

УДК 624.042.65

к.т.н. Псюк В. В.,  
к.т.н. Балашова О. С.,  
Никишина И. А.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВАРКИ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

В статье рассматривается влияние остаточных напряжений на несущую способность сварных строительных конструкций, а также возможность регулирования остаточного напряженного состояния с помощью накладки электродуговой сваркой холостых валиков. Приведен алгоритм расчета параметров электродуговой сварки в зависимости от количества наносимых швов, остаточного прогиба элемента.

**Ключевые слова:** остаточное напряженное состояние, электродуговая сварка, остаточный прогиб, сжатые элементы.

Остаточные напряжения оказывают влияние на несущую способность, устойчивость и деформативность сварных строительных конструкций. Это влияние неоднозначно, поэтому актуальным является вопрос об изучении распределения остаточных напряжений, а также о регулировании внутреннего напряженно-деформированного состояния конструкций. В полной мере этот вопрос представляет интерес и для конструкций из труб квадратного сечения.

Необходимость в проведении настоящих исследований возникла в связи с отсутствием в действующей нормативной литературе СНиП II-23-81\* [1] и ДБН В.2.3-14:2006 [2] рекомендаций по определению ОНС и его учета при расчетах сжатых элементов из стальных труб.

Температурное состояние металла сварного соединения определяется количеством вносимого тепла, продолжительностью нагрева, теплофизическими характеристиками металла, геометрическими размерами изделия.

Сварочная дуга является мощным концентрированным источником теплоты. Большая часть электрической энергии, потребляемой дугой, превращается в тепловую. Эффективная тепловая мощность сварочной дуги определяется по формуле (1):

$$q = \eta \cdot I_{св} \cdot U_{св}, \quad (1)$$

где  $\eta$  — эффективный КПД процесса нагрева;  $I_{св}$  — сварочный ток, А;  $U_{св}$  — напряжение дуги, В.

Погонная энергия сварки, которая характеризует количество теплоты, вводимое в 1 см длины однопроходного шва или валика, определяется по формуле (2):

$$q_n = \frac{q}{v_{св}}, \quad (2)$$

где  $v_{св}$  — скорость сварки.

Погонная энергия является основным показателем для выбора режима сварки. Параметрами, по которым осуществляется подбор режима сварки, являются ток  $I_{св}$  и скорость сварки  $v_{св}$ . Величина тока в наибольшей степени определяет тепловую мощность дуги. С увеличением тока возрастают длина и ширина сварочной ванны, а также глубина проплавления металла. При назначении тока учитывают толщину свариваемого металла, диаметр электрода, тип шва и положение его в пространстве. Диаметр электрода подбирают с учетом толщины металла. Величину тока можно определить, пользуясь эмпирической формулой (3):

$$I_{св} = (20 \pm 6 \cdot d_э) \cdot d, \quad (3)$$

где  $d_э$  — диаметр электрода, мм.

Напряжение дуги при ручной дуговой сварке изменяется в узких пределах (20–36 В) и при расчетах режима сварки не регламентируется. Скорость сварки определяется по формуле:

$$v_{св} = \frac{\alpha_n \cdot I_{св}}{F \cdot \varphi}, \quad (4)$$

где  $\alpha_n$  — коэффициент наплавки, г/А·ч;  $F$  — площадь поперечного сечения однопроходного шва, мм<sup>2</sup>;  $\varphi$  — плотность наплавленного металла, г/см<sup>3</sup>.

На основе общих принципов расчета сварочных деформаций, предложенных Н. О. Окербломом [3], можно рассчитать количество теплоты, необходимое для осуществления предварительного напряжения центрально- и внецентренно-сжатых элементов из труб квадратного сечения.

Для создания минимальных остаточных деформаций стержня задаемся остаточным прогибом элемента из труб квадратного сечения, который возникает после наплавки холостых валиков по образующим:

$$f = -\frac{L}{1000}, \quad (5)$$

где  $L$  — длина трубы, см.

Учитываем, что холостой валик наплавляется на части длины элемента, поэтому его прогиб посередине длины определяется по формуле:

$$f = \chi_{mp} \cdot \frac{a}{4} \cdot \left( L - \frac{a}{2} \right), \quad (6)$$

где  $\chi_{mp}$  — общая кривизна трубы после наплавки холостого валика сварного шва;

$a$  — участок, на котором наплавлялся холостой валик сварного шва, первоначально задается  $a = 0,1 \times L$ , мм.

Наплавку холостого валика выполняют в средней части длины трубы в направле-

нии от центра к краям (рис. 1), при этом длина швов составляет  $l_{шв} = a/2$ .

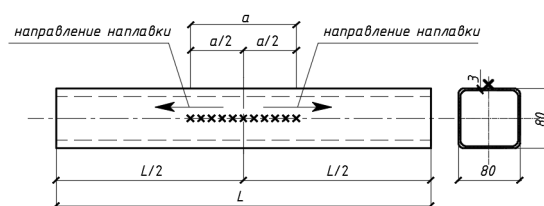


Рисунок 1 Схема расположения и направления наплавки холостых валиков

Приравняв уравнения (5) и (6), получаем:

$$-\frac{L}{1000} = \chi_{mp} \cdot \frac{a}{4} \cdot \left( L - \frac{a}{2} \right). \quad (7)$$

Преобразовав уравнение (7), определяем общую кривизну трубы:

$$\chi_{mp} = -\frac{8 \cdot L}{1000 \cdot a \cdot (2 \cdot L - a)}. \quad (8)$$

Определяем погонную энергию сварки при наплавке одного или нескольких холостых валиков по образующим на трубчатых элементах, пользуясь общей формулой расчета:

$$q_{nm} = \frac{\chi_{mp} \cdot I_x}{\mu \cdot \sum y'}, \quad (9)$$

где  $\mu$  — коэффициент, учитывающий тип металла, см<sup>3</sup>/кал;

$I_x$  — момент инерции сечения трубы относительно оси  $x$ , см<sup>4</sup>;

$\sum y'$  — сумма расстояний от главной центральной оси до сварных швов холостых валиков, см.

При внецентренном сжатии необходимо наплавлять один или два холостых валика по образующим (рис. 2, 3) со стороны приложения нагрузки для обеспечения рационального перераспределения остаточных напряжений в элементе из труб квадратного сечения.

При наплавке одного валика в формулу (9) подставляют значение  $y' = r$ .

При центральном сжатии рационально наплавлять четыре холостых валика под углом  $90^\circ$  (рис. 4). При этом  $\sum y' = 0$  ( $\sum x' = 0$ ). В данном случае погонная энергия сварки определяется как для одного холостого валика, напавленного по одной из главных осей трубы.

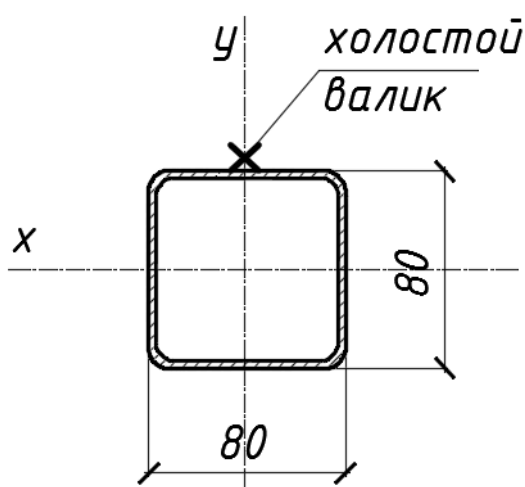


Рисунок 2 Схема наплавки одного холостого валика по одной из главных осей трубчатого элемента

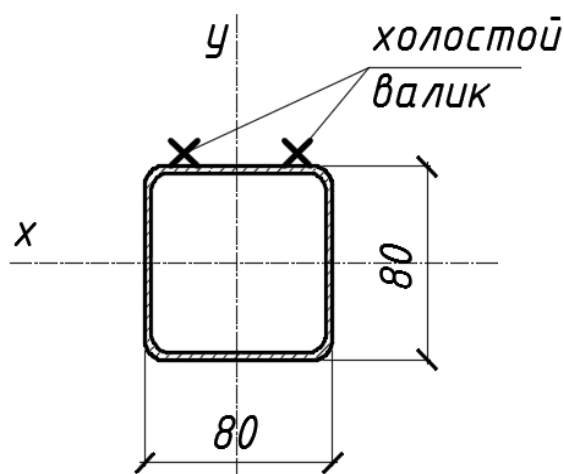


Рисунок 3 Схема наплавки двух холостых валиков с одной стороны главной оси трубчатого элемента

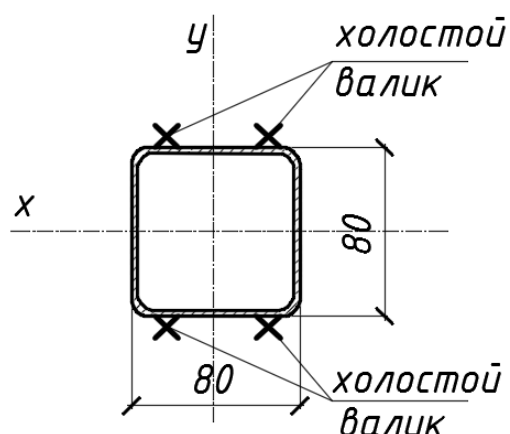


Рисунок 4 Схема наплавки четырех холостых валиков с обеих сторон главной оси трубчатого элемента

Выполняем проверку условия:

$$0 < \frac{q_{nm}}{A_{mp}} < 625 \left( \frac{Дж}{см^3} \right), \quad (10)$$

где  $A_{mp}$  — площадь поперечного сечения трубы,  $см^2$ .

Если условие не выполняется, тогда изменяем длину участков, на которые наплавляют холостые валики, исходя из условия допустимого прогиба, и выполняем расчет заново.

Определяем величину тока:

$$I_{cv} = \frac{v_{cv} \cdot q_{nm}}{0,24 \cdot U \cdot \eta}, \quad (11)$$

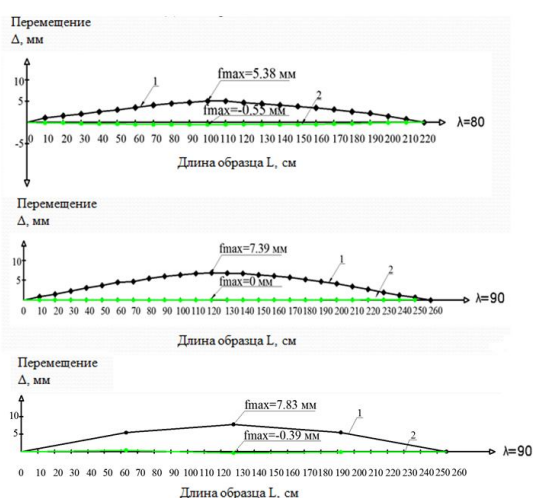
где  $v_{cv}$  — скорость сварки, принимают  $v_{cv} = 1,0 \div 1,2$  см/сек,  $U$  — напряжение дуги, принимают  $U = 20 \div 36$  В;  $\eta$  — коэффициент КПД нагрева изделия для дуговой сварки, принимают  $\eta = 0,6 \div 0,85$ ; 0,24 — коэффициент, учитывающий влияние, оказываемое несинусоидальностью кривых напряжения и тока на мощность дуги при сварке на переменном токе.

В ходе расчетов уточняем длину участков, на которые наплавляется холостой валик, исходя из условия допустимого прогиба.

Данная методика была использована

для правки элементов из труб квадратного сечения различной гибкости, которые имели остаточный прогиб после проведения испытания на устойчивость.

Для этого уточнялась стрела остаточного прогиба каждого образца: по длине образца были размечены точки с интервалом 10 см и в каждой точке при помощи прогибомера определялась величина остаточного прогиба. Результаты измерений образцов 2ГК8-2.5, 3ГК8-2.8, 9ГК8-2.8 приведены на рисунке 5.



1 – остаточный прогиб после испытания на устойчивость; 2 – остаточный прогиб после правки сваркой

Рисунок 5 График распределения остаточного прогиба ( $f_{ост}$ ) по длине образцов 2ГК8-2.5 (а), 3ГК8-2.8 (б), 9ГК8-2.8 (в)

На основе предложенной методики и справочных данных [4] было определено количество теплоты, необходимое для осуществления предварительного напряжения элементов из труб квадратного сечения.

Таким образом, были установлены параметры сварки, необходимые для правки элементов из труб квадратного сечения с остаточным прогибом. Были приняты электроды типа АНО-21, диаметр электродов  $\varnothing$  3–4 мм, максимальная сила тока и напряжение достигали 140 А и 30 В соответственно, катет шва — 5 мм, высота шва — 2–5 мм, общая длина шва — 80 см.

Правка элементов выполнялась путем наплавки валиков сварных швов на растянутой стороне образцов (рис. 6).

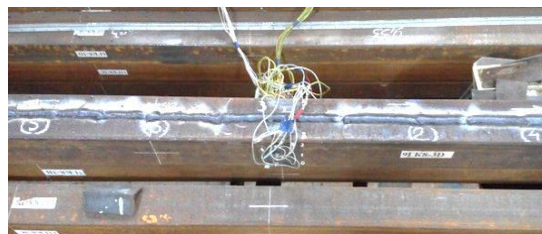


Рисунок 6 Правка элементов путем наплавки валиков сварных швов на растянутой стороне образцов

После правки повторно определялась стрела остаточного прогиба каждого образца (рис. 5).

Как видно из полученных результатов, предложенная методика позволила определить достоверные параметры наплавки холостых валиков на образцах из труб квадратного сечения, имеющих остаточный прогиб, для их правки. При этом данный процесс сопровождается изменением остаточного напряжённого состояния в сечении элемента [5]. Исследование устойчивости образцов после правки [6] показало, что образцы, которые подверглись регулированию остаточного напряжённого состояния путём наложения сварного шва, имели несущую способность на 10–20 % выше исходных образцов.

#### Выводы:

1. Предложена методика определения необходимого количества тепловой энергии, вводимой в элемент после выполнения регулирования ОНС путем наплавки холостых валиков сварных швов на элементы из труб квадратного сечения, с учетом остаточных деформаций.

Методика позволяет при заданной величине относительного прогиба определить параметры технологического процесса сварки (подобрать диаметр электрода, напряжение и силу тока).

После наплавки сварного шва по предлагаемой методике в элементе практически отсутствует остаточный прогиб.

2. Данная методика позволяет производить регулирование ОНС элементов из труб квадратного сечения как на стадии проектирования для создания предварительного

напряжения элементов в состоянии поставки, так и для правки элементов, имеющих остаточные прогибы при их усилении.

### Библиографический список

1. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции [Текст]. — М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. — 96 с.
2. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель та споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення, монтажу [Текст]. — К. : Мінрегіонбуд України, 2010. — 202 с.
3. Окерблом, Н. О. Расчет деформаций металлоконструкций при сварке [Текст] / Н. О. Окерблом. — М.; Л. : Машигиз, 1955. — 212 с.
4. Мальшев, Б. Д. Сварка и резка в промышленном строительстве: справочник строителя [Текст] / Б. Д. Мальшев, А. И. Акулов, Е. К. Алексеев и др. — М. : Стройиздат, 1989. — 590 с.: ил.
5. Псюк, В. В. Распределение остаточных напряжений в стальных трубах квадратного сечения [Текст] / В. В. Псюк, И. А. Никишина // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. — К. : Вид-во "Сталь", 2014. — Вып. 14. — С. 129–135.
6. Псюк, В. В. Расчёт сталежелезобетонных перекрытий с учётом влияния неупругих свойств железобетона [Текст] / В. В. Псюк, В. В. Риблов, Е. В. Кондратюк // Вестник строительства и архитектуры. — Орел : ООО ПФ «Картуш», 2015. — Вып. 4. — С. 56–61.
7. Голоднов, А. И. Использование термических воздействий при усилении строительных конструкций металлическими элементами [Текст] / А. И. Голоднов // Буд. конструкції: Міжвідом. наук.-техн. зб. — К. : НДІБК, 2003. — Вып. 58. — С. 14–20.

© Псюк В. В.

© Балашова О. С.

© Никишина И. А.

*Рекомендована к печати заведующим каф. АПиИГ ДонГТУ, к.т.н., доц. Бондарчуком В. В., д.т.н., проф. каф. ГиПС ИСАиЖКХ ЛНУ им. В. Даля Дроздом Г. Я.*

*Статья поступила в редакцию 14.06.17.*

**к.т.н. Псюк В. В., к.т.н. Балашова О. С., Никишина И. О. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)  
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО  
НАПРУЖЕНОГО СТАНУ**

*В статті розглянуто вплив залишкових напружень на несучу здатність зварних будівельних конструкцій, а також можливість регулювання залишкового напруженого стану за допомогою накладки електродуговим зварюванням холостих валиків. Наведено алгоритм розрахунку параметрів електродугового зварювання в залежності від кількості нанесених швів, залишкового прогину елемента.*

**Ключові слова:** залишковий напружений стан, електродугове зварювання, залишковий прогин, стиснуті елементи.

**PhD Psiuk V. V., PhD Balashova O. S., Nikishina I. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)  
DETERMINING THE WELDING PARAMETERS FOR CONTROLLING THE RESIDUAL  
STRESS**

*The paper examines influence of residual stresses on bearing capacity of welded building constructions as well the possibility to control the residual stress by welding on idler spindles using electric arc welding. There has been given the calculation scheme for electric arc welding parameters depending on number of bead joints and residual element deflection.*

**Key words:** residual stress, electric arc welding, residual deflection, compressed elements.