

УДК 669.7:624.01

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА 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)*

Предложены некоторые подходы к повышению качества изготовления сварных конструкций из тонколистовых заготовок. Повышение качества стремились обеспечить за счет уменьшения остаточных напряжений и деформаций сварных соединений. Проведено моделирование процесса изготовления дуговой сваркой стыковых соединений деталей из аустенитной стали. Процесс представлен в виде комбинации методов сварки с принудительным охлаждением и сварки с термическим растяжением. Значения температур в свариваемых деталях получены в результате решения дифференциального уравнения теплопроводности с движущимся источником тепла. Величины напряжений и деформаций соединяемых деталей определены в результате решения уравнений термоупругости. В ходе исследования модели получены зависимости между расположением зоны охлаждения и остаточными напряжениями, что позволило определить оптимальные режимы дуговой сварки для уменьшения остаточных напряжений и деформаций в соединяемых деталях.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварное соединение, остаточные напряжения, остаточные деформации, улучшение качества.

Введение. Аустенитные нержавеющие хромоникелевые стали – широко распространенные группы сталей благодаря их высоким эксплуатационным свойствам (высокой пластичности, высокой вязкости и т.п.), а также способности работать в агрессивных условиях в широком диапазоне температур (от криогенных до 750 °С и более). Одним из наиболее технологичных способов изготовления конструкций из аустенитных сталей служит дуговая сварка, которой присуще неравномерное распределение температур при нагреве и охлаждении, изменение фазового состава металла деталей и др., что обуславливает возникновение значительных напряжений и деформации в деталях. Эти напряжения и деформации могут повлиять на качество собираемой конструкции, в частности, привести к изменениям её размеров и формы, вызвать снижение эксплуатационных свойств и т.д. [1; 2].

Одним из возможных путей повышения качества изготавливаемых изделий за счет повышения точности при сварке тонколистовых (толщиной до 4 мм) заготовок является использование различных методов бездеформационной сварки. К таким методам, в частности, относятся метод предварительной деформации, метод термического растяжения, метод оптимальной последовательности выполнения сварных швов [3; 4].

Метод термического растяжения реализуется при локальном нагреве заготовки подвижным или статичным источником тепла, расположенным параллельно сварному шву. При этом технологическими параметрами сварки являются температура, ширина и продолжительность нагрева, а также его локализация, то есть удаление от сварочной дуги. Если одновременно с дуговой сваркой осуществлять нагрев заготовок на некотором удалении от сварочной дуги, то возникают растягивающие напряжения в области сварного шва, которые способствуют расширению заготовок, и сжимающие напряжения в зоне нагрева. При этом образующиеся в прилегающих областях растягивающие напряжения будут способствовать нейтрализации сжимающих напряжений в области сварного шва до допустимых значений, не превышающих предел текучести, что, в свою очередь, позволит предупреждать возникновение пластических деформаций в области сварного шва. Поскольку уменьшение ширины области нагрева и увеличение его температуры ведет к увеличению сжимающих напряжений в области нагрева, то возможен подбор значений данных параметров, при которых эти напряжения не превышали бы допустимых значений.

Используемые для моделирования сварочных процессов двумерные модели – модель поперечного сечения и модель в плоскости – обладают рядом преимуществ, к которым следует отнести относительную простоту их формулирования, сокращение времени вычислений в 30...100 раз по сравнению со временем, затрачиваемым на вычисления при анализе трехмерных моделей сварки.

Так как модель поперечного сечения предполагает, что поток тепла в направлении сварки равен нулю, то в случае сварочного процесса, когда тепловой поток перед источником тепла и позади него незначителен, при двумерном моделировании можно обеспечить достаточно высокую точность вычислений [5]. Точность вычислений в рамках данной модели также возрастает при моделировании тепловых процессов при сварке металлов с низкой теплопроводностью, например, сталей различных марок, особенно аустенитных, теплопроводность которых в среднем в 4 раза меньше, чем у углеродистых сталей.

Модель в плоскости основывается на предположении, что поток тепла в направлении нормали к плоскости сварки равен нулю. В отличие от модели поперечного сечения данная модель позволяет производить вычисления начального и конечного переходного процесса, но требует большего количест-

ва вычислений за счет большего количества временных шагов. Так как в данной модели тепловой поток ограничивается плоскостью свариваемых пластин, то достаточно высокая точность вычислений достигается при моделировании сварки листовых заготовок, а также при сварке деталей высококонцентрированными источниками тепла, например, плазмой, лазером или электронным лучом [6].

Основная часть. Применение метода термического растяжения не позволяет полностью предупредить возникновение пластической деформации при сварке листовых заготовок толщиной до 4 мм и избежать недопустимого нарушения формы конструкции. По этой причине для выполнения дуговой сварки с минимальными напряжениями и без деформаций необходимо использовать комбинацию нескольких методов бездеформационной сварки, например, комбинацию метода термического растяжения и метода сварки с принудительным охлаждением высокотемпературной области сварного шва [7; 8]. Так как при дуговой сварке возникают растягивающие напряжения в области сварного шва, охлаждение заготовок между сварочной дугой и областью дополнительного нагрева обеспечивает эффект термического растяжения вследствие температурного градиента. Также принудительное охлаждение ограничивает площадь перегрева металла в области сварного шва и уменьшает средние значения сжимающих напряжений в данной области.

Проведенное в работе моделирование термомеханических процессов, протекающих при дуговой сварке тонколистовых заготовок, включало термический и термомеханический анализ. Термический анализ состоял из операций 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 [9]. При выполнении термического анализа процесса сварки были заданы теплофизические свойства материалов деталей, проведено моделирование тепловых процессов сварки от движущегося источника тепла, определены значения температур нагрева металла соединяемых деталей для различных моментов сварки.

Значение температур нагрева металла определяли в ходе решения дифференциального уравнения теплопроводности:

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

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 для учета радиационных и конвективных потерь тепла поверхности свариваемых деталей рассматривались как поглощающие тепло границы, то выражение для определения входящего теплового потока Q записывалось в виде:

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

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

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

где q_{arc} – тепловой поток от плазменной дуги, Вт/м³; $q_{кон}$ – потери тепла с поверхности за счет конвекции, Вт; $q_{изл}$ – потери тепла с поверхности за счет излучения, Вт; $\kappa_{кон}$ – коэффициент теплообмена с внешней средой, Вт/м²·C; κ_p – коэффициент теплообмена излучением ($\kappa_p = 0,8$); κ – постоянная Стефана – Больцмана ($\kappa = 5,67 \cdot 10^4$ Вт/м²·°C⁴); T_{oc} – температура окружающей среды ($T_{oc} = 20$ °C).

Определенное в ходе термического анализа распределение температур поверхности свариваемых деталей при дуговой сварке с принудительным охлаждением высокотемпературных областей сварного соединения приведено на рисунке 1.

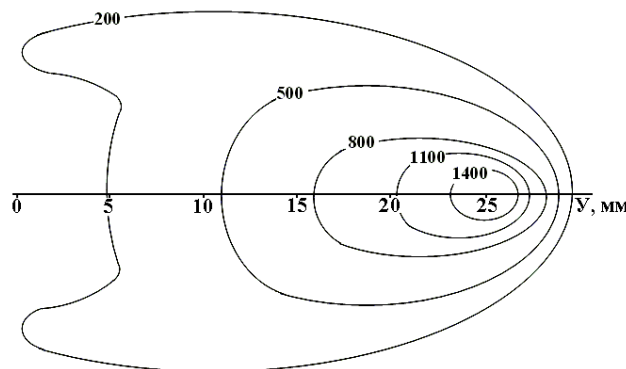


Рисунок 1. – Распределение температур поверхности свариваемых деталей (изотермы)

Полученные данные свидетельствуют об образовании при выполнении стыкового соединения при помощи дуговой сварки с принудительным охлаждением симметричных относительно сварного шва чередующихся областей повышенных и пониженных температур, перемещающихся вслед за сварочной дугой и создающих условия для реализации метода термического растяжения для свариваемых деталей.

Термомеханический анализ включал решение уравнений термоупругости на основе данных о распределении температур в свариваемых деталях в различные моменты времени [10]. В процессе решения задачи термоупругости были определены линейные деформации ϵ_x , ϵ_y , угловые деформации γ_{xy} , нормальные и касательные напряжения σ_x , σ_y и τ_{xy} .

Линейные и угловые деформации деталей определены по формулам:

$$\epsilon_x = \partial U / \partial x, \epsilon_y = \partial V / \partial y \text{ (линейные); } \gamma_{xy} = \partial U / \partial y + \partial V / \partial x \text{ (угловые),}$$

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

Нормальные напряжения в деталях были определены по следующим формулам:

$$\sigma_x = C11 \cdot \epsilon_x + C12 \cdot \epsilon_y - b \cdot T_p; \sigma_y = C12 \cdot \epsilon_x + C22 \cdot \epsilon_y - b \cdot T_p,$$

где T_p – температура деталей, °С.

Касательные напряжения в деталях были определены как $\tau_{xy} = C33 \cdot \gamma_{xy}$. При этом были использованы следующие зависимости между величинами:

$$G = E \cdot ((1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu))^{-1}; C11 = C22 = G \cdot (1 - \nu); C12 = G \cdot \nu; C33 = G \cdot (1 - \nu) \cdot 0,5; b = G \cdot \alpha \cdot (1 + \nu).$$

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

В работе в результате проведенного термомеханического анализа найдены величины напряжений и деформаций, возникающих в процессе стыковой дуговой сварки тонколистовых деталей из аустенитной стали. Сварка выполнена с охлаждением высокотемпературной области сварного шва.

Распределение величины остаточных напряжений в сечении сварного шва в зависимости от удаления зоны охлаждения от сварочной дуги, а также при различных значениях ширины данной зоны приведены на рисунке 2. Данное распределение представлено в виде линий уровня, которые были построены без использования двумерной интерполяции.

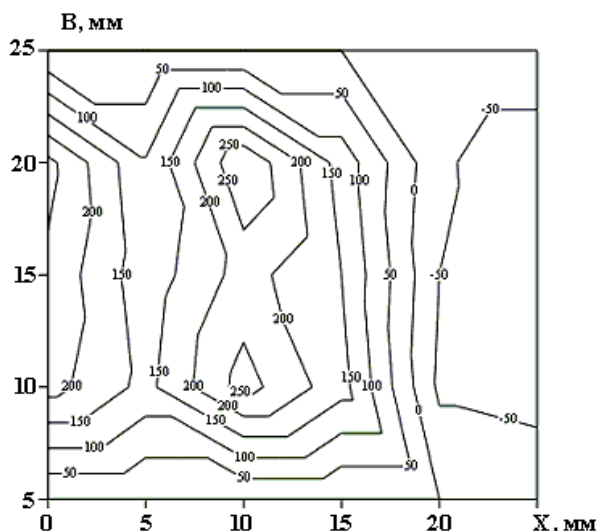


Рисунок 2. – Распределение остаточных напряжений (МПа) на поверхности исследуемых образцов в зависимости от удаления зоны охлаждения (X) от сварочной дуги и ширины зоны (B)

В ходе расчетов установлено, что при уменьшении ширины области охлаждения происходит образование растягивающих напряжений в центральной области соединения. Очевидно, это является следствием увеличения температуры металла в прилегающих к сварному шву областях при уменьшении ширины области охлаждения. Таким образом, результаты вычислений показывают, что использование охлаждения при выполнении стыкового соединения тонколистовых деталей из аустенитной стали позволяет

значительно снизить величину остаточных напряжений. В частности, при оптимальных значениях ширины области охлаждения после дуговой сварки в среде аргона с использованием твердого диоксида углерода значения остаточных напряжений были снижены в 1,3 раза по сравнению со сваркой без охлаждения.

Заключение. Для определения мероприятий по повышению качества собираемой конструкции проведено моделирование процесса дуговой сварки стыковых соединений тонколистовых заготовок из аустенитной стали. В моделировании была использована комбинация метода сварки с принудительным охлаждением и метода термического растяжения. Исследование проводилось при помощи численного моделирования, которое включало создание сетки конечных элементов, определение теплофизических свойств свариваемых материалов, задание начальных и граничных условий расчетной модели. При этом в модели процесса дуговой сварки учитывалось явление высокотемпературной релаксации напряжений в соединяемых деталях.

Проведен термомеханический анализ, в ходе которого получено решение дифференциального уравнения теплопроводности и для различных моментов времени определены значения температур, которым были поставлены в соответствие значения напряжений и деформаций в свариваемых деталях.

Выполненные в рамках анализируемой модели расчеты позволили установить взаимосвязь между режимами дуговой сварки и остаточными напряжениями и деформациями в свариваемых деталях, что позволяет осуществить оптимизацию режимов сварки с целью минимизации остаточных напряжений и деформаций.

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. Сагалевиц, В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М. Сагалевиц. – М. : Машиностроение, 1974. – 248 с.
4. Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев. – М. : Машиностроение, 1996. – 576 с.
5. Parmar, K.S. Welding engineering and Technology / K.S. Parmar. – Khanna Publishers, 2005. – 270 p.
6. Feng, Z. Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion / Z. Feng. – Woodhead Publishers, 2005. – 343 p.
7. Цяо, Г. Бездеформационная сварка с использованием эффектов термического растяжения для соединения материалов малой толщины // Автоматическая сварка. – 2006. – № 12. – С. 3–13.
8. 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.
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 22.06.2018

INCREASING QUALITY OF WELDING JOINTS

F. PANTELEENKO, A. SHUMAU

Some ways to increase the quality of welding constructions of the sheet pieces had been proposed in this work. It has been tended to increase the quality of welding constructions at the cost of reduction of residual stresses and deformation of welding joints. It was performed the arc welding simulation of butt joints of austenitic steel. The process has been presented as a combination of force-cooling and thermal extended 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 evaluated the functional connections between the cooling zone location and residual stresses, which allowed to calculated the optimal welding conditions to supply the minimal residual stresses and deformation of welded pieces.

Keywords: arc welding, welding joint, residual stresses, residual deformation, increasing quality.