

УДК 669.7: 624.01

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ 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)

*В работе было выполнено компьютерное моделирование процессов изготовления сварных конструкций из тонколистовых заготовок. Результаты моделирования были использованы для уменьшения остаточных напряжений и деформаций сварных соединений. Было проведено моделирование процесса получения дуговой сваркой стыковых соединений из алюминиевого сплава. В процессе исследований были определены напряжения и деформации при использовании различных методов дуговой сварки – традиционной дуговой сварки и дуговой сварки с принудительным охлаждением высокотемпературной области сварного соединения. Значения температур в свариваемых деталях были получены в результате решения дифференциального уравнения теплопроводности с движущимся источником тепла. Величины напряжений и деформаций соединяемых деталей были определены в результате решения уравнений термоупругости. Установлено, что продольные деформации в детали при сварке с принудительным охлаждением в 1,2 раза меньше, чем при традиционной дуговой сварке.*

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

**Введение.** Алюминиевые сплавы являются одними из наиболее распространенных конструкционных сплавов, которые применяются в машиностроении, энергетике, химической промышленности и ряде других отраслей производства, благодаря коррозионной стойкости, высокой удельной прочности, пластичности и т.д. [1]. Широкое использование алюминиевых сплавов в различных областях обуславливает актуальность совершенствования технологий изготовления деталей и конструкций из них.

При изготовлении значительного количества деталей и узлов оборудования из алюминиевых сплавов (емкостей, трубопроводов и т.п.) одним из условий их надежной работы является обеспечение герметичности, исключение утечки активных веществ за счет плотного прилегания контактирующих поверхностей. Выполнить данное условие возможно при обеспечении высокого качества изготовления сварных конструкций и соблюдения требуемых размеров и формы, в том числе за счет повышения точности изготовления рабочих поверхностей.

Изготовление сварных конструкций из тонколистовых заготовок при помощи дуговой сварки сопровождается образованием остаточных напряжений и деформаций, которые могут привести к изменению размеров и формы, потере устойчивости, снижению усталостной прочности и ухудшению других эксплуатационных свойств, сокращению срока службы изделия [2]. Существуют различные методы уменьшения остаточных напряжений и деформаций при изготовлении конструкций с использованием дуговой сварки, например, термическая обработка сварной конструкции (предварительная или заключительная), изменение напряженно-деформированного состояния элементов конструкции в результате поверхностной механической обработки, выполнение сварных швов в рациональной последовательности и т.д. [3; 4].

Эффективная реализация некоторых методов уменьшения остаточных напряжений и деформаций в конструкции, например, метода термического растяжения [5], возможна в результате применения такого современного инструмента, как моделирование процессов сварки. Моделирование сварки позволяет определить оптимальные режимы технологического процесса, при которых обеспечиваются минимальные значения сварочных напряжений и деформаций.

В работе были поставлены следующие задачи:

- а) определить остаточные напряжения и деформации сварных соединений посредством моделирования процессов, протекающих при различных способах сварки;
- б) на основании данных, полученных при моделировании сварочных процессов, выполнить оценку эффективности мероприятий по уменьшению остаточных напряжений и деформаций сварных соединений.

**Основная часть.** В работе было выполнено моделирование процессов, протекающих при изготовлении с помощью дуговой сварки стыковых соединений листовых заготовок алюминиевого сплава марки АМг. Для исследований были использованы образцы сварного соединения, изготовленные из пластин размером 150×75×3 мм. Сварное соединение было выполнено путем сварки встык за один проход в среде аргона. Сварка была проведена при жестком закреплении образцов в нижнем положении на подкладке из нержавеющей стали, с использованием проволоки диаметром 1 мм. Режимы сварки следующие: ток – 100 А; напряжение на дуге – 18 В; скорость сварки – 2 мм/с.

В процессе были использованы технологические методы уменьшения возникающих в металле образцов напряжений и деформаций. В частности, было предусмотрено применение твердого порошкового охладителя с подачей его в околошовную область сварного соединения в процессе выполнения сварки.

Для определения параметров технологического процесса изготовления сварной конструкции были проведены следующие операции: 1) моделирование процесса распространения тепла от движущейся сварочной дуги к собираемой конструкции и в окружающее пространство; 2) определение закономерностей изменения температурных значений в узловых точках пространственной модели; 3) определение значений остаточных напряжений в металле соединяемых образцов, а также определение значений остаточных деформаций элементов сварного соединения.

1. Для моделирования процессов распространения тепла от движущейся сварочной дуги источник тепла был представлен в форме двойного эллипсоида, в котором плотность теплового потока была распределена в соответствии с законом Гаусса [6].

Величина теплового потока от сварочной дуги была определена по следующей формуле:

$$Q = \eta U \cdot I,$$

где:  $\eta$  – к.п.д. теплового воздействия сварочной дуги;

$U$  – напряжение на дуге, В;

$I$  – ток дуги, А.

2. Закономерности изменения температуры нагрева металла были определены в результате решения дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных:

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

где:  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$C_p$  – удельная теплоемкость, Дж/кг·С;

$T$  – температура, °С;

$\lambda$  – теплопроводность, Вт/м·С;

$Q$  – входящий тепловой поток, Вт/м<sup>3</sup>.

При определении начальных и граничных условий нагрев соединяемых деталей от действия сварочной дуги рассматривался в виде распределения внешнего теплового потока, а потери тепла за счет конвективного теплообмена и радиационного излучения – в виде границ, поглощающих тепло.

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности был использован метод конечных разностей [7]. При аппроксимации уравнения применялась координатная сетка со следующими координатами (рисунк 1):

$$x_i = (i - 1) \cdot h_x; y_j = (j - 1) \cdot h_y; z_k = (k - 1) \cdot h_z; t_n = n \cdot \tau,$$

где:  $h_x, h_y, h_z$  – шаги сетки по координатам  $x, y, z$  соответственно;

$\tau$  – шаг по времени;

$i = 1, 2, \dots, N_x; j = 1, 2, \dots, N_y;$

$k = 1, 2, \dots, N_z; n = 0, 1, \dots, K.$

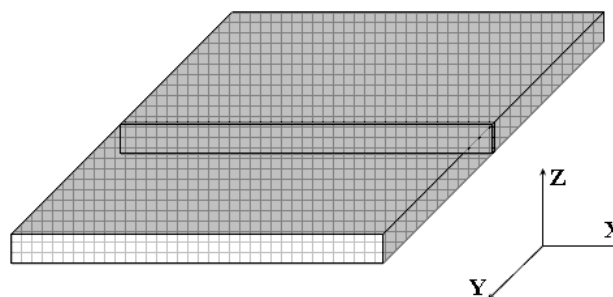


Рисунок 1. – Схема разбиения пространства координатной сеткой

Представление дифференциального уравнения в дискретном виде было выполнено с использованием локально одномерной схемы, которая является абсолютно устойчивой [8]. При этом трехмерное уравнение было разбито на одномерные уравнения в направлении каждой из координатных осей, в результате последовательного решения которых были определены значения температур для конкретного временного шага.

В соответствии с неявной четырехточечной разностной схемой дифференциальное уравнение было выражено системой алгебраических уравнений следующего вида:

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1/2} - B_i \cdot T_i^{n+1/2} + C_i \cdot T_{i-1}^{n+1/2} = D_i,$$

где:  $A_i = C_i = \lambda / h^2;$

$B_i = 2 \cdot \lambda / h^2 + \kappa / h + \rho \cdot c / \tau;$

$D_i = -\rho \cdot c \cdot T_i^n / \tau - \kappa \cdot T_{oc} / h - \epsilon \cdot \sigma \cdot ((T_i^n)^4 - T_c^4) / h + Q, n+1/2 = 0,5 (n + n + 1).$

Система уравнений была сведена к стандартному виду и решена методом прогонки [9]. Для решения системы уравнений, нелинейных относительно искомой величины, был использован метод простой итерации. Был организован итерационный процесс по решению системы уравнений на каждом временном шаге. Количество итераций было найдено из условия достижения установленной погрешности определения температуры на текущем временном шаге.

3. Для определения остаточных напряжений и деформаций образцов в процессе сварки были решены уравнения термоупругости, что позволило найти значения линейных деформаций  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ , угловых деформаций  $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ , нормальных и касательных напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  и  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  [10]. При расчетах остаточных напряжений и деформаций был использован алгоритм вычислений, аналогичный алгоритму, который был применен при определении температуры нагрева металла заготовок.

Линейные и угловые деформации образцов были найдены по формулам:

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

где  $U, V, W$  – перемещения точек образца в направлении координатных осей  $x, y, z$  соответственно, м. Нормальные напряжения в образцах были найдены по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= C11 \cdot \epsilon_x + C12 \cdot \epsilon_y + C13 \cdot \epsilon_z - b \cdot T_p; \\ \sigma_y &= C12 \cdot \epsilon_x + C22 \cdot \epsilon_y + C23 \cdot \epsilon_z - b \cdot T_p; \\ \sigma_z &= C13 \cdot \epsilon_x + C23 \cdot \epsilon_y + C33 \cdot \epsilon_z - b \cdot T_p, \end{aligned}$$

при этом

$$\begin{aligned} C11 = C22 = C33 &= G \cdot (1 - \nu); G = E \cdot ((1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu))^{-1}; \\ C12 = C13 = C23 &= G \cdot \nu, C44 = G \cdot (1 - \nu) \cdot 0,5, b = G \cdot \alpha \cdot (1 + \nu), \end{aligned}$$

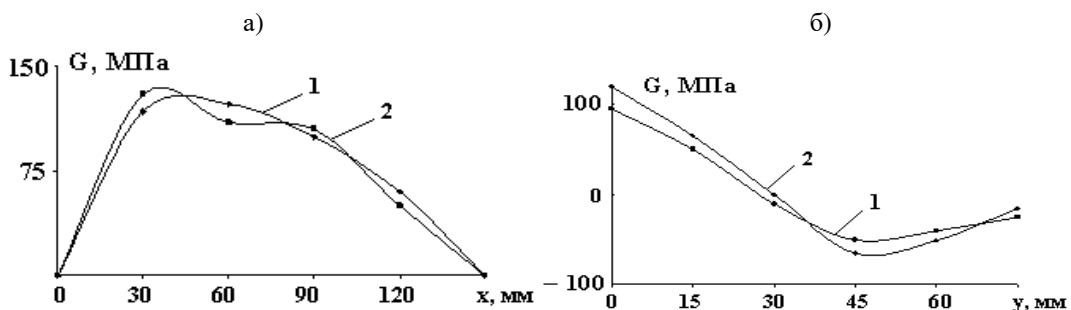
где:  $T_p$  – температура деталей, °С;

$E$  – модуль Юнга, МПа;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\alpha$  – коэффициент термического расширения материала образца, °С<sup>-1</sup>.

Данные, полученные при моделировании остаточных напряжений сварных соединений, выполненных методом обычной дуговой сварки и сварки с охлаждением, приведены на рисунке 2.



1 – сварка с охлаждением; 2 – сварка без охлаждения.

Рисунок 2. – Продольные (а) и поперечные (б) остаточные напряжения (G) в сварных соединениях

На основании данных, приведенных на рисунке 2, можно сделать следующие выводы: 1) при использовании охлаждения в процессе дуговой сварки стыкового соединения ширина зоны поперечных растягивающих остаточных напряжений в среднем в 1,18 раза меньше чем при обычной дуговой сварке; 2) максимальные значения продольных остаточных напряжений при обычной дуговой сварке на 10% превышают аналогичные значения при дуговой сварке с охлаждением; 3) при дуговой сварке с использованием твердого диоксида углерода остаточные поперечные напряжения в сварном соединении собираемой конструкции в 1,24 раза ниже, чем при сварке без охлаждения.

Результаты, полученные при моделировании остаточных деформаций сварных соединений, выполненных при помощи обычной дуговой сварки и сварки с охлаждением, приведены в таблице.

Таблица. – Величина остаточных деформаций сварных соединений

Вид сварки	Величина деформации (по координатам x), мм					
	0 мм	30 мм	60 мм	90 мм	120 мм	150 мм
С охлаждением	0	1,01	2,02	3,05	4,09	5,10
Без охлаждения	0	1,20	2,41	3,65	4,90	6,10

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наименьшие остаточные деформации – 5,1 мкм – возникают при изготовлении детали посредством дуговой сварки с охлаждением. Остаточные деформации при изготовлении детали при помощи традиционной дуговой сварки составляют 6,1 мкм или в 1,2 раза превышают данный показатель при сварке с охлаждением.

Таким образом, результаты исследований показывают, что использование принудительного охлаждения в процессе дуговой сварки при изготовлении конструкции из тонколистовых заготовок алюминиевого сплава позволяет существенно уменьшить остаточные напряжения и деформации по сравнению со сваркой без охлаждения. Очевидно, это достигается за счет уменьшения тепловложений в элементы собираемой конструкции, ограничения размеров области высокотемпературного нагрева металла, сокращения времени пребывания металла заготовок при высоких температурах.

**Заключение.** Было проведено исследование процесса дуговой сварки в среде аргона при изготовлении стыкового сварного соединения заготовок алюминиевых сплавов. При этом, чтобы установить оптимальные режимы дуговой сварки, было проведено моделирование процессов (распределения тепла, изменения значений температур, тепловой деформации заготовок), которые протекают при изготовлении сварного соединения. Также была дана оценка эффективности метода уменьшения остаточных напряжений и деформаций при проведении дуговой сварки в среде защитных газов. Для этого были оценены два способа дугой сварки конструкции из тонколистовых заготовок в среде аргона – традиционный способ и способ с охлаждением высокотемпературной области сварного шва при помощи твердого охладителя.

Было установлено, что дуговая сварка в среде аргона с охлаждением стыковых соединений заготовок алюминиевых сплавов обеспечивает уменьшение остаточных поперечных напряжений в 1,18 раза и продольных остаточных напряжений – в 1,12 раза по сравнению с традиционной дуговой сваркой в среде аргона. Остаточные деформации сварного соединения при дуговой сварке с охлаждением в 1,2 раза меньше, чем при традиционной дуговой сварке.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фридляндер, И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы / И.Н. Фридляндер. – М. : Металлургия, 1978. – 208 с.
2. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
3. Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев. – М. : Машиностроение, 1996. – 576 с.
4. Сагалевиц, В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М. Сагалевиц. – М. : Машиностроение, 1974. – 248 с.
5. Цяо, Г. Бездеформационная сварка с использованием эффектов термического растяжения для соединения материалов малой толщины / Г. Цяо // Автоматическая сварка. – 2006. – № 12. – С. 3–13.
6. Goldak, J.A. Computational Welding Mechanics / J.A. Goldak, M. Akhlaghi. – Springer, 2005. – 321 p.
7. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов / В.М. Вержбицкий. – М. : Высшая школа, 2002. – 840 с.
8. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М. : Наука, 1977. – 656 с.
9. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.
10. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Д. Гудьер. – М. : Наука, 1979. – 560 с.

Поступила 14.06.2019

## SIMULATING DEFORMATION OF WELDING JOINTS

*F. PANTELEENKO, A. SHUMAV*

*The arc welding simulation of welding constructions of the thin sheet pieces has been produced in this work. The results of simulation had been used to decrease the residual stresses and deformation of welding joints. It was accomplished the arc welding simulation of the beam welds of aluminum alloy. In the course of research it had been estimated the stresses and deformation of various methods of arc welding, for example, traditional arc welding and force-cooling welding. The values of temperature of welded pieces had been evaluated by solution of partial differential equation of heat transfer with the moving heat source. The values of stresses and deformation of welded pieces had been evaluated by solution of the thermal elasticity equations. It was found that the longitudinal deformation of piece welded by force-cooling welding is smaller by a factor of 1.2 than it welded by traditional arc welding.*

**Keywords:** arc welding, welding joint, residual deformation, residual stresses, decreasing deformation.