

УДК 621.791.052:539.373:51–74

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ ИЗ СТАЛИ 03Х17Н9М3 МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© Биленко Георгий Андреевич, e-mail: bga@delcam-ural.ru

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»; Группа компаний «ПЛМ Урал» – «Делкам-Урал». Россия, г. Екатеринбург

Статья поступила 24.02.2015 г.

Проведен анализ местных остаточных напряжений в сварном кольцевом соединении двух труб из стали 03Х17Н9М3, выполненном методом орбитальной сварки неплавящимся электродом в защитных газах. Для исследования использовано компьютерное моделирование процесса сварки методом конечных элементов.

Ключевые слова: сварка трубопровода; орбитальная многопроходная сварка; сварка аустенитных коррозионностойких хроникельмолибденовых сталей; остаточные сварочные напряжения и деформации.

Обеспечение работоспособности в заданном периоде эксплуатации конструкций из нержавеющей сталей, выполненных с применением орбитальной многопроходной сварки – проблема актуальная, особенно для изделий атомной промышленности, где количество кольцевых сварных швов исчисляется десятками сотен. Для выполнения таких требований необходима информация о напряженно-деформированном состоянии (НДС) как самого сварного соединения, так и конструкции в целом, так как именно остаточные напряжения приводят к значительным изменениям проектных размеров или в процессе сварки, или в ходе эксплуатации изделия. Высокий уровень НДС в сварном шве может дополнительно вызывать образование трещин, которые приводят к отказу изделия и дорогостоящему ремонту.

Для оценки уровня остаточных напряжений в кольцевых сварных швах в данной работе был проведен анализ НДС сварного соединения наиболее распространенного типа, используемого в трубопроводной арматуре атомных станций – стыкового, с симметричной разделкой кромок. Свариваемое изделие – труба размерами 9,5×100 мм из стали 03Х17Н9М3, материал электрода – стальная проволока 04Х19Н11М3.

Эскиз сварного соединения с геометрическими параметрами приведен на рис. 1. Сварка осуществляется в среде защитного газа. Режимы сварки приведены в таблице. В ходе сварки концы труб были жестко закреплены в оснастке, но после каждого прохода сварки торец верхней трубы ослаблялся.

Анализ НДС проведен с использованием программного обеспечения Visual Weld 9.5 ESI Group, основанного на методе конечных элементов (МКЭ) [1], который хорошо зарекомендовал себя для решения задач механики твердого деформированного тела. Геометрическое представление КЭ-модели показано на рис. 2.

Модель, основанная на последовательном решении уравнений теплового баланса (1) [2] и механики деформированного твердого тела (3–6) [3], предусматривает расчет полей температурных градиентов, иницируемых источником тепла сварки, а затем полей механических напряжений и деформаций. Расчет теплового состояния учитывает неравномерный нагрев и охлаждение, плавление и кристаллизацию металла при сварке

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = -\lambda \text{grad}(T) + q, \quad (1)$$

где $\rho C \frac{\partial T}{\partial t}$ – изменение внутренней энергии тела;

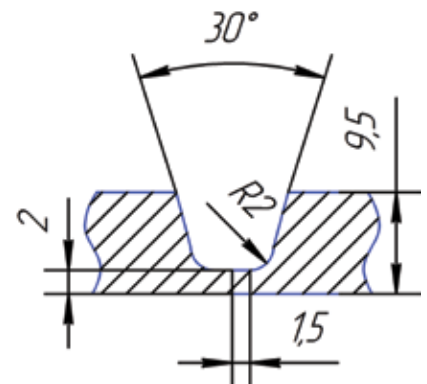


Рис. 1. Геометрические параметры сварного соединения

Режимы сварки, используемые в расчете

Сварочные проходы швов	Режимы сварки		
	ток, А	напряжение, В	скорость, мм/мин
Корневой (1)	90	25	85
Заполняющие (2–7)	120	28	90
Лицевой (8–10)	130	28	145

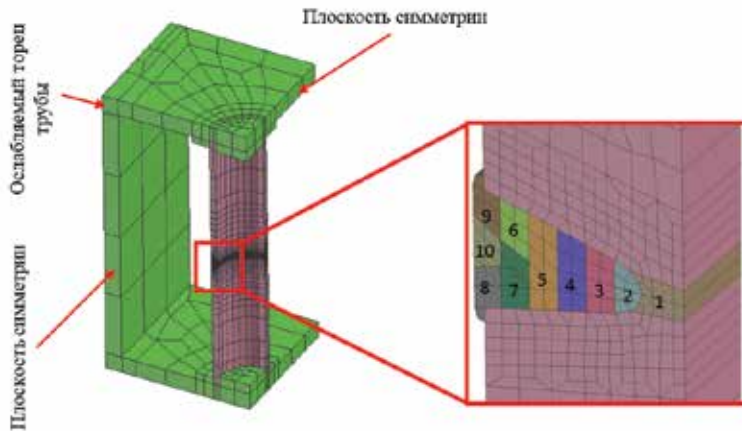


Рис. 2. КЭ-модель свариваемой трубы, установленной в оснастке

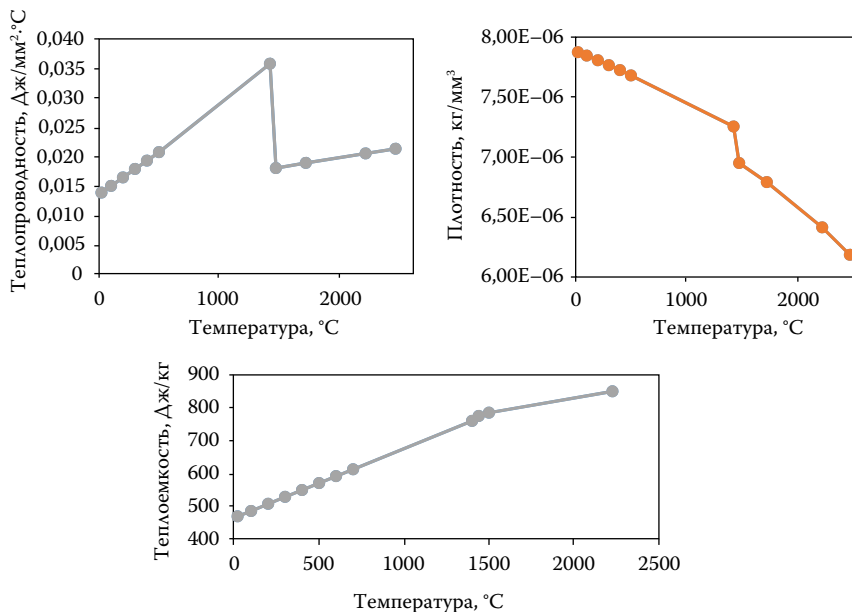


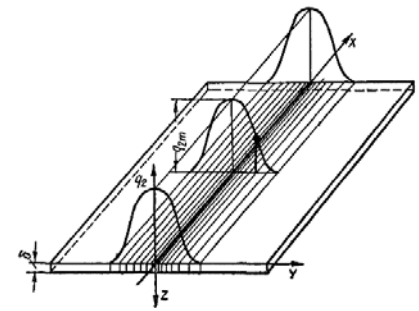
Рис. 3. Изменение теплофизических характеристик сталей 03X17N9M3 и 04X19N11M3 в зависимости от температуры

$-\lambda \text{grad}(T)$ – теплота, подводимая внешними источниками; q – теплота, выделенная внутренними источниками.

Для решения тепловой задачи в качестве граничного условия на поверхности сварного шва и трубы принято условие полного теплообмена – лучистого и конвективного [2]

$$K_0 = K_\lambda + K_\kappa, \quad (2)$$

где $K_\lambda = Ce(T + T_0)(T^2 + T_0^2)$ – лучистая и $K_\kappa = 25 \text{ Вт/мм}^2$ – конвективная составляющие теплообмена; $T_0 = 20^\circ\text{C}$ – начальная температура среды; T – температура нагрева; C – постоянная Стефана-Больцмана; e – коэффициент черноты тела. Значения использованных в расчете теплофизических характеристик сталей определены по графикам, приведенным на рис. 3 [4].

Рис. 4. Модель ввода тепла на развертке сектора свариваемых труб:
 δ – толщина стенки трубы,
 q_{2m} – максимальный тепловой поток

Теплота, выделенная источником, вводилась по закону нормального полосового источника тепла, действующего в окружном направлении на всю длину сектора [2]. Модель ввода в развертке на плоскость схематично представлена на рис. 4.

Механическое поведение материала рассматривали как упругопластическое, описываемое уравнениями (3)–(5) [3].

Уравнение статического равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{i,j}}{\partial x_i} = 0, \quad (3)$$

где $\sigma_{i,j}$, x_i – тензоры напряжения и оси прямоугольной системы координат.

Деформация представлена как сумма компонент

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p + \epsilon^{th}, \quad (4)$$

где ϵ_e , ϵ_p , ϵ^{th} – упругие, пластические и термоупругие деформации.

Переход материала в пластическое состояние характеризуется критерием пластичности

$$F(\sigma, \chi, \sigma_\tau(T)) = f(\sigma - \chi) - \sigma_\tau(T) \geq 0, \quad (5)$$

где $\sigma_\tau(T)$ – предел текучести материала в зависимости от температуры; σ – тензор напряжения; χ – направляющий тензор.

Общий вид закона пластического деформирования описывается выражением

$$\epsilon_p = \lambda \frac{\partial \tau^2}{\partial S_{i,j}}, \quad (6)$$

где $\partial \tau^2$ – приращение интенсивности девиатора напряжений; $\partial S_{i,j}$ – девиатор напряжения; λ – скалярная величина.

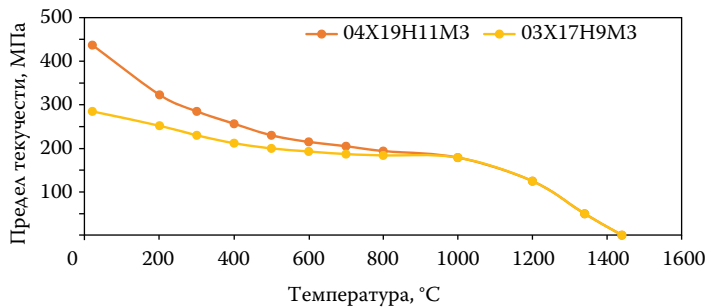


Рис. 5. Изменение предела текучести сталей 03X17H9M3 и 04X19H11M3 в зависимости от температуры

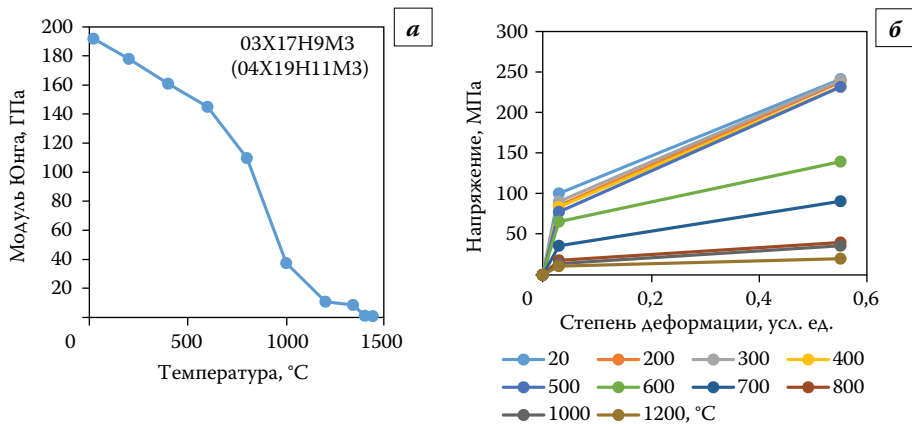


Рис. 6. Изменение механических свойств сталей 03X17H9M3 и 04X19H11M3 в зависимости от температуры: а – модуль упругости; б – кривые деформационного упрочнения

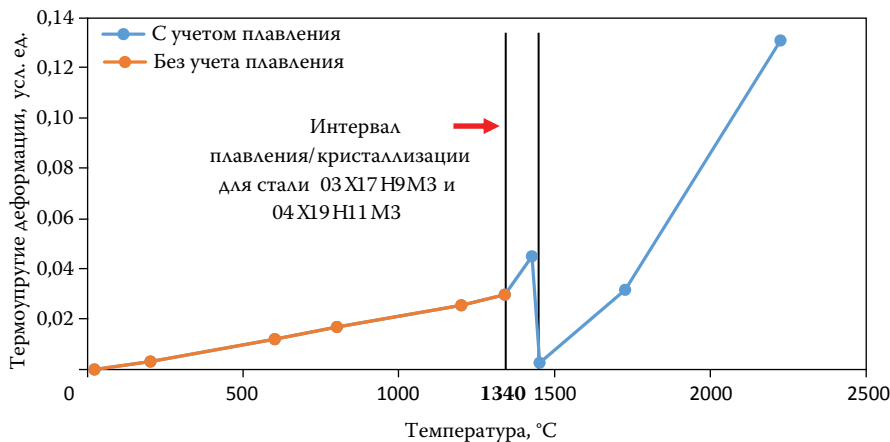


Рис. 7. График изменения тепловых деформаций в зависимости от температуры

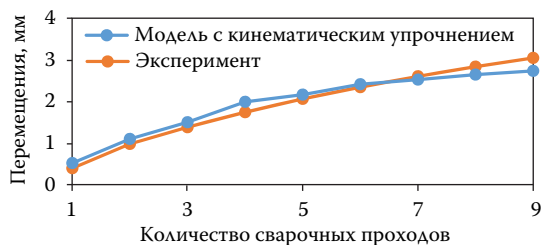


Рис. 8. Сравнение экспериментально измеренных и рассчитанных перемещений после каждого прохода

Использованные в расчете механические характеристики материала определены по графикам, представленным на рис. 5–7 [4].

Плавление и кристаллизация металла сопровождаются процессами расширения и усадки [5], что в модели было учтено нелинейно изменяющейся термоупругой деформацией (см. рис. 7).

Экспериментальное измерение сварочных деформаций показало, что максимальная ошибка расчетов составила 14% (рис. 8). Анализ расчетной и экспериментальной форм сечения шва после сварки показал (рис. 9), что расхождение связано с использованием усредненных теплофизических входных данных, а также с последовательным решением тепловой и механической задач.

Полученные величины и характер распределения временных и остаточных напряжений в сварном шве (рис. 10) показывают, что окружные напряжения имеют максимальные значения на уровне 80–85% от σ_B – 630 МПа для стали 04X19H11M3.

Заключение. Таким образом, можно сделать вывод, что во время работы изделия при повышенных температурах, начиная с

450 °C, возможно изменение проектных размеров ввиду значительной релаксации остаточных напряжений. Из-за высокого уровня остаточных напряжений в центре сварного соединения возможно также образование трещин в осевом направлении, что в ходе эксплуатации может привести к нарушению герметичности трубопровода.

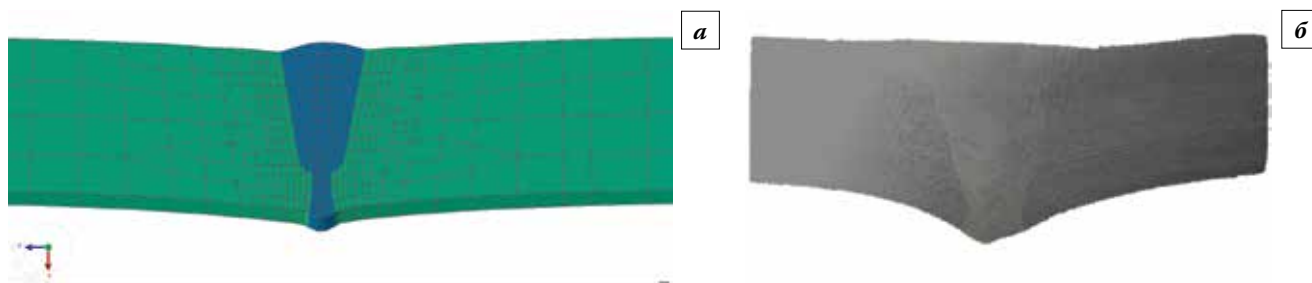


Рис. 9. Профиль сечения шва после сварки: а – расчетный; б – экспериментальный

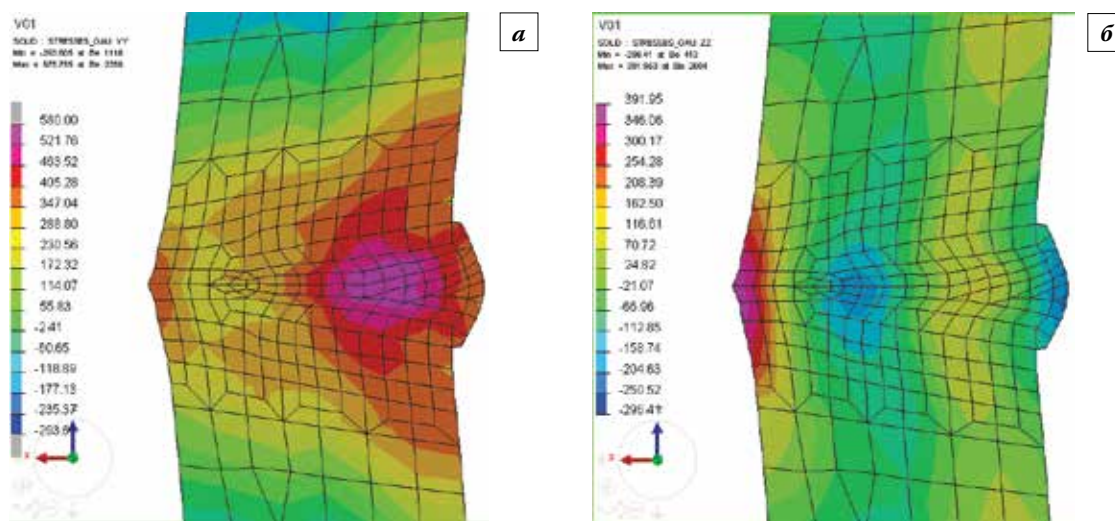


Рис. 10. Распределение остаточных напряжений после сварки: а – окружные напряжения; б – осевые напряжения

Библиографический список

1. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М. : Мир, 1979. 392 с.
2. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М. : Машгиз, 1951. 296 с.
3. Соколовский В.В. Теория пластичности. М. : Высш. шк., 1969. 608 с.
4. Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: Tutorial and Collection of Data. IAEA, Vienna, 2008.

5. Бочвар А.А. Исследование механизма и кинетики кристаллизации сплавов эвтектического типа. М.-Л., 1935.

6. Коновалов А.В., Неровный В.М., Куркин А.С. Теория сварочных процессов. М. : МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. 752 с.

7. Пономаренко Д.В., Сюкасов Г.М. Механизм возникновения сварочных напряжений и деформаций. Учеб. электр. текстовое изд. Каф. «Технология сварочного производства». Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2009.

INVESTIGATION OF LOCAL STRESS AND STRAINS IN WELDED JOINTS OF TUBE FITTINGS FROM STEEL 03X17H9M3 BY METHODS OF COM-PUTER SIMULATION

© Bilenko G.A.

The local stress strain analysis of tube welded joint made of 03X17H9M3 steel by orbital TIG welding was done by computer simulation based on finite element method.

Keywords: tube welding; orbital multipass welding; welding austenitic corrosion-resistant steel; residual welding stresses and strains.