

УДК 669.7:624.01

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

Рассматриваются некоторые мероприятия по снижению остаточных деформаций сварных соединений. Исследования по снижению остаточных поперечных деформаций выполнены для сварных соединений, полученных дуговой сваркой в среде аргона. Предложено снизить остаточные поперечные деформации сварных соединений за счет использования твердого диоксида углерода для уменьшения области нагрева металла до высоких температур, а также за счет подбора оптимальных режимов дуговой сварки. Определены значения поперечных деформаций сварных соединений, полученных дуговой сваркой в среде аргона как в обычных условиях, так и с использованием твердого диоксида углерода. Получены функциональные зависимости влияния технологических параметров сварки на поперечные деформации, по которым найдены оптимальные режимы дуговой сварки с охлаждением для обеспечения малых остаточных деформаций. Установлено, что использование твердого диоксида углерода при дуговой сварке обеспечивает уменьшение остаточных поперечных деформаций сварных соединений в 1,6 раза по сравнению со сварными соединениями, полученными дуговой сваркой без охлаждения.

Ключевые слова: *дуговая сварка, сварное соединение, остаточные деформации, оптимальные режимы, уменьшение деформаций.*

Введение. Один из распространенных способов изготовления различных конструкций из листовых заготовок в настоящее время – дуговая сварка, предусматривающая локальный нагрев соединяемых деталей до высоких температур. Неравномерный нагрев, неоднородное охлаждение, протекающие в металле фазовые превращения и т.п. приводят к возникновению в соединяемых деталях значительных напряжений и деформаций, которые могут вызвать отклонения от требуемых размеров и формы конструкций, ухудшить их эксплуатационные свойства [1]. Таким образом, снижение остаточных деформаций сварных соединений является актуальной задачей, решение которой обеспечивает повышение качества сварных изделий, улучшение их эксплуатационных свойств.

Существующие методы снижения напряжений и деформаций при сварке конструкций включают механическое воздействие, уменьшение тепловложения в металл, управление напряженным состоянием за счет комбинирования нагрева и охлаждения участков конструкции и т.п. [2]. Вместе с тем указанные методы могут оказаться недостаточными при дуговой сварке конструкций из тонколистовых заготовок (толщиной до 4 мм) из аустенитной стали, так как они не обеспечивают в полной мере компенсацию температурных напряжений и предотвращение недопустимых деформаций и искажений формы конструкций [3].

Основная часть. Степень изменения напряжений и деформаций при дуговой сварке однофазных материалов, не испытывающих при нагреве и охлаждении фазовых превращений, определяется закономерностями распределения температурных полей в соединяемых деталях, условиями их закрепления при сварке [4]. Эффективным направлением снижения напряжений и деформаций при дуговой сварке тонколистовой аустенитной стали выступает применение комбинированных методов, среди которых перспективным представляется одновременное использование метода термического растяжения и метода сварки с принудительным охлаждением высокотемпературной области сварного соединения [5; 6]. Рациональным подходом при использовании комбинированных методов снижения сварочных напряжений и деформаций служит математическое моделирование термонапряженного состояния соединяемых деталей, позволяющего сократить количество экспериментов и выполнить оптимизацию режимов дуговой сварки [7].

В ходе исследований выполнены расчеты по определению температурных полей, а также полей напряжений и деформаций при дуговой сварке в среде аргона тонколистовых заготовок из однофазного материала. При численном моделировании анализировался технологический процесс, который включал соединение встык при помощи дуговой сварки двух плоских заготовок из стали 12Х18Н10Т толщиной 4 мм.

Для определения величины напряжений и деформаций в деталях и оптимизации технологических режимов при дуговой сварке выполнен несовместный термомеханический анализ, состоящий из двух этапов. Первый этап анализа – определение тепловой истории процесса дуговой сварки – включал определение значений температур в узлах исследуемого трехмерного пространства для различных моментов времени за счет моделирования процессов распространения тепла от движущейся сварочной дуги. Второй этап анализа – исследование напряженно-деформированного состояния металла свариваемых деталей – включал определение значений напряжений и деформаций в них путем решения уравнений статической упругости на основе информации о тепловых полях свариваемых деталей.

Для определения значений температур нагрева соединяемых деталей для различных интервалов времени находили решение дифференциального уравнения теплопроводности с начальными и граничными условиями в ходе исследования процесса дуговой сварки с движущимся источником тепла. Для моделирования теплового воздействия сварочной дуги использовалась неосесимметричная модель источника тепла в форме двойного эллипсоида с распределением плотности теплового потока по закону Гаусса [8].

Плотность мощности электрической сварочной дуги в произвольном квадранте трехмерного пространства определялся по формуле:

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

где $q_{arc}(x, y, z, t)$ – плотность мощности, Вт/м³; q_0 – чистый тепловой поток, Вт; a, b, c – параметры, описывающие ширину теплового воздействия источника по осям x, y, z соответственно, мм; v – скорость перемещения источника тепла, м/с; f_f и f_r – доли тепла, выделяемые в переднем или заднем квадрантах трехмерного пространства соответственно ($f_f + f_r = 2$).

Термический анализ включал операции определения теплофизических свойств материалов свариваемых деталей, моделирования процессов передачи тепла от движущейся сварочной дуги, разработки конечно-элементной модели, вычисления значений температуры нагрева металла в зависимости от координат и времени сварки.

Значение температур нагрева металла определяли в результате решения дифференциального уравнения теплопроводности для трехмерного пространства [9]:

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

где ρ – плотность материала, кг/м³; C_p – удельная теплоемкость, Дж/кг·°C; T – температура, °C; λ – теплопроводность, Вт/м·°C; Q – входящий тепловой поток, Вт/м³.

Так как нагрев от действия сварочной дуги рассматривался не в виде тепловых граничных условий, а в виде распределения внешнего теплового потока, то для учета радиационных и конвективных потерь тепла поверхности свариваемых деталей рассматривались как поглощающие тепло границы, а выражение для определения входящего теплового потока Q записывалось в следующем виде:

$$Q = q_{arc} + q_{кон} (\int dV)^{-1} - q_{изл} (\int dV)^{-1}.$$

$$q_{кон} = \int k_{кон} (T - T_{oc}) dA,$$

$$q_{изл} = \int k \cdot k_p \cdot (T^4 - T_{oc}^4) dA,$$

где q_{arc} – тепловой поток от сварочной дуги, Вт/м³; $q_{кон}$ – потери тепла с поверхности за счет конвекции, Вт; $q_{изл}$ – потери тепла с поверхности за счет излучения, Вт; $k_{кон}$ – коэффициент теплообмена с внешней средой, Вт/м²·°C; k_p – коэффициент теплообмена излучением ($k_p = 0,8$); k – постоянная Стефана – Больцмана ($k = 5,67 \cdot 10^4$ Вт/м²·°C); T_{oc} – температура окружающей среды ($T_{oc} = 20$ °C).

С целью уменьшения объема вычислений и упрощения расчетов принимался ряд допущений. Теплообмен деталей с внешней средой учитывался при помощи конечных элементов, находившихся на поверхности трехмерной модели. В процессе термического анализа материалы свариваемых деталей считались однородными и изотропными. В связи с незначительным количеством теплоты, выделяющейся при термической деформации металла, по сравнению с теплом от сварочной дуги полагали, что поля напряжений и деформаций не оказывают влияния на значения температур в деталях.

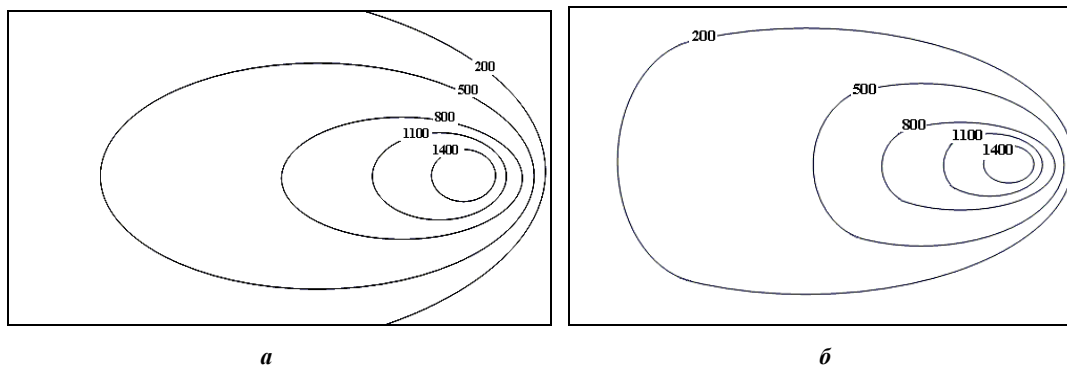


Рисунок 1. – Изотермы поверхности детали (вдоль линии перемещения источника тепла) в зависимости от вида сварки: в обычных условиях (а); с принудительным охлаждением (б)

Сравнительные результаты моделирования тепловых процессов при дуговой сварке тонколистовых заготовок из аустенитной стали приведены на рисунке 1.

Общая постановка трехмерной задачи термоупругости сводилась к определению линейных деформаций $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$, угловых деформаций $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$, нормальных $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и касательных напряжений $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ [10].

Линейные и угловые деформации соединяемых деталей при сварке определяли по формулам:

- линейные

$$\epsilon_x = \partial U / \partial x, \epsilon_y = \partial V / \partial y, \epsilon_z = \partial W / \partial z;$$

- угловые

$$\gamma_{xy} = \partial U / \partial x + \partial V / \partial y, \gamma_{yz} = \partial V / \partial z + \partial W / \partial y, \gamma_{zx} = \partial W / \partial x + \partial U / \partial z,$$

где U, V, W – перемещения точек детали в направлении координатных осей x, y, z соответственно, м.

Нормальные напряжения в соединяемых деталях определяли по формулам:

$$\sigma_x = C11 \cdot \epsilon_x + C12 \cdot \epsilon_y + C13 \cdot \epsilon_z - b \cdot T_p;$$

$$\sigma_y = C12 \cdot \epsilon_x + C22 \cdot \epsilon_y + C23 \cdot \epsilon_z - b \cdot T_p;$$

$$\sigma_z = C13 \cdot \epsilon_x + C23 \cdot \epsilon_y + C33 \cdot \epsilon_z - b \cdot T_p,$$

где T_p – температура деталей, °С.

Касательные напряжения в соединяемых деталях определяли следующим образом:

$$\tau_{xy} = C44 \cdot \gamma_{xy}, \tau_{yz} = C44 \cdot \gamma_{yz}, \tau_{zx} = C44 \cdot \gamma_{zx};$$

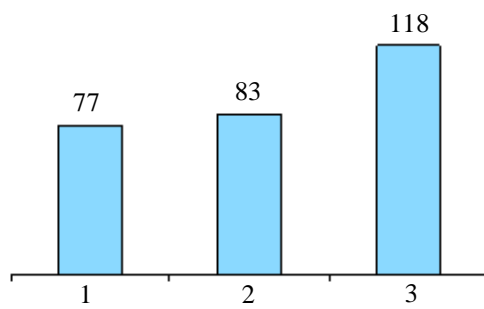
$$G = E \cdot ((1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu))^{-1}, C11 = C22 = C33 = G \cdot (1 - \nu);$$

$$C12 = C13 = C23 = G \cdot \nu, C44 = G \cdot (1 - \nu) \cdot 0,5, b = G \cdot \alpha \cdot (1 + \nu),$$

где E – модуль Юнга, МПа; ν – коэффициент Пуассона; α – коэффициент термического расширения материала деталей; °С⁻¹.

Таким образом, проведен несовместный термомеханический анализ, в процессе которого определены значения напряжений и деформаций, возникающих при выполнении дуговой сваркой стыковых соединений тонколистовых деталей из аустенитной стали.

Зависимости значений остаточных деформаций в поперечном сечении сварного шва от вида и режима сварки приведены на рисунке 2.



1 – удаление зоны охлаждения от сварочной дуги 40 мм;
2 – удаление зоны охлаждения от сварочной дуги 30 мм; 3 – без охлаждения

Рисунок 2. – Распределение остаточных деформаций исследуемых образцов, $\delta, \text{мм} \cdot 10^{-4}$

Полученные данные свидетельствуют о том, что в процессе дуговой сварки деталей из аустенитной стали существенное влияние на значения деформаций оказывают наличие области охлаждения и её расположение. Кроме того, полученные результаты свидетельствуют об оптимальном диапазоне значений расстояния области охлаждения от сварочной дуги. Наименьшие значения продольных остаточных деформаций 0,0077 и 0,0083 мм наблюдаются при удалении зоны охлаждения от сварочной дуги на 40 и 30 мм соответственно.

Закключение. В ходе исследований выполнено трехмерное моделирование дуговой сварки в среде защитного газа с принудительным охлаждением высокотемпературной области тонколистовых заготовок из аустенитной стали. Моделирование включало операции генерирования трехмерной сетки конечных

элементов, формирования и идентификации групп конечных элементов, определения теплофизических свойств материалов свариваемых деталей, назначение режима дуговой сварки заданием термомеханических начальных и граничных условий для рассчитываемой модели.

Выполнено исследование процесса дуговой сварки стыкового соединения с учетом процессов высокотемпературной релаксации напряжений. Для этого за счет решения дифференциального уравнения теплопроводности с начальными и граничными условиями для свариваемых деталей в различные моменты времени определено температурное поле, которому посредством теплофизических свойств материалов были поставлены в соответствие поля напряжений и деформаций в соединяемых деталях.

Проведенные расчеты позволили найти функциональные зависимости между параметрами режима дуговой сварки тонколистовых заготовок – положением зоны охлаждения относительно сварочной дуги – и величиной остаточных поперечных напряжений в сварном шве. Использование данных зависимостей при оптимизации режимов дуговой сварки позволяют в 1,6 раза уменьшить средние значения остаточных напряжений при изготовлении тонколистовых конструкций из аустенитной стали. Полученные данные также могут найти применение при подборе оптимальных режимов дуговой сварки тонколистовых заготовок с целью уменьшения деформаций при производстве различных оболочковых конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением ; под ред. Б.Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
2. Винокуров, В.А. Теория сварочных напряжений и деформаций / В.А. Винокуров. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.
3. Сагалевич, В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М. Сагалевич. – М. : Машиностроение, 1974. – 248 с.
4. Parmar, K.S. Welding engineering and Technology / K.S. Parmar. – Khanna Publishers, 2005. – 270 p.
5. Feng, Z. Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion / Z. Feng. – Woodhead Publishers, 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 // Вестник Полоцкого государственного университета. 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. Шабров, Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н.Н. Шабров. – Л. : Машиностроение, 1979. – 212 с.
10. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Д. Гудьер. – М. : Наука, 1979. – 560 с.

Поступила 18.01.2018

DECREASING DEFORMATION OF WELDING JOINTS

F. PANTELEENKO, A. SHUMAV

Some ways to decrease the residual deformation of welding joints are considered. It was performed the researches to decrease the lateral residual deformation of welding joints accomplished by argon welding. It was proposed to decrease the lateral residual deformation of welding joints by using of hard carbon dioxide to reduce the area of metal heating and also by selecting of optimal welding conditions. It was found the values of lateral deformation of welding joints accomplished by argon welding with using of hard carbon dioxide as well as under usual conditions. It was evaluated the functional connections between welding conditions and lateral deformation, which allowed to calculated the optimal welding conditions to supply the minimal residual deformation. It was found that the use of hard carbon dioxide in the course of arc welding affords decreasing of lateral residual deformation of welding joints in 1,6 time in comparison with the arc welding without cooling.

Keywords: *arc welding, welding joint, residual deformation, optimal conditions, decreasing deformation.*