

УДК 669.7: 624.01

## СНИЖЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

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

*При помощи методов численного моделирования исследуются процессы дуговой сварки стыкового соединения тонколистовых образцов из аустенитной стали. Для определения значений температурного поля свариваемых образцов решено дифференциальное уравнение теплопроводности в частных производных с начальными и граничными условиями. Величины остаточных напряжений в металле при дуговой сварке с различной интенсивностью охлаждения были рассчитаны с использованием модели изотропного упрочнения. Исследовано влияние технологических параметров дуговой сварки на напряжения в металле при изготовлении стыкового соединения. В результате расчетов определены функциональные зависимости напряжения в тонколистовых образцах от ширины зоны действия охлаждающей среды в условиях сварки с охлаждением. Полученные зависимости могут быть использованы для подбора технологических режимов с целью минимизации деформаций при дуговой сварке с принудительным охлаждением тонколистовых заготовок из различных марок стали.*

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

**Введение.** Для изготовления оболочковых конструкций используются листовые заготовки из углеродистых, низколегированных и высоколегированных сталей, медных и алюминиевых сплавов и т.п. При производстве ответственных конструкций широко применяются коррозионно-стойкие высоколегированные стали аустенитного класса. Данные стали имеют хорошую свариваемость и обладают высокими эксплуатационными свойствами, однако низкая теплопроводность и высокие значения температурного расширения обуславливают возникновение значительных напряжений и деформаций при сварке, что может привести к недопустимым искажениям размеров и формы конструкций, снизить их качество и надежность [1; 2]. Увеличение объема производства и расширение области использования оболочковых конструкций из аустенитных сталей предопределяет актуальность разработки эффективных подходов по повышению качества сварки путем повышения точности сварочного производства, например, за счет снижения напряжений и деформаций.

Существующие конструктивные и технологические методы уменьшения напряжения и деформаций при сварке тонколистовых конструкций включают предварительное механическое воздействие, уменьшение теплового потока в металл, управление термическими напряжениями и деформациями за счет сочетания нагрева и охлаждения элементов конструкции и т.п. [3]. Одними из наиболее эффективных методов уменьшения напряжений и деформаций при сварке является принудительное охлаждение высокотемпературной области металла, но данный метод требует применения специальной технологической оснастки и зачастую не обеспечивает снижения напряжений и деформаций до необходимого уровня, так как требует установления большого количества технологических параметров, основанных на эмпирических данных [4; 5].

**Основная часть.** В данной работе предлагается схема сварки с принудительным охлаждением высокотемпературной области сварного соединения и соответствующий расчет некоторых технологических параметров, позволяющих существенно снизить напряжения при дуговой сварке тонколистовых заготовок из аустенитной стали. В процессе исследований были рассчитаны значения температур и определены величины напряжений и деформаций при дуговой сварке встык листовых деталей из стали 12Х18Н9Т толщиной 4 мм как при обычных условиях, так и в условиях сварки с принудительным охлаждением высокотемпературной области сварного шва.

При выборе технологических режимов дуговой сварки для снижения деформаций возможно применить метод термического растяжения металла. При данном методе нагрев свариваемых деталей на определенном расстоянии от дуги ведет к возникновению растягивающих напряжений в области сварного шва и сжимающих напряжений в области нагрева. Таким образом, растягивающие напряжения в области сварки компенсируют сжимающие напряжения впереди и позади сварочной дуги, в результате чего обеспечивается снижение деформаций металла в областях, прилегающих к зоне сварки [6].

Использование численного моделирования при выборе технологических режимов дуговой сварки позволяет применить метод термического растяжения более эффективно. Подбирая некоторые параметры процесса сварки, например, температуру нагрева и ширину области нагрева свариваемого металла,

расстояние от зоны действия охлаждающей среды до зоны сварки, ширину области действия охладителя и т.д., возможно обеспечить значительную компенсацию напряжений и, соответственно, снизить деформации при сварке металла [7; 8].

Для подбора оптимального комплекса технологических параметров выполнен несовместный термомеханический анализ, который проводился в два этапа. На первом этапе определялась тепловая история всех узлов анализируемого пространства на основе моделирования тепловых процессов. На втором этапе рассчитывались напряжения и деформации в процессе упругопластического термического анализа на основе данных о динамике температурного поля. На этом этапе исследований анализировалось напряженно-деформированное состояние, в котором поля напряжений и деформаций ставились в соответствие с температурным полем через тепловую деформацию и зависящие от температуры свойства металла свариваемых деталей.

В процессе сварки в конструкциях возникают остаточные напряжения в результате температурных и пластических деформаций, деформаций ползучести и т.п. Так как при сварке тонколистовых конструкций имеет место быстрое охлаждение, то ползучестью можно пренебречь и не учитывать температурные деформации после охлаждения.

В работе для вычисления деформаций при стыковой сварке тонколистовых материалов была применена модель, использующая принципы изотропного упрочнения. В данной модели двухмерное напряженное состояние материала было представлено в виде равномерного расширения начальной поверхности текучести, которая сохраняет свою форму, но увеличивается в размере пропорционально величине пластической деформации.

Напряжения в металле для упругой области определялись по формуле:

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon^e\} = [D] (\{\epsilon^p\} - \{\alpha\}(T - T_\alpha)),$$

где  $\alpha$  – коэффициент термического расширения,  $C^{-1}$ ;  $T_\alpha$  – исходная температура, °C;  $T$  – текущая температура, °C;  $\epsilon^p$  – пластические деформации;  $\epsilon^e$  – упругие деформации;  $[D]$  – матрица материала, описывающая упругопластическое состояние.

Для малых деформаций приращения напряжений выражались в виде:

$$\{d\sigma\} = [dD]\{\epsilon^e\} + [D](\{d\epsilon\} - \{\alpha\}dT - (T - T_\alpha)\{d\alpha\}),$$

где  $[dD]$  – приращение матрицы материала, соответствующее изменению температуры  $dT$  за время  $dt$ .

Напряжения для пластической области определялись по формуле:

$$\{d\sigma\} = [dD]\{\epsilon^e\} + [D](\{d\epsilon\} - \{\alpha\}dT - (T - T_\alpha)\{d\alpha\} - \{\epsilon^p\}),$$

Для малых деформаций приращения напряжений выражались в виде

$$\{d\sigma\} = [dD]\{\epsilon^e\} + [D](\{d\epsilon\} - \{\alpha\}dT - (T - T_\alpha)\{d\alpha\} - \{d\epsilon^p\}),$$

Для определения приращения напряжений (деформаций) при различных температурах в качестве критерия выбиралось начало текучести в виде функции напряжения и геометрических особенностей деформируемой поверхности:  $F(\sigma_{ij}) = 0$ , где  $\sigma_{ij}$  – тензор напряжений,  $F(\sigma_{ij})$  – функция, зависящая от напряжений.

Для напряжений по Мизесу можно записать следующие выражения:

$$F(\sigma_{ij}) = \sigma_e(\sigma_{ij}) - \sigma_s = 1,5 \cdot \{S\}^T [L] \{S\} - \sigma_s = 0,$$

$$\sigma_e = (0,5 \cdot (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2))^{0,5},$$

$$\{S\} = \{\sigma\} - \sigma_h [111000],$$

$$\sigma_h = 3^{-1} \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}),$$

где  $\sigma_e$  – напряжение по Мизесу;  $\{S\}$  – девиаторная часть тензора напряжений;  $\sigma_h$  – гидростатическое напряжение;  $\sigma_s$  – предел текучести.

Для изотропного упрочнения материала можно записать:

$$F(\sigma_{ij}, k(\epsilon_{ij}^p, T)) = 0,$$

где  $k(\epsilon_{ij}^p, T)$  – функция пластичности.

С учетом напряжений, по Мизесу, для начала текучести получим:

$$F(\sigma_{ij}, k(\epsilon_{ij}^p, T)) = f(\sigma_{ij}) - \sigma_f(\epsilon_{ij}^p, T) = 1,5 \cdot \{S\}^T [L] \{S\} - \sigma_f(\epsilon_{ij}^p, T) = 0,$$

где  $\sigma_f(\epsilon_{ij}^p, T)$  – размер поверхности текучести.

Так как в процессе дуговой сварки происходит релаксация напряжений при температурах, близких к температуре плавления, то при моделировании этот процесс учитывался посредством очистки информации о напряжениях в узлах модели при достижении в них определенной температуры. В противном случае при расчетах модели происходило бы накопление напряжений и деформаций в наиболее нагретых областях конструкции, что противоречит реальной картине. С учетом требуемой точности и для ограничения продолжительности вычислений значение температуры для очистки информации о напряжениях принималось равным 1300 °С.

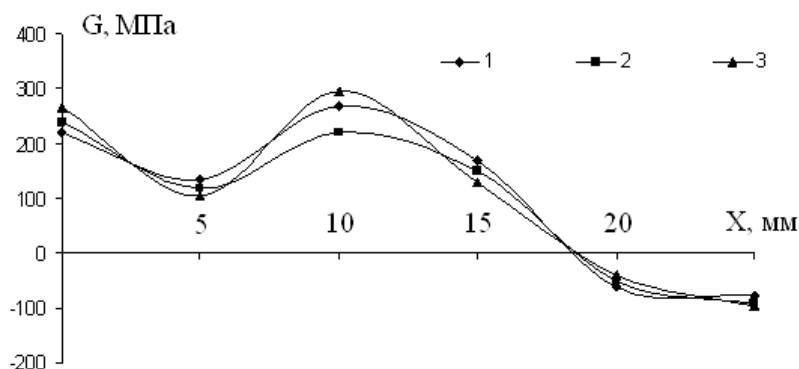
Чтобы учесть непрерывное формирование сварного шва за счет осаждения слоев с различной жесткостью, процесс образования сварного соединения описывался на основании предположения, что охлаждающийся металл остается мягким до конца моделирования в случае, если интенсивность источника тепла была недостаточна для его плавления. Также сварной шов рассматривался сформированным из материала с модулем упругости и модулем текучести, равным 1 МПа. Данное допущение исключает какое-либо значительное влияние сварного шва на жесткость собираемой конструкции.

Таким образом, процесс моделирования сварки включал следующие операции:

- создание сетки конечных элементов в программном комплексе ANSYS с использованием элементов типа 164 [9];
- создание необходимых групп конечных элементов в программе LS-PREPOST, а также задание материала шва, элементов оболочки теплопередачи, траектории сварки;
- идентификация групп конечных элементов и узлов сетки с использованием программы HYPER MESH;
- задание свойств материалов, интенсивности источников тепла и его параметров, проверка механических и термических граничных условий и вычисление параметров модели в программном комплексе SYSWELD [10].

В результате упругопластического термического анализа были определены остаточные напряжения и деформации, возникающие при дуговой сварке встык тонколистовых заготовок из аустенитной стали. Проведенные исследования показали, что в момент времени, равный 20 с, в рассматриваемом сечении металла возникали сжимающие напряжения, что связано с тем, что данное сечение располагалось перед сварочной дугой. По истечении 40 с металл в рассматриваемом сечении обладал достаточной жесткостью в результате охлаждения, и в данной области металла возникали растягивающие напряжения, которые компенсировали остаточные сжимающие напряжения, появившиеся в прилегающих областях металла. На 60-й секунде наблюдений произошло дальнейшее снижение остаточных продольных растягивающих напряжений в зоне сварки и остаточных сжимающих напряжений в прилегающих областях металла, что связано с дальнейшим охлаждением и снятием закрепления деталей.

Значения остаточных напряжений на поверхности исследуемых образцов (в поперечном сечении) в зависимости от расстояния до сварочной дуги для разных величин ширины зоны охлаждения приведены на рисунке.



**Распределение остаточных напряжений (G)  
на поверхности исследуемых образцов в зависимости  
от расстояния (X) до сварочной дуги  
(ширина зоны охлаждения: 1 – 10 мм; 2 – 15 мм; 3 – 20 мм)**

Приведенные данные свидетельствуют о наличии оптимального значения одного из параметров дуговой сварки с охлаждением – ширины зоны охлаждения. Очевидно, что в случае использования данного значения при проектировании технологического процесса и изготовлении конструкции из тонколистовых заготовок, это позволит существенно (до 20%) уменьшить величину остаточных напряжений и, в конечном счете, будет способствовать снижению деформаций сварных изделий, повышению качественных характеристик сварных соединений и надежности конструкции в целом.

В заключение проведенного исследования по снижению напряжений при дуговой сварке можно сделать следующие **выводы**:

- определена рациональная последовательность операций по трехмерному моделированию дуговой сварки стыкового соединения с принудительным охлаждением тонколистовых заготовок из аустенитной стали. Данная последовательность включает создание сетки конечных элементов, формирование групп конечных элементов и их идентификацию, задание технологических параметров дуговой сварки, разработку механизма формирования сварного шва за счет использования метода «мягкого материала», задание начальных и граничных условий сварочного процесса, определение теплофизических свойств свариваемых материалов;

- проведено исследование процесса дуговой сварки при выполнении стыкового соединения с использованием модели изотропного упрочнения. Для этого на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности определено температурное поле, данные о котором были поставлены в соответствие с полями напряжений и деформаций в соединяемых образцах при помощи теплофизических свойств свариваемой стали;

- использование методов численного моделирования позволяет подобрать технологические параметры дуговой сварки, обеспечивающие существенное (до 20%) уменьшение величины остаточных напряжений при выполнении стыкового соединения тонколистовых заготовок из аустенитной стали. Данные результаты могут найти применение для минимизации сварочных напряжений и деформаций при разработке технологических процессов изготовления оборудования, машин и аппаратов химической промышленности, транспортного машиностроения и т.п.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Parmar, K.S. Welding engineering and Technology / K.S. Parmar // Khanna Publishers, 2005. – 270 p.
2. Feng, Z. Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion / Z. Feng // Woodhead Publishers, 2005. – 343 p.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
4. Сагалевич, В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М. Сагалевич. – М. : Машиностроение, 1974. – 248 с.
5. Винокуров, В.А. Теория сварочных напряжений и деформаций / В.А. Винокуров. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.
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 // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия, В. Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 19–26.
8. Куликов, В.П. Технология сварки плавлением / В.П. Куликов. – Минск: Дизайн ПРО, 2001. – 256 с.
9. ANSYS 5.7 Advanced Analysis Techniques Guide. ANSYS Inc, 2003.
10. ESI Group, 2000. SYSTUS 2000 Analysis Reference Manuals – Shelby Township. ML : ESI North America.

Поступила 09.06.2017

#### DECREASING STRESSES IN THE COURSE OF ARC WELDING

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

*In this work the research of arc welding of butt weld of the sheet specimens by numerical simulation has been accomplished. It has been solved the partial differential equation of heat conduction with the initials and boundary conditions to estimate the temperature field. The stresses value in the course of arc welding in the different intensity of cooling has been calculated by the use of isotropic reinforcement model. The influence of process variables on the stresses of metal in the course of butt welding has been estimated. As a result it has been calculated the stresses of the sheet specimens as the function of width of cooling zone in the course of arc welding. These functions may be used to calculate the process variables of arc welding of the sheet pieces with the force-cooling to minimize the deformation.*

**Keywords:** arc welding, butt weld, welding simulation, austenitic steel, force-cooling, decreasing stresses.