

**И.К. РОДИОНОВ****УСИЛЕНИЕ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ СТАЛЬНЫХ ФЕРМ ПОКРЫТИЯ И СВАРОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ****ENHANCING COMPRESSED RODS OF STEEL COATING FARMS AND THEIR WELDING DEFORMATIONS**

Представлена методика расчёта сварочных прогибов, появляющихся при усилении методом увеличения сечений сжатых стержней стальных ферм покрытия. В основе методики лежит метод определения сварочных деформаций, известный как метод «фиктивных температур». Учитываются отличительные особенности усиления: наличие в усиливаемых элементах сжимающих напряжений от нагрузки, наплавка нескольких продольных швов, сложность, разнообразие сечений. Методика явилась базой для обоснования сварочных технологий, дающих возможность проводить усиление стержней стальных уголкового ферм при любых усилиях, включая предельные расчётные величины, а также существенно повысить эффект от проводимого усиления (по сравнению с традиционными технологиями).

**Ключевые слова:** стальные фермы покрытия, сжатые стержни, усиление, сварочные деформации

The paper provides a calculation methodology for weld deflections appearing when the method of cross-sections increase of compressed rods of steel coating farms is applied. The methodology is based on the method of determining welding deformations known as the "dummy temperatures" method. The following distinctive features of reinforcement are taken into account: pressure tension from loading in reinforced elements, surfacing of several longitudinal welds, complexity and variety of cross-sections.

**Keywords:** Steel coating farms, compressed rods, reinforcement, welding deformations

Обследование стальных стропильных ферм покрытия промышленных зданий нередко выявляет необходимость увеличения их несущей способности. Это достигается применением различных методов усиления, среди которых, как наиболее часто применяемый, можно выделить метод увеличения сечения стержней, в том числе и сжатых, путём присоединения к ним на сварке дополнительных стержневых элементов.

Сварка накладывает свои особенности (порой негативные) на работу усиливаемых элементов: имеет место разогрев стержней, появляются временные и остаточные деформации.

Проблема влияния сварки комплексно не исследовалась ни в одной из известных работ по усилению. Этим объясняется разноречивость имеющихся рекомендаций, создающая серьёзные проблемы для эксплуатационников: в качестве соединительных предлагаются и сплошные, и прерывистые швы с различными порядками их наплавки; без учёта технологических параметров сварки предлагаются разные величины предельно допустимых при усилении нагрузок (от 0,4 до 0,8 от полных, расчётных для усиливаемых элементов).

Очевидна необходимость проведения исследований для аргументированного обоснования рациональных технологий сварки. Такие исследования проведены в Тольяттинском государственном университете. Одним из результатов их явилась разра-

ботка методики расчёта сварочных деформаций, появляющихся при усилении сжатых стержней стальных ферм. В основу методики положен аналитический метод определения сварочных напряжений и деформаций профессора В.С. Игнатъевой, известный как метод «фиктивных температур».

Методика позволяет решать задачу определения деформаций (прогибов) для общего случая наплавки нескольких продольных швов любой длины с учётом 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 нахождении результирующей величины этих прогибов с учётом их направления. Прогибы стержня от наплавки каждого шва определяются (при условии предварительного присоединения усиливающих элементов на прихватках) следующим образом:

- вычисляются доли эффективной тепловой мощности  $q_n$ , приходящиеся на основной  $q_n^0$  и  $q_n^y$  усиливающий элементы;
- рассчитываются остаточные сварочные напряжения в усиленном сечении, принимая во внимание напряжённое состояние этих элементов перед началом усиления;
- определяются прогибы усиленного стержня с учётом совместности работы составляющих его элементов.

Более подробно особенности методики определения прогибов от сварки можно рассмотреть на примере сжатого уголкового стержня, усиленного уголковыми элементами по схеме «коробочка» (рис. 1).

Порядок расчёта сварочных напряжений от тепловой мощности, приходящейся на элементы усиления, аналогичен порядку их расчёта в ненапряжённом элементе [1,2]:

- в расчётный момент времени (момент, соответствующий остыванию металла на оси шва до  $T_p = 600^\circ\text{C}$  в предположении упругой работы материала) рассчитывается распределение условных упругих температурных напряжений;
- вычисляются временные сварочные напряжения;
- находится величина пластической составляющей временных сварочных напряжений;
- рассчитывается 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. Учёт этого фактора при определении остаточных напряжений от тепловой мощности, приходящейся на уголки основного стержня, производится следующим образом:

1. Аналогично вышеприведённому, в расчётный момент времени  $t_p$  рассчитывается распределение условных упругих температурных напряжений  $\sigma_x^{yc\lambda}$  (рис.2):

$$\sigma_x^{yc\lambda} = \alpha_T E T(y, t_p),$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент линейного температурного расширения;  $E$  – модуль упругих деформаций стали;  $T(y, t_p)$  – распределение температуры по ширине усиленного элемента в расчётный момент времени  $t_p$ .

Распределение  $T(y, t_p)$  может быть определено с помощью приближённого выражения предельного состояния процесса распределения тепла при нагреве пластины толщиной  $\delta_0$  мощным быстро движущимся линейным источником [3]:

$$T(y, t_p) = \frac{q_{\text{п}}^0}{\delta_0 \sqrt{4\pi\lambda c \gamma t_p}} \exp\left(-\frac{y^2}{4at_p}\right),$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c\gamma$  – удельная, объёмная теплоёмкость;  $a$  – коэффициент теплоотдачи.

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

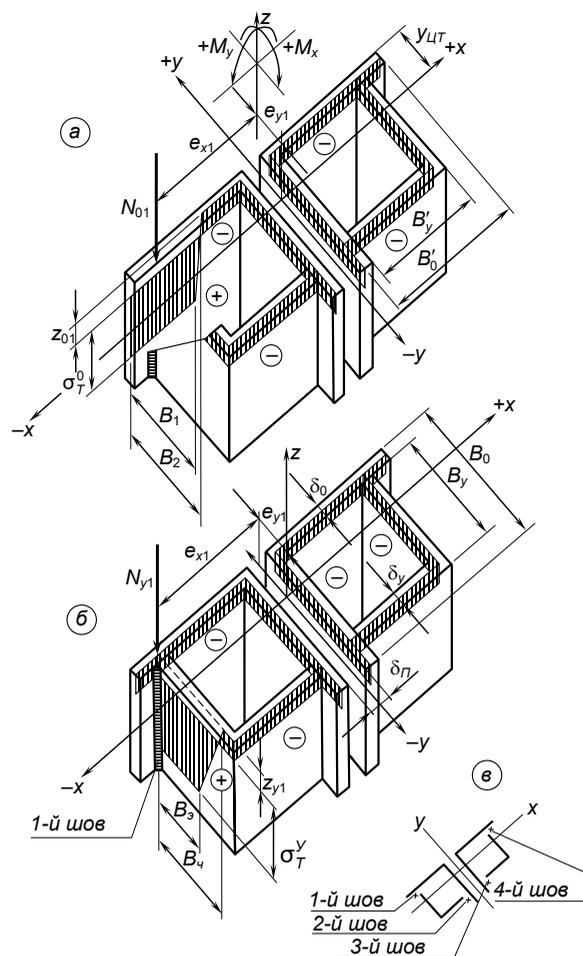


Рис. 1. Распределения остаточных сварочных напряжений

- для выполнения требований равенства внутренних сил нулю уравнивается распределение напряжений  $\sigma_x^{yc\lambda}$ , т.е. рассчитывается положение нулевой линии  $y_0^1$  (в первом приближении);
- от нулевой линии  $y_0^1$  откладывается, как функция температуры, предел текучести  $\sigma_T(T, y)$ , таким образом отсекается в первом приближении пластическая составляющая временных напряжений;
- после вычитания пластической составляющей условие равновесия вновь нарушается и определяется новое положение нулевой линии  $y_0^{11}$ , т.е. во втором приближении; от линии  $y_0^{11}$  откладывается  $\sigma_T(T, y)$  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. В большинстве случаев для инженерных задач достаточно второго приближения.

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

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

$$\sigma = \alpha_T E T(y, t_p) + \sigma_0$$

4. Скорректированная пластическая составляющая временных напряжений рассматривается как свободные температурные напряжения от фиктивного источника тепла, и последовательным уравниванием её, подобно приведенным в п. 2, определяется распределение остаточных сварочных напряжений.

В случае наплавки 1-го сварного шва (рис. 1, в) распределение остаточных сварочных напряжений от долей тепловой мощности, приходящихся на основную и усиливающий элемент, будет иметь вид, представленный соответственно на рис. 1, а, б. Распределение является неуровновешенным: относительно осей X и Y действуют изгибающие моменты соответственно  $M_{x1}$  и  $M_{y1}$ , величина которых рассчитывается следующим образом:

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

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

где  $N_{o1}, N_{y1}$  – усадочные усилия, определённые при расчётах тепловой мощности, приходящейся соответственно на основной и усиливающий уголки;  $e_{y1}, e_{x1}$  – плечи усадочных усилий относительно соответственно осей X и Y.

Усадочные усилия  $N_{o1}$  и  $N_{y1}$  определяются как

$$N_{o1} = \sigma_T^o \frac{B_1 + B_2}{2} \delta_o,$$

$$N_{y1} = \sigma_T^y \frac{B_3 + B_4}{2} \delta_y,$$

где  $\sigma_T^o$  и  $\sigma_T^y$  – пределы текучести соответственно материала основного стержня и элемента усиления;  $B_1$  и  $B_2$  – основания трапеции эпюры напряжений основного стержня;  $B_3$  и  $B_4$  – основания трапеции эпюры напряжений элемента усиления;  $\sigma_0$  и  $\sigma_y$  – толщина полки соответственно основного уголка и уголка усиления.

В случае наплавки 1-го шва длиной  $l_{o1}$ , меньшей длины усиливаемого стержня  $l$ , выражения для

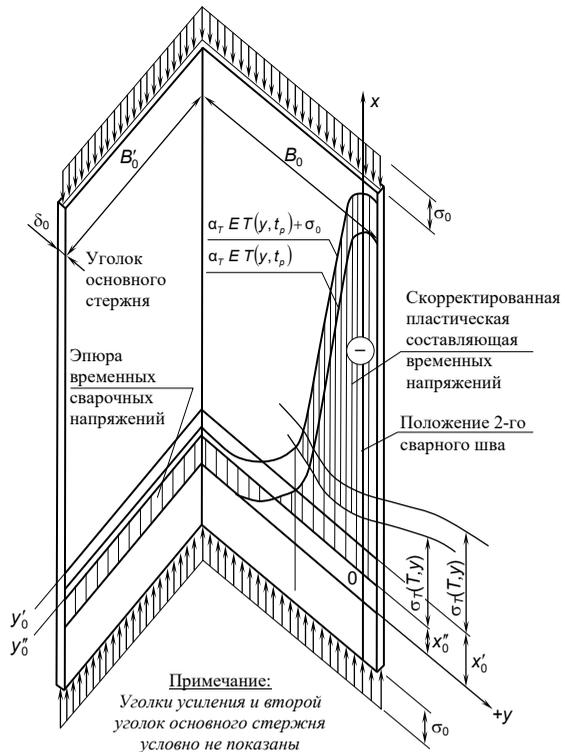


Рис. 2. К вопросу корректировки пластической составляющей временных сварочных напряжений

определения прогибов  $f_{x1}$  и  $f_{y1}$  в направлении осей X и Y будут иметь вид:

$$f_{x1} = \frac{M_{y1}(2l_{\omega 1} - l_{\omega 1}^2)\mu_y^2}{8EI_y},$$

$$f_{y1} = \frac{M_{x1}(2l_{\omega 1} - l_{\omega 1}^2)\mu_x^2}{8EI_x},$$

где  $I_x, I_y$  – моменты инерции усиленного сечения относительно осей X и Y;  $\mu_x, \mu_y$  – коэффициенты приведения геометрической длины к расчетной 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 учётом направления каждого из этих прогибов). В рассматриваемом примере результирующие прогибы  $f_x$  и  $f_y$  в направлении осей X и Y рассчитываются следующим образом:

$$f_x = f_{x1} + f_{x2} - f_{x3} - f_{x4},$$

$$f_y = -f_{y1} + f_{y2} + f_{y3} - f_{y4}.$$

Предлагаемая методика расчёта достаточно хорошо подтверждается экспериментально. Прогнозы, полученные при усилении 18 натурных сжатых стержней различной гибкости ( $\lambda = 86 - 124$ ), отличались от расчётных не более чем на 7 %.

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.

**Выводы.** Проведенные исследования явились базой для обоснования сварочных технологий, дающих возможность:

- 1) проводить усиление сжатых стержней стальных уголкового ферм при любых усилиях, включая предельные расчётные величины;
- 2) довольно существенно (до 30 %) повысить эффект от проводимого усиления (по сравнению с традиционными технологиями) [5–7].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатъева В.С.* Исследование остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях металлических конструкций: автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: МИСИ, 1972. 24 с.

2. *Игнатъева В.С.* Сварочные напряжения и деформации: учебное пособие для слушателей ФПКП. М.: МИСИ, 1981. 72 с.

3. Сварка. Резка. Контроль: в 2 т.: справ. Т 1 / Н.П. Алёшин, Г.Г. Чернышёв, А.И. Акулов и др.; под ред. Н.П. Алёшина, Г.Г. Чернышёва. М: Машиностроение, 2004. 506 с.

4. *Родионов И.К.* Сварочные технологии регулирования напряженного состояния усиливаемых сжатых стержней стальных ферм покрытий: монография. Самара, 2006. 200 с.

5. *Демидов Н.Н.* Усиление стальных конструкций [Электронный ресурс]: учебное пособие. М.: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2016. 85 с. Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/49869>. — ЭБС «IPRbooks» (дата обращения: 16.08.2017).

Об авторе:

**РОДИОНОВ Игорь Константинович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного, гражданского строительства и городского хозяйства  
Тольяттинский государственный университет  
445020, Россия, г. Тольятти, ул. Ушакова, 59,  
тел. 8 917 129-71-55  
E-mail: riklt@mail.ru

6. *Десятов Б.И.* Исследование работы усиливаемых под нагрузкой элементов сварных стальных ферм: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСИ, 1968. 24 с.

7. *Колесников В.М.* Исследование работы некоторых стальных конструкций и отдельных элементов, усиленных под нагрузкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛИСИ, 1967. 24 с.

**RODIONOV Igor K.**  
PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Industrial and Civil Engineering and Urban Management Chair  
Togliatti State University  
445020, Russia, Togliatti, Ushakova str., 59,  
tel. 8 917 129-71-55  
E-mail: riklt@mail.ru

Для цитирования: *Родионов И.К.* Усиление сжатых стержней стальных ферм покрытия и сварочные деформации // Градостроительство и архитектура. 2017. Т.7, №3. С. 10-13. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.03.2.

For citation: *Rodionov I.K.* Enhancing compressed rods of steel coating farms and their welding deformations // Urban Construction and Architecture. 2017. V. 7, 3. Pp. 10-13. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.03.2.