

Биленко Г. А., Моргунов Е. А., Коробов Ю. С.  
*Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург*

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 03X18Н9М3, ВЫПОЛНЕННОГО МНОГОПРОХОДНОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СВАРКОЙ**

*Для обеспечения требования высокой точности проектных размеров, а также работоспособности сварных изделий трубопроводной арматуры в заданном периоде эксплуатации, было выполнено исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) стыкового сварного соединения, выполненного при помощи орбитальной сварки. Оценивалось влияния режима сварки и условия закрепления на местное НДС сварного шва. Анализ был выполнен методом конечных элементов.*

**Ключевые слова:** *моделирование, напряженное состояние, орбитальная сварка, стыковой шов, метод конечных элементов.*

В энергетике используются изделия запорной и трубопроводной арматуры, применяются резервуары различного диаметра и толщины стенки. Большая часть конструкций выполняется из нержавеющей коррозионностойких сталей 03X17Н9М3.

Для обеспечения точности размеров и работоспособности изделий в заданном периоде эксплуатации, нужно проводить анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) как самого сварного соединения, так и конструкции в целом.

С этой целью было проведено исследование НДС наиболее распространенного типа сварного соединения – стыкового, с симметричной разделкой кромок. Свариваемая деталь – труба 9,53 × 114 мм. Эскиз сварного

соединения и его геометрические параметры приведены в рис. 1. Сварочный материал – стальная проволока марки 04X19Н11М3.

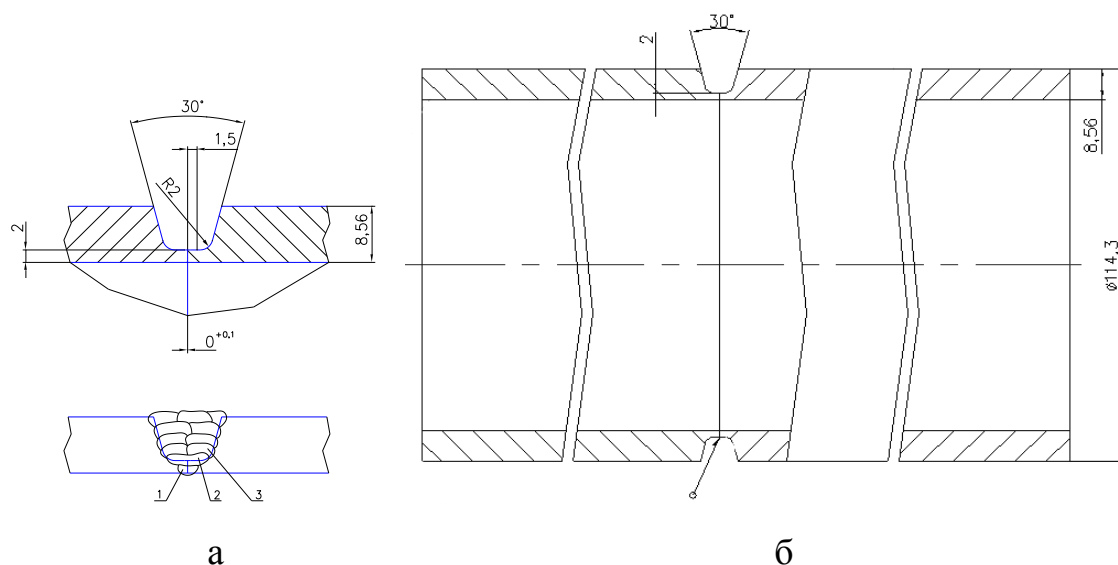


Рис. 1. Геометрические параметры сварного соединения – а, эскиз свариваемой трубы с выполненной разделкой кромок – б

Исследование проводили при помощи компьютерного математического моделирования методом конечных элементов. Конечно–элементная модель (КЭ) представлена на рис. 2.

Математическая модель основана на несвязанном решении уравнений теплопроводности и механики деформированного твердого тела.

Решение тепловой задачи заключалось в решении уравнения теплопроводности в сплошном твердом теле. Для каждого материала были заданы свои значения теплопроводности, теплоемкости и плотности.

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

где  $\rho C \frac{\partial T}{\partial t}$  – изменение внутренней энергии тела,  $\lambda \cdot \text{grad}(T)$  – теплота от внешних источников;  $q$  – теплота от внутренних источников.

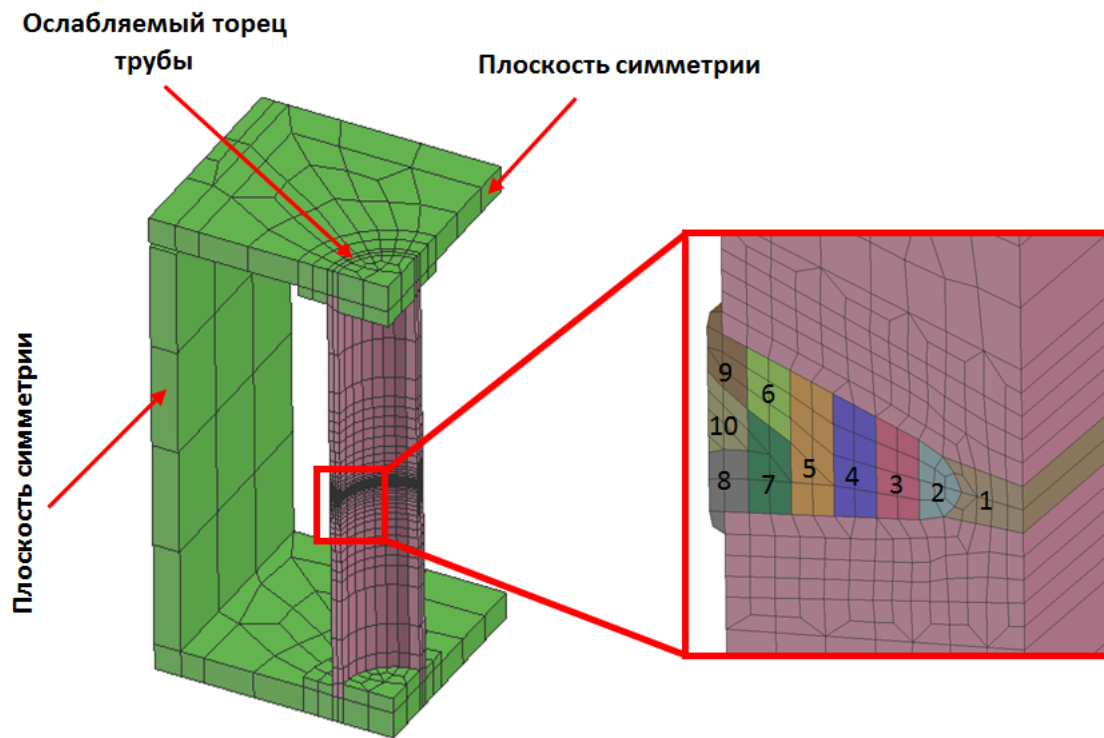


Рис. 2. КЭ модель свариваемой трубы, установленной в оснастке

В качестве граничного условия на поверхности сварного шва и трубы задан полный теплообмен – лучистый и конвективный.

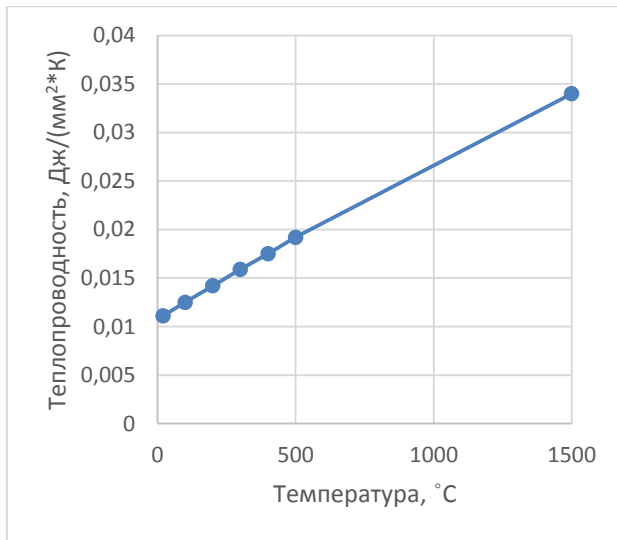
$$K_o = K_r + K_c, \quad (5)$$

где  $K_r = C \cdot e \cdot (T + T_0) \cdot (T^2 + T_0^2)$ ,

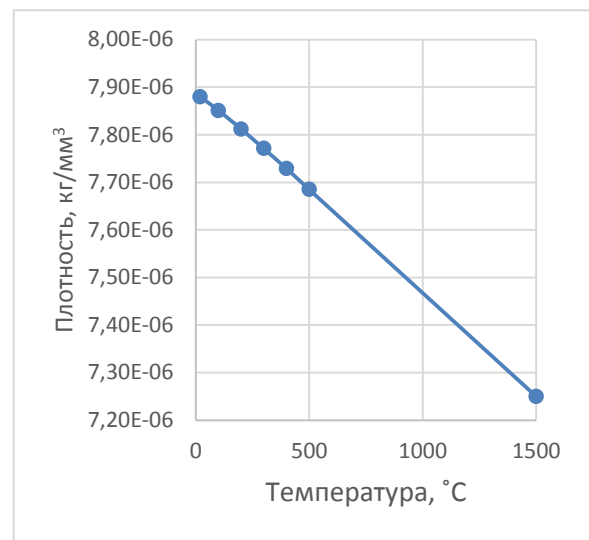
$$K_c = 25 \text{ Вт/мм}^2,$$

$$T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

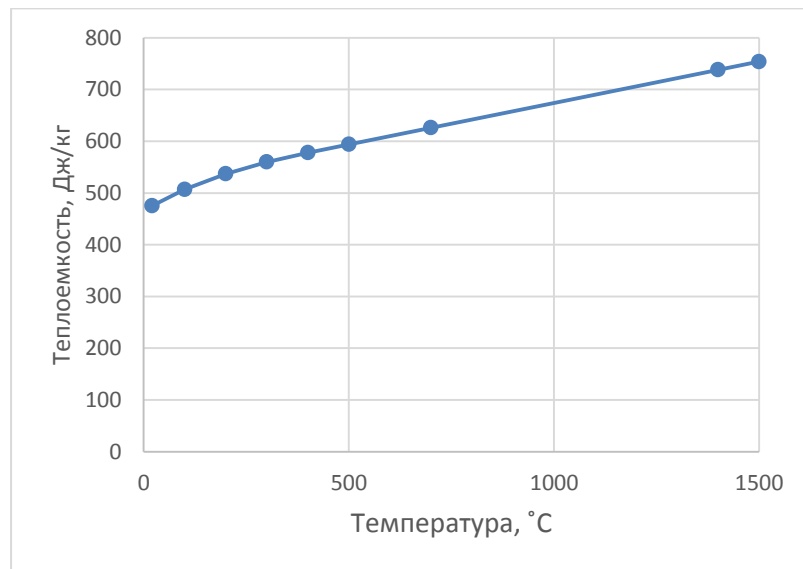
Теплофизические характеристики материала приведены на рис. 3. Механическое поведение материала рассматривалось как упруго пластическое. Поведение структуры описывали уравнениями (2–4).



а



б



в

Рис. 3. Теплофизические свойства сталей 03X17N9M3 и 04X19N11M3:  
а – теплопроводность; б – теплоемкость; в – плотность

Уравнение равновесия сил, приложенных к системе:

$$\sum F = 0, \quad (2)$$

Деформации вычисляли по формуле:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon^{th}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_e, \varepsilon_p, \varepsilon^{th}$  – упругие, пластические и термоупругие деформации.

Уравнение пластического течения:

$$\Delta \varepsilon_p = \Delta \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (4)$$

где  $\partial F$  – потенциал пластичности,  $\partial \sigma_{ij}$  – тензор напряжений,  $\Delta \lambda$  – скалярная величина.

В механической задаче во время сварки труба находится в жесткозакрепленном состоянии. После сварки один конец трубы ослабляется. Условия действуют для каждого прохода. Механические характеристики сталей 03X17H9M3 и 04X19H11M3 приведены на рис. 4.

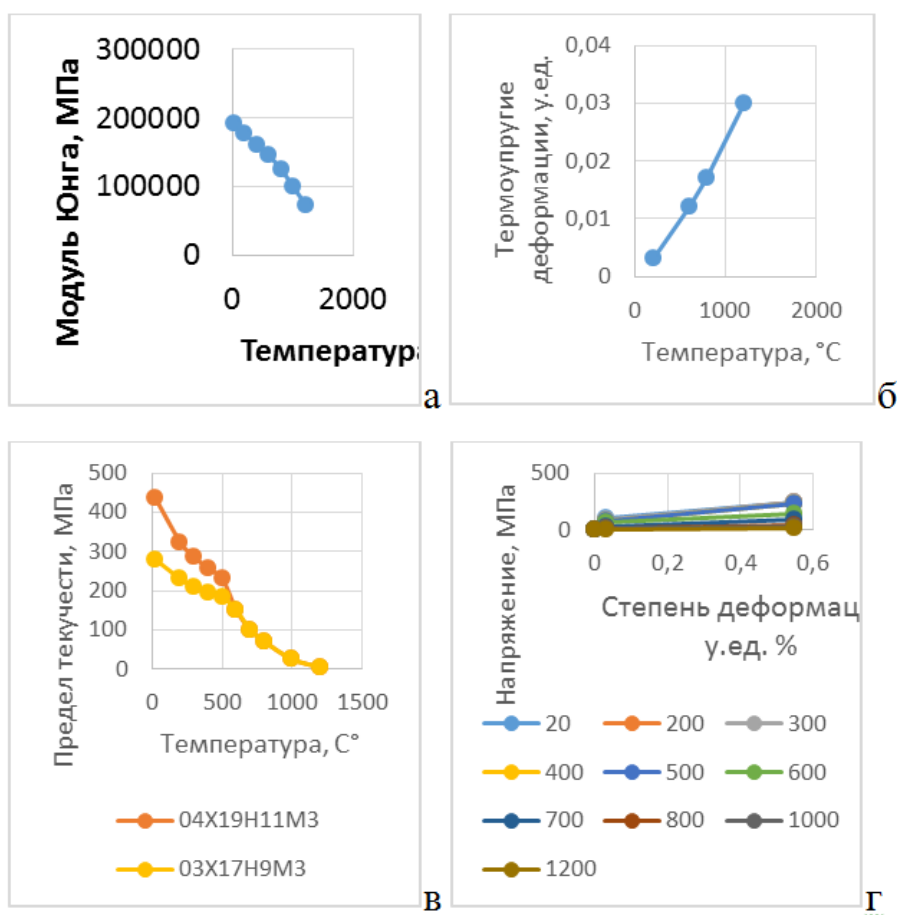


Рис. 4. Механические свойства материалов 03X17H9M3 и 04X19H11M3: а – модуль упругости, б – условный предел текучести, в – термоупругие деформации, г – кривые деформационного упрочнения

Натурный эксперимент по замерам перемещений после сварки каждого прохода показывает погрешность моделирования менее 25 %.

В результате моделирования были получены картины распределения остаточных напряжений и деформаций (рис. 5) в области сварного соединения. Данные показывают, что максимальными напряжениями являются окружные, которые находятся на уровне 80–85 % от  $\sigma_B$  – 630 МПа для материала 04X19H11M3.

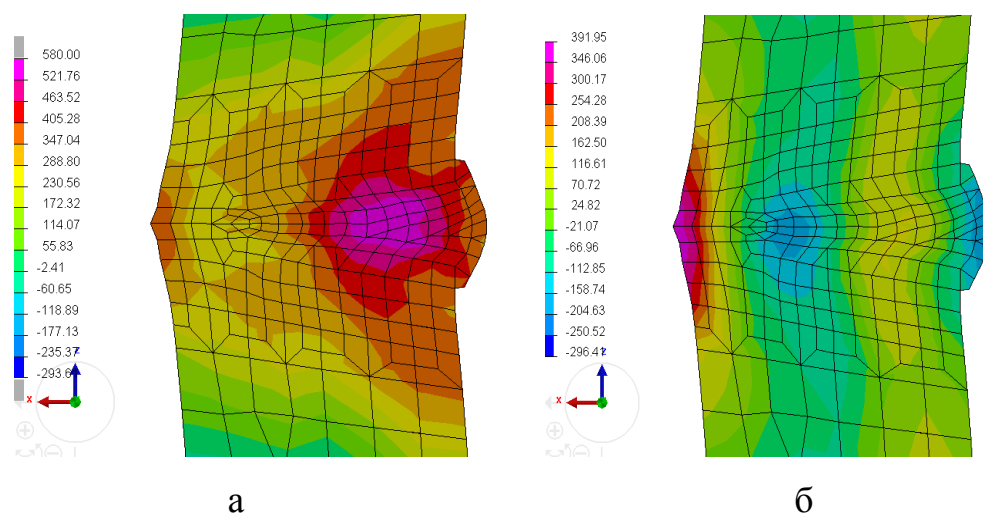


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений после сварки:  
а – окружные напряжения, б – осевые напряжения

## Вывод

На основе компьютерного инженерного анализа проведена оценка окружных и осевых напряжений типового стыкового сварного соединения при многопроходной сварке стали 03X17H9M3. Погрешность расчета не превышала 25 % относительно результатов натурных экспериментов.

## Литература

1. Goldak J. A., Akhlaghi M. Computational Welding Mechanics. Springer, 2005. 321 p.
2. Коновалов А. В., Неровный В. М., Куркин А. С. Теория сварочных процессов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 752 с.
3. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 296 с.