

УДК 669.7:624.01

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СВАРКЕ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. **Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО**;  
канд. техн. наук, доц. **О.В. ШУМОВ**;  
канд. техн. наук **А. ХЕЙДАРИ МОНФАРЕД**  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Представлено моделирование дуговой сварки в среде аргона при сварке образцов из аустенитной стали для стыковых соединений тонколистовых образцов с принудительным охлаждением высокотемпературной области твердым диоксидом углерода. Определено влияние расстояния между дугой и областью охлаждения на напряжения и деформации сварного соединения образцов из аустенитной стали. Значения напряжений и деформаций при различных режимах сварки рассчитывались с использованием неосесимметричной трехмерной модели источника тепла. Модель имела распределение плотности теплового потока по закону Гаусса в области двойного эллипсоида. По результатам расчетов определены функциональные зависимости напряжений и деформации конструкции от расстояния между дугой и областью охлаждения. Данные зависимости позволят в дальнейшем определять оптимальные с точки зрения минимизации деформаций режимы сварки конструкций из тонколистовой аустенитной стали.*

**Ключевые слова:** дуговая сварка, стыковое соединение, моделирование сварки, аустенитная сталь, принудительное охлаждение, определение деформаций.

Для производства ответственных сварных оболочковых конструкций в настоящее время широко используются коррозионно-стойкие аустенитные стали малой толщины. Данные стали обладают хорошей свариваемостью, однако низкая теплопроводность и высокий коэффициент температурного расширения обуславливают возникновение при сварке значительных напряжений и деформаций. Вместе с тем значительные по величине напряжения и деформации могут вызвать существенные искажения размеров и формы оболочковых конструкций, ведут к ухудшению внешнего вида сварных конструкций, их эксплуатационных характеристик, в частности к снижению надежности и сокращению срока службы [1; 2].

Расширение области применения оболочковых конструкций из аустенитных сталей на новые высокотехнологичные отрасли, в том числе аэрокосмическую, повышение требований к точности изготовления таких конструкций предопределяют потребность в совершенствовании технологии их сварки.

**Методика исследований.** Расчеты производились для образцов из аустенитной стали X18H9T размерами 150×170×1 мм, сваренных встык дуговой сваркой в среде аргона. Генерация трехмерной сетки конечных элементов осуществлялась при помощи программы ANSYS [3]. Анализ конечных элементов выполнялся с использованием программы SYSWELD [4].

**Основная часть.** К основным методам ограничения остаточных деформаций сварных конструкций относятся: уменьшение тепловложения в металл, предварительное механическое воздействие, предварительный нагрев, принудительное охлаждение и т.п.

Одним из эффективных методов снижения сварочных деформаций, область применения которого в последнее время постоянно расширяется, является метод бездеформационной сварки с использованием методов термического растяжения [5]. Использование метода термического растяжения предусматривает при сварке пластин их нагрев, который может производиться как неподвижными нагревателями, расположенными параллельно сварному шву, так и подвижными нагревателями, перемещаемыми вместе со сварочной горелкой. При нагреве свариваемых деталей на определенном расстоянии от дуги в области сварного шва возникают растягивающие напряжения, а в области нагрева – сжимающие. При этом образовавшиеся в области сварки растягивающие напряжения нейтрализуют сжимающие напряжения перед сварочной дугой, что позволяет не допустить возникновения пластических деформаций сжатия в области сварочной ванны. Так как уменьшение ширины и увеличение температуры нагрева вызывают рост сжимающих напряжений в области нагрева, то подбор этих параметров позволит регулировать величину этих напряжений. Однако при сварке тонких (менее 4 мм) пластин метод термического растяжения не позволяет полностью устранить деформацию свариваемых деталей.

Для сварки тонких деталей без искажения их формы рациональным является комбинирование методов снижения деформаций, в частности одновременное использование метода термического растяжения и метода сварки с теплоотводом. Подобное одновременное использование двух методов позволяет уменьшить растягивающие напряжения в области сварного шва и в зоне температурного воздействия, а также наиболее полным образом устранить деформации свариваемых деталей за счет градиента температур [6].

Исследования показали, что эффективными являются методы ограничения напряжения и деформаций принудительным локальным охлаждением твердым диоксидом углерода области высокотемпературного перегрева сварного соединения. При использовании данного метода также решается задача обеспечения технологической прочности сварочной ванны и управления процессами ее кристаллизации, улучшения механических свойств сварных швов и т.д. [7].

Для расчетов напряжений и деформаций при сварке выполнен трехмерный термоупруго-пластический анализ с движущимся источником тепла [8–10]. Использовалась трехмерная модель источника тепла с распределением плотности теплового потока по закону Гаусса в области двойного эллипсоида. При этом плотность мощности внутри переднего квадранта определялась следующим образом:

$$q_{arc}(x, y, z, t) = 6 \cdot f_f \cdot q_0 \cdot \sqrt{3} \cdot (a \cdot b \cdot c \cdot \pi \sqrt{3})^{-1} \cdot \exp\{-3 \cdot [x^2 \cdot a^{-2} + y^2 \cdot b^{-2} + (z - z_0 - vt)^2 \cdot c_1^{-2}]\},$$

а плотность мощности внутри заднего квадранта находили по формуле:

$$q_{arc}(x, y, z, t) = 6 \cdot f_r \cdot q_0 \cdot \sqrt{3} \cdot (a \cdot b \cdot c \cdot \pi \sqrt{3})^{-1} \cdot \exp\{-3 \cdot [x^2 \cdot a^{-2} + y^2 \cdot b^{-2} + (z - z_0 - vt)^2 \cdot c_2^{-2}]\},$$

где  $q_{arc}$  – плотность мощности, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_0$  – чистый тепловой поток, Вт;  $a, b, c$  – параметры, описывающие ширину теплового воздействия источника по осям  $x, y, z$  соответственно, мм;  $v$  – скорость сварки, м/с;  $f_f$  и  $f_r$  – доли тепла, выделяемые в переднем или заднем квадрантах ( $f_f + f_r = 2$ ).

При определении величины напряжений и деформаций использовались следующие допущения:

- теплопроводность сварочной ванны при температуре выше температуры плавления считалась в 2 раза большей, чем при комнатной температуре;
- тепловые эффекты при кристаллизации моделировались с учетом скрытой теплоты; принималось, что температуры солидуса и ликвидуса разнятся на 50 °С;
- материалы свариваемых деталей считались однородными и изотропными.

Для расчета сварочных напряжений и деформаций определялось температурное поле в процессе сварки. Для этого было выполнено моделирование теплопередачи и проведен температурный анализ.

В процессе температурного анализа выполнены следующие операции:

- определены теплофизические свойства материалов;
- выполнено моделирование движущегося источника тепла;
- разработана конечно-элементная модель;
- проведена калибровка входного теплового потока.

Уравнение теплопроводности для трехмерного пространства имеет вид:

$$\rho \cdot C_p \cdot \partial T / \partial t = \partial / \partial x (\lambda \cdot \partial T / \partial x) + \partial / \partial y (\lambda \cdot \partial T / \partial y) + \partial / \partial z (\lambda \cdot \partial T / \partial z) + Q,$$

где  $T$  – температура, °С;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/м·с;  $Q$  – входящий тепловой поток, Вт/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – удельная теплоемкость, Дж/кг·с.

При дуговой сварке нагрев рассматривался как распределение внешнего теплового потока, а потери тепла на поверхности деталей рассматривались как границы, поглощающие тепло.

Размеры реальных деталей и их моделей выбирались из соображений дальнейшего использования экспериментальных результатов на практике без дополнительных исследований.

Исходя из этого и требования, чтобы размеры модели были максимально приближены к размерам реальных образцов, размеры модели выбраны из соотношений: длины к толщине  $L/\delta \geq 106$ ; ширины к толщине  $B/\delta \geq 81$ .

Шаг по времени рассчитывался в зависимости от длины расплавленной зоны и принимался равным половине времени, необходимого для прохождения длины расплавленной зоны.

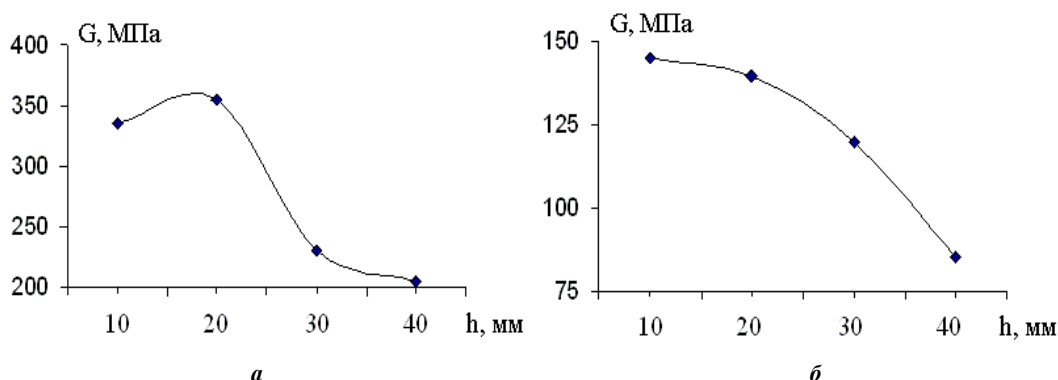
Полученное температурное поле использовалось в качестве входных данных при проведении термоупруго-пластического анализа для расчета напряжений и деформаций. В частности, проведено моделирование остаточных напряжений в поперечном сечении сварного соединения в зависимости от расстояния между дугой и областью охлаждения (рис. 1).

При расчетах ширина области охлаждения выбрана равной 10 мм исходя из того, что при больших значениях области охлаждения эффект от термического натяжения уменьшается.

Из анализа приведенных данных следует, что:

- при увеличении расстояния между дугой и областью охлаждения от 10 до 40 мм растягивающие напряжения уменьшаются от 352 МПа при расстоянии 20 мм до 206 МПа при расстоянии 40 мм;

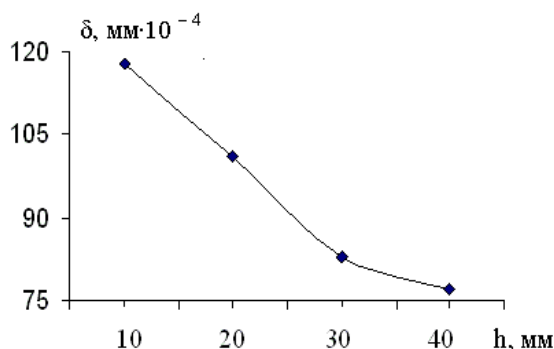
- сжимающие напряжения, максимальные по модулю значения которых наблюдаются на расстоянии 20 мм от шва, при увеличении расстояния между дугой и областью охлаждения от 10 до 40 мм также уменьшаются от 146 МПа при расстоянии 10 мм до 83 МПа при расстоянии 40 мм.



*a* – в центре сварного шва; *б* – на расстоянии 20 мм от сварного шва

**Рисунок 1.** – Распределение продольных остаточных напряжений *G* в зависимости от расстояния *h* между дугой и зоной охлаждения

Результаты моделирования продольной пластической деформации в сечении сварного соединения в зависимости от расстояния между дугой и областью охлаждения после окончания сварки и охлаждения до комнатной температуры приведены на рисунке 2 (поскольку размеры пластины в направлении оси *Y* уменьшаются, то значения деформации на графике имеют отрицательные значения).



**Рисунок 2.** – Распределение продольной пластической деформации  $\delta$  в зависимости от расстояния *h* между дугой и зоной охлаждения

На основе анализа полученных значений можно сделать следующие *выводы*:

- сварное соединение имеет максимальные значения продольной пластической деформации (0,0118 мм) при расстоянии 10 мм за счет меньшей скорости охлаждения в данной области соединения;
- при увеличении расстояния между дугой и зоной охлаждения продольная пластическая деформация увеличивается за счет усиления влияния эффекта термического растяжения и достигает минимального значения (0,0077 мм) при расстоянии 40 мм.

**Заключение.** В представленной работе для снижения напряжения и деформаций при сварке конструкций из тонколистовых аустенитных сталей предлагается *комбинированный метод снижения деформаций*, заключающийся в одновременном использовании метода термического растяжения и метода сварки с теплоотводом. Определены величины остаточных напряжений и деформаций в сварном соединении за счет *моделирования процесса стыковой сварки пластин из аустенитной стали*. Моделирование выполнено на основе проведения термоупруго-пластического анализа процесса сварки.

По результатам расчетов получены *зависимости влияния* расстояния между дугой и зоной охлаждения на остаточные продольные напряжения и на продольную пластическую деформацию сварного соединения деталей из аустенитной стали.

Одним из эффективных направлений использования разработанной модели является *прогнозирование перемещений элементов тонколистовых оболочечных конструкций* из аустенитных сталей в строительстве, транспортном, химическом машиностроении и т.п.

Применение модели и разработанного метода ограничения остаточных деформаций на этапе проектирования технологического процесса сварки позволит обеспечить предусмотренную техническими требованиями точность размеров и формы изготавливаемой конструкции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Винокуров, В.А. Теория сварочных напряжений и деформаций / В.А. Винокуров. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.
2. Сагалевич, В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М. Сагалевич. – М. : Машиностроение, 1974. – 248 с.
3. ANSYS 5.7 Advanced Analysis Techniques Guide. ANSYS Inc, 2003.
4. ESI Group, 2000. SYSTUS 2000 Analysis Reference Manuals – Shelby Township. ML : ESI North America.
5. Feng, Z. Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distorsion / Z. Feng. – Wood Publishing, 2005. – 343 p.
6. Цяо, Г. Бездеформационная сварка с использованием эффектов термического растяжения для соединения материалов малой толщины / Г. Цяо // Автоматическая сварка. – 2006. – № 12. – С. 3–13.
7. Пантелеенко, Ф.И. Снижение поверхностных деформаций путем термической обработки в процессе стыковой сварки / Ф.И. Пантелеенко, А. Хейдари Монфаред // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер., В. Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 19–26.
8. Goldak, J.A. Computational Welding Mechanics / J. A. Goldak, M. Akhlaghi. – Springer, 2005. – 321 p.
9. Francis, J.D. Welding Simulation of Aluminum Alloy Joints by Finite Element Analysis / J.D. Francis. – Blackburg, Virginia Polytechnic Institute and State University, April 2002. – 224 p.
10. Cheng W. In plate Shrinkage Strains and Their Effects on Welding Distortion in Thin-wall Structures / W. Cheng The Ohio State University, 2005. – 268 p.

Поступила 11.04.2016

#### ESTIMATING DEFORMATIONS IN THE COURSE OF WELDING OF AUSTENITIC STEEL

*F. PANTELEENKO, A. SHUMAV, A. HEIDARI MONFARED*

*In this work arc welding simulation in the course of welding of austenitic steel has been accomplished. The simulation of butt welds of the sheet specimens with the force-cooling of high temperature area by the hard carbon oxide has been carried out. The influence of distance between the arc and cooling area on the stresses and deformations of austenitic steel specimens has been estimated. The stresses and deformations value in the different welding conditions has been calculated with non-symmetric three-dimensional model of the heat source. The model had the heat flow distribution in double ellipsoid area as the Gaussian law. As a result it has been calculated the construction stresses and deformations as the functions of the distance between the arc and cooling area. These functions will permit to calculate the optimal welding conditions to minimize the deformations of welding sheet constructions.*

**Keywords:** *arc welding, butt weld, welding simulation, austenitic steel, force-cooling, estimating deformations.*