже усиленных.

Это явилось базой для обоснования сварочных технологий, дающих возможность, во-первых, проводить усиление стержней стальных уголкового ферм при любых усилиях, включая предельные расчетные величины, и, во-вторых, довольно существенно (до 30 %) повысить эффект от проводимого усиления (по сравнению с традиционными технологиями).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Десятков Б.И. Исследование работы усиляемых под нагрузкой элементов сварных стальных ферм : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1969. 24 с.
- Кизингер Р. Исследование напряжённого состояния растянутых стержней металлических ферм при их усилении под нагрузкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1973. 22 с.
- Колесников В.М. Исследование работы некоторых стальных конструкций и отдельных элементов, усиленных под нагрузкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1967. 24 с.
- Ребров И.С. К расчету стержневых систем, усиленных под нагрузкой // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1979. № 1. С. 62–67.
- Ребров И.С. Работа сжатых элементов стальных конструкций, усиленных под нагрузкой. Л.: Стройиздат, 1976. 176 с.
- Ребров И.С. Усиление стержневых металлических конструкций. Проектирование и расчет. Л.: Стройиздат, 1988. 288 с.
- Белый Г.И. Методика определения напряжённо-деформированных и предельных состояний в сечениях усиленных стержневых элементов при общем случае загрузки // Доклады: Теоретические основы строительства. М.: Варшава, 1998. С. 103–108.
- Бельский М.Р., Лебедев А.И. Усиление стальных конструкций. Киев: Будівельник, 1981. 120 с.
- Валь В.Н., Горохов Е.В., Уваров Б.Ю. Усиление стальных конструкций одноэтажных производственных зданий при их реконструкции. М.: Стройиздат, 1987. 220 с.
- Иванов Ю.В. Реконструкция зданий и сооружений: усиление, восстановление и ремонт. М.: АСВ, 2012. 312 с.
- Лашченко М.Н. Повышение надёжности металлических конструкций зданий и сооружений при реконструкции. Л.: Стройиздат, 1987. 135 с.
- Металлические конструкции. Т. 2. Конструкции зданий / под ред. В.В. Горева. 2-е изд. М.: Высш. шк., 2002. 520 с.
- Металлические конструкции. Справочник проектировщика. Т. 3 / под общ. ред. В.В. Кузнецова. М.: АСВ, 1999. 528 с.
- Металлические конструкции / под ред. Ю.И. Кудишина. 10-е изд. М.: Академия, 2007. 688 с.
- Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81\*). М.: Стройиздат, 1989. 160 с.
- Игнатьева В.С. Метод "фиктивных температур" как основа исследований в области напряженно-деформируемого состояния сварных соединений. Металлические конструкции в строительстве // Труды МИСИ им. Куйбышева. 1979. № 152. С. 71–88.
- Игнатьева В.С. Сварочные напряжения и деформации. М.: МИСИ, 1981. 68 с.
- Parlashkevich V.S. Welding voltage and deformation of elements of construction metal structures // European Science and Technology: materials of the VI international research and practice conference. Vol. II. Munich, 2013. P. 321–326.
- Сварка. Резка. Контроль. Т. 1 / под ред. Н.П. Алёшина, Г.Г. Чернышёва. М.: Машиностроение, 2004. 480 с.
- Дмитриева Т.Л. Методика и алгоритмы решения задач строительной механики с использованием программных средств. Ч. 2. Расчет плоских ферм в программах EXCEL, MATHCAD, COMPASS // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 2. С. 126–134.

## REFERENCES

- Desyatov B.I. *Issledovanie raboti usilyaemikh pod nagruzkoj 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.
- Kizinger R. *Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya rastyanutikh stержney metallicheskih ferm pri ikh usilenii pod nagruzkoj*. 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.
- Kolesnikov V.M. *Issledovanie raboti nekotorykh stalnikh konstruksiy i otdelnikh elementov, usilennikh pod nagruzkoj*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Study of work of some steel constructions and separate elements strengthened under the load]. Leningrad, 1967, 24 p.
- Rebrov I.S. To the calculation of column systems strengthened under the load. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura*, 1979, no. 1, pp. 62–67.
- Rebrov I.S. *Rabota szhatikh elementov stalnikh konstruksiy, usilennikh pod nagruzkoj* [Operation of fixed members of steel constructions strengthened under the load]. Leningrad, Stroyizdat publ., 1976, 176 p.
- Rebrov I.S. *Usilenie stержnevikh metallicheskih konstruksiy. Proektirovanie i raschet* [Column metal constructions strengthening. Design and calculation]. Leningrad, Stroyizdat publ., 1988, 288 p.
- Beliy G.I. Procedure of detection of strain-stressed and limit stages in the sections of strengthened column elements in general case of loading. *Doklady: Teoreticheskie osnovy stroitelstva*. Moscow, Varshava publ., 1998, pp. 103–108.
- Belskiy M.R., Lebedev A.I. *Usilenie stalnikh konstruksiy* [Steel structures strengthening]. Kiev, Budivelnik publ., 1981, 120 p.
- Val' V.N., Gorokhov E.V., Uvarov B.Yu. *Usilenie stalnikh konstruksiy odnoetazhnikh proizvodstvennikh zdaniy pri ikh rekonstruksii* [Strengthening of steel structures of one-storey production buildings during their reconstruction]. Moscow, Stroyizdat publ., 1987, 220 p.
- Ivanov Yu.V. *Rekonstruksiya zdaniy i sooruzheniy: usilenie, vosstanovlenie i remont* [Buildings and installations reconstruction: strengthening, restoration and repair]. Moscow, ASV publ., 2012, 312 p.
- Lashchenko M.N. *Povishenie nadezhnosti metallicheskih konstruksiy zdaniy i sooruzheniy pri rekonstruksii* [Safety improvement of metal structures of buildings and installations during the reconstruction]. Leningrad, Stroyizdat publ., 1987, 135 p.

12. 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.
13. Kuznetsov V.V., ed. *Metallicheskie konstruksii. Spravochnik proektirovshchika* [Metal structures. Design engineer reference book]. Moscow, ASV publ., 1999, vol. 3, 528 p.
14. Kudishin Yu.I., ed. *Metallicheskie konstruksii* [Metal structures]. 10th ed. Moscow, Akademiya publ., 2007, 688 p.
15. *Posobie po proektirovaniyu usileniya stalnih konstruksiy (k SNiP P-23-81\*)* [Manual on steel structures strengthening design (to SNiP P-23-81\*)]. Moscow, Stroyizdat publ., 1989, 160 p.
16. Ignatyeva V.S. "Slack temperatures" method as the basis for research in the field of strain-stress state of welded conjunctions. *Metal structures in construction. Trudi MISI im. Kuybisheva*, 1979, no. 152, pp. 71–88.
17. Ignatyeva V.S. *Svarochnie napryazheniya i deformatsii* [Welding stresses and deformations]. Moscow, MISI publ., 1981, 68 p.
18. Parlashkevich V.S. Welding voltage and deformation of elements of construction metal structures. *European Science and Technology: materials of the VI international research and practice conference*. Munich, 2013, vol. II, pp. 321–326.
19. Aleshin N.P., Chernishov G.G., eds. *Svarka. Rezka. Kontrol'* [Welding. Cutting. Control]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2004, vol. 1, 480 p.
20. Dmitrieva T.L. Methods and algorithms for solving problems of structural mechanics using software. P. 2. Calculation of plane trusses in the program EXCEL, MATHCAD, COMPASS. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, no. 2, pp. 126–134.

**WELDING DEFORMATIONS, «SLACK TEMPERATURES» METHOD  
AND THE STRENGTHENING OF FIXED COLUMNS OF ROOF STEEL TRUSSES**

© 2015

**I.K. Rodionov**, candidate of technical sciences,  
Associate Professor, assistant professor of the department «Urban Construction and Management»

**I.I. Rodionov**, buildings maintenance engineer  
*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

*Keywords:* roof steel trusses; fixed columns strengthening; methods of calculation of welding stresses and deformations.

*Abstract:* The strengthening of roof steel trusses is often achieved by the increase of columns section by means of joining of columns elements during welding. The welding heats the sections and develops flexural deformations. For rational strengthening, it is necessary to take into account these effects. In this connection, the authors developed the methods for calculation of welded deflections produced when strengthening by means of increase of sections in fixed columns of roof steel trusses. These methods are based on the method of determination of welding stresses and deformations known as the «slack temperatures» method. It takes into account the main characteristics of strengthening: the existence in the strengthened elements of compression stresses developed in the result of load, several longitudinal welding seams, and section complexity. These methods are based on the idea of thermal power division during the welding of elements depending on their thicknesses. In cases of strengthening by weld facing of each seam, the authors determined the distributions of welding stresses separately from thermal power necessary for strengthened and strengthening elements.

The procedure of calculation of welding stresses resulted from thermal power necessary for strengthening elements is the same as their calculation procedure in the unstressed element. When calculating stresses from thermal power necessary for the base elements, the authors take into account the compression stresses from the load.

The torques and, consequently, the column welding deflections are determined according to the mutual actions of shrinkage forces originated in the strengthened and the strengthening elements.

The obtained technique of calculation became the basis for the proving of welding technologies allowing strengthening of columns of steel angle trusses during any forcing, including the maximum permissible computed values, and considerably (up to 30 %) increase the effect from the strengthening (in comparison with the traditional technologies).