

УДК 669.7: 624.01

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д-р техн. наук,
О.В. ШУМОВ, канд. техн. наук (БНТУ)

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Введение

Хорошие эксплуатационные свойства в большом интервале рабочих температур при эксплуатации в различных агрессивных средах обусловили широкое распространение нержавеющей хромоникелевых аустенитных сталей. Однако большие значения остаточных напряжений и деформаций, возникающих в процессе дуговой сварки заготовок из данных сталей, особенно в случае использования заготовок малой толщины, негативно влияют на физико-механические и эксплуатационные свойства сварных соединений, на надежность работы и срок службы изготавливаемой сварной конструкции [1, 2].

Для снижения остаточных напряжений и деформаций, возникающих при дуговой сварке конструкций из тонколистовых заготовок, применяются различные способы, например, предварительная деформация соединяемых заготовок, выполнение сварных швов в оптимальной последовательности, охлаждение высокотемпературной области сварного соединения, термическое растяжение металла заготовок в процессе сварки и т.д. [3, 4]. Длительное пребывание свариваемых заготовок при высоких температурах может служить причиной химической неоднородности металла, образования скоплений хрупких фаз в сварном соединении, служащих концентраторами напряжений и негативно влияющих на механические свойства сварных соединений, снижающих надежность работы готового изделия. Поскольку при использовании охлаждения в процессе дуговой сварки достигается уменьшение площади нагретого металла, что обеспечивает сокращение времени пребывания металла заготовок при высоких температурах, то применение данного способа

сварки является эффективным способом уменьшения остаточных сварочных напряжений и деформаций.

При термическом растяжении металла в процессе дуговой сварки производится нагрев соединяемых тонколистовых заготовок на определенном расстоянии от движущейся сварочной дуги [5, 6]. Нагрев заготовок осуществляется источником тепла, который перемещается параллельно выполняемому сварному шву синхронно с перемещениями движущегося источника тепла. Растягивающие напряжения, которые возникают в прилегающей к области нагрева зоне металла, обеспечивают нейтрализацию напряжений сжатия в зоне сварного шва, что позволяет не допустить образования пластических деформаций в этой зоне или уменьшить их. Регулируемыми параметрами при таком способе сварки являются температура локального нагрева заготовок, величина области нагрева и его длительность, расстояние от сварочной дуги до области нагрева.

Основная часть

К одной из часто используемых при сварке охлаждающих сред относится вода, при использовании которой достигается высокая скорость охлаждения металла заготовок. Однако в случае использования данного охладителя не обеспечивается равномерное охлаждение поверхности соединяемых деталей, что ведет к возникновению значительных напряжений и деформаций свариваемого металла.

Применение жидкого азота для охлаждения поверхности сварного соединения обеспечивает равномерное охлаждение, которое достигается за счет образования газовой прослойки между металлической поверхностью и жидким азотом, равномерно покрывающей охлаждаемую деталь. При использовании жидкого азота в процессе дуговой сварки охлаждение поверхности соединяемых заготовок происходит с небольшой скоростью, что позволяет предупредить возникновение значительных напряжений и деформаций в свариваемом металле. Однако низкая скорость охлаждения не обеспечивает получение высоких механических свойств сварного соединения при сварке сталей с аустенитной структурой.

Значительный потенциал по повышению эффективности технологического процесса сварки заключается в использовании новых сварочных материалов, например, твердого диоксида углерода [7, 8]. Этот сварочный материал при использовании его в качестве

охлаждителя при дуговой сварке имеет следующие преимущества по сравнению с другими охлаждающими средами:

- низкую рабочую температуру, которую он сохраняет в течение времени сварки;
- отсутствие жидкой фазы, которую необходимо удалять из зоны сварки по мере использования;
- высокую интенсивность охлаждения поверхности соединяемых заготовок и т.д.

В данной работе была оценена возможность снижения величины остаточных сварочных напряжений и деформаций в результате применения комбинации нескольких способов сварки, в частности, дуговой сварки с охлаждением высокотемпературной области сварного соединения и сварки с термическим растяжением металла заготовок. Оценка состояла в установлении посредством численного моделирования способности при помощи дуговой сварки с охлаждением сформировать перемещающееся температурное поле требуемых параметров. В частности, сформировать температурное поле, при котором обеспечиваются необходимые условия для реализации метода термического растяжения свариваемых тонколистовых заготовок.

В ходе исследований были рассмотрены процессы передачи тепла от движущейся сварочной дуги к соединяемым заготовкам и в окружающую среду. Данные процессы имели место при выполнении стыкового соединения тонколистовых заготовок из нержавеющей хромоникелевой аустенитной стали 12Х18Н10Т толщиной 3 мм. Стыковое соединение было выполнено при помощи однопроводной дуговой сварки в среде аргона с охлаждением поверхности металла сварного соединения твердым диоксидом углерода.

Для моделирования тепловых процессов при сварке тонколистовых заготовок достаточно часто используются двумерные модели, например, модель поперечного сечения, в которой тепловой поток в направлении сварки принимается равным нулю. Достоинством таких моделей является их относительная простота, которая позволяет уменьшить длительность вычислений в десятки раз по сравнению с трехмерными моделями. Так как тепловой поток при сварке тонколистовых заготовок в направлении движения источника тепла при сварке незначителен, то использование двухмерных моделей способно обеспечить достаточно высокую точность вычислений. Кроме того, уменьшение погрешности вычислений при использова-

нии двумерной модели в процессе расчетов процессов передачи тепла достигается использованием при дуговой сварке материалов с низкой теплопроводностью, в частности нержавеющей хромоникелевых сталей с аустенитной структурой, имеющих теплопроводность, в 4 раза меньшую по сравнению с углеродистыми сталями.

При моделировании термических процессов дуговой сварки тонколистовых заготовок были выполнены следующие операции:

- определены зависимости теплофизических свойств материала заготовок от температуры;
- разработана модель передачи тепла от движущегося источника тепла к заготовкам с подачей охлаждающего агента в зону сварки;
- заданы начальные и граничные условия расчетной модели;
- разработана конечно-разностная схема расчетов для вычисления температуры нагрева металла соединяемых заготовок в процессе дуговой сварки;
- были определены значения температуры нагрева металла заготовок в различные моменты времени дуговой сварки.

Для определения температуры различных точек соединяемых заготовок в процессе дуговой сварки была применена модель источника тепла, в котором плотность теплового потока была распределена по закону Гаусса. Источник тепла имел форму двойного эллипсоида, использование источника такой формы позволило учесть разность градиентов температур различных областей движущегося источника тепла и не использовать чрезмерно мелкую пространственную сетку при разбиении анализируемой области на элементарные ячейки.

Значения температур точек соединяемых заготовок в различные моменты времени были определены в результате решения дифференциального уравнения теплопроводности:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \partial \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) / \partial x + \partial \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) / \partial y + \partial \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) / \partial z + Q,$$

где ρ – плотность материала, кг/м³; c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С); T – температура, °С; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); Q – входящий тепловой поток, Вт/м³.

Для численного решения этого уравнения был использован метод конечных разностей [9], который имеет высокую эффектив-

ность при выполнении расчетов для тел простой формы, например, шара, куба, пластины и т.п.

При моделировании тепловых процессов при сварке стыкового соединения для определения значений температуры точек соединяемых образцов анализируемая область была разделена на элементарные ячейки с помощью пространственных сеток. При дискретизации дифференциального уравнения теплопроводности была использована пространственная сетка с разбиением координатных осей на элементарные отрезки h по соответствующим координатам x , y , z , а также временная сетка с разбиением времени нагрева t на элементарные промежутки τ .

При задании начальных и граничных условий в дифференциальном уравнении теплопроводности было принято, что боковые поверхности заготовок изолированы от теплообмена с окружающей средой. Передача теплоты с верхней и нижней поверхности заготовок в окружающую среду происходит за счет излучения и конвекции. Чтобы учесть потери тепла с поверхности заготовок в окружающую среду данные поверхности были заданы в виде границ, поглощающие тепло.

Теплообмен с окружающей средой на нижней поверхности заготовок был задан при помощи следующего уравнения:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_s \cdot (T - T_c),$$

где α_s – коэффициент поверхностной теплоотдачи материала образцов, Вт/м²; T – температура нагрева поверхности образцов, °С; T_c – температура окружающей среды ($T_c = 20$ °С), °С.

Условие ограниченности свариваемых образцов было задано при помощи следующего уравнения (для бесконечно малых приращений пространственной координаты x):

$$\lim \lambda \cdot x^2 \cdot \partial T / \partial x = 0.$$

Теплообмен с окружающей средой на верхней поверхности заготовок был задан при помощи следующего уравнения:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_s \cdot (T - T_c) + \beta \sigma (T^4 - T_c^4),$$

где β – коэффициент теплообмена излучением материала образцов; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²·°С⁴.

В процессе решения дифференциального уравнения частные производные температуры по времени и координатам были заменены конечно-разностными аппроксимациями. В результате замены дифференциальное уравнение теплопроводности было представлено системой одномерных уравнений в соответствии с неявной четырехточечной схемой [10]. Данная система одномерных уравнений была решена на каждом временном шаге методом прогонки.

Одномерные уравнения были приведены к виду:

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

где

$$A_i = C_i = \lambda/h^2, B_i = 2\lambda/h^2 + \alpha_s/h + \rho c/\tau,$$

$$D_i = -\rho c T_i^n / \tau - \alpha_s T_c / h - \varepsilon \sigma ((T_i^n)^4 - T_c^4) / h + Q.$$

Прогоночные коэффициенты α и β были определены из граничных условий.

Распределение температуры нагрева металла соединяемых заготовок в зависимости от продольной координаты, определенное в процессе моделирования тепловых процессов дуговой сварки с охлаждением, приведено на рисунке 1. Данное распределение температуры представлено в виде линий уровня.

Приведенные результаты свидетельствуют о формировании в соединяемых образцах в процессе дуговой сварки с охлаждением твердым диоксидом углерода температурных полей, которые представляют собой комбинацию симметричных относительно оси сварного шва областей повышенных и пониженных температур. Как показали расчеты, данные температурные поля перемещаются вместе с источником тепла при выполнении стыкового соединения и обеспечивают условия для осуществления термического растяжения металла соединяемых тонколистовых заготовок.

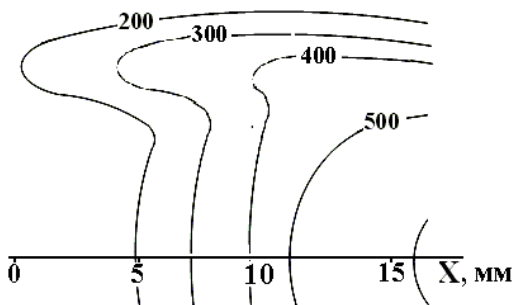


Рисунок 1 – Распределение температуры нагрева поверхности заготовок

Заключение

В данной работе была проведена оценка возможности использования комбинированных способов сварки – сварки с принудительным охлаждением области высокотемпературного нагрева металла и сварки с термическим растяжением металла заготовок – с целью уменьшения величины остаточных сварочных напряжений и деформаций собираемых конструкций. Оценка была выполнена посредством численного моделирования тепловых процессов, протекающих в ходе изготовления сварного соединения при помощи дуговой сварки заготовок малой толщины из нержавеющей хромоникелевой аустенитной стали. При численном моделировании была использована схема однопроводной дуговой сварки в среде аргона с охлаждением высокотемпературной области стыкового сварного соединения. В качестве охлаждающей среды был использован твердый диоксид углерода, который подавался на поверхность сварного соединения на некотором расстоянии от движущегося источника тепла.

В результате проведенных вычислений с использованием метода конечных разностей было решено дифференциальное уравнение теплопроводности и были определены значения температуры точек соединяемых образцов в различные моменты времени в процессе дуговой сварки. Полученные данные подтвердили предположение о формировании при дуговой сварке с охлаждением посредством

твердого диоксида углерода температурных полей, форма и взаимное расположение которых создает необходимые условия для реализации метода термического растяжения металла свариваемых заготовок малой толщины.

Список литературы

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. **Цяо, Г.** Бездеформационная сварка с использованием эффектов термического растяжения для соединения материалов малой толщины / Г. Цяо // Автоматическая сварка. – 2006. – № 12. – С. 3–13.
6. **Feng, Z.** Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion / Z. Feng – Woodhead Publishers, 2005. – 343 p.
7. **Parmar, K.S.** Welding engineering and Technology / K.S. Parmar – Khanna Publishers, 2005. – 270 p.
8. **Пантелеенко, Ф.И.** Снижение поверхностных деформаций путем термической обработки в процессе стыковой сварки / Ф.И. Пантелеенко, А. Хейдари Монфаред // Вестник ПГУ – Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 19–26.
9. **Вержбицкий, В.М.** Основы численных методов / В.М. Вержбицкий. – М.: Высшая школа, 2002. – 840 с.
10. **Самарский, А.А.** Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 656 с.