

УДК 669.7:624.01

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ 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)*

*Анализируются подходы по улучшению механических свойств сварных соединений, в частности повышению их прочности. Предлагается повысить механические свойства сварных соединений за счет ограничения зоны высокотемпературного нагрева путем использования при дуговой сварке твердого диоксида углерода в качестве охладителя. Выполнено математическое моделирование дуговой сварки стыковых соединений с использованием несимметричной трехмерной модели источника тепла, в которой распределение потока тепла в области двойного эллипсоида происходит по закону Гаусса. Определено температурное поле деталей. Моделирование показало уменьшение площади зоны высокотемпературного нагрева в ходе дуговой сварки с использованием твердого диоксида углерода как охладителя. Определены значения прочности сварных соединений из аустенитной стали при различных условиях охлаждения. Установлено, что при использовании твердого диоксида углерода наблюдается увеличение прочности сварных соединений по сравнению со сваркой в обычных условиях.*

**Ключевые слова:** дуговая сварка, сварное соединение, моделирование сварки, механические свойства, повышение прочности.

**Введение.** При производстве ответственных оболочковых конструкций в энергетическом и химическом машиностроении и т.п. широко используют коррозионностойкие стали аустенитного класса, которые допускают работу в широком интервале температур при агрессивном воздействии среды. Одним из наиболее технологичных способов получения неразъемных соединений при производстве оболочковых конструкций является дуговая сварка [1].

При изготовлении конструкций из аустенитных сталей при помощи дуговой сварки возникает немало сложностей, значительная часть которых связана с физико-механическими свойствами данных сталей. В частности, с низкой теплопроводностью аустенитных сталей связаны увеличение температуры перегрева металла и рост площади металла, находящегося при повышенных температурах. Этим свойством, а также высоким коэффициентом температурного расширения объясняется образование значительных по величине остаточных напряжений и деформаций при сварке таких сталей, влияющих на внешний вид и срок службы изделия [2]. Кроме того, за счет перегрева металла может возникать химическая неоднородность, а также может происходить образование хрупких прослоек пересыщенных фаз в сварном шве, служащих концентраторами напряжений и вызывающих ухудшение прочностных характеристик сварных швов и снижение надежности всей конструкции в целом [3].

Так как при снижении степени перегрева металла обеспечивается ограничение площади и времени пребывания металла при повышенных температурах, то одним из эффективных направлений предотвращения возникновения при сварке нежелательных деформаций и значительных напряжений, а также повышения механических свойств сварных соединений является применение принудительного охлаждения высокотемпературной области металла [4]. В этой связи выбор вида охлаждающей среды имеет особое значение, поскольку среда в значительной степени определяет режимы нагрева и охлаждения при дуговой сварке.

Распространенным охладителем при сварке является вода, она доступна, нетоксична, обладает высокой охлаждающей способностью, однако имеет ряд недостатков, которые связаны с изменением ее агрегатного состояния при использовании. Процесс отвода тепла в случае применения воды включает три стадии (пленочное кипение, пузырьковое кипение, конвективный теплообмен), каждая из которых характеризуется скоростью охлаждения, отличной от других стадий. Неодновременное формирование одинаковых стадий теплоотвода в различных участках поверхности охлаждаемой детали обуславливает разброс величин скоростей охлаждения и неравномерность распределения температур отдельных областей поверхности, возникновение значительных напряжений и деформаций в металле, а также ухудшение механических и технологических свойств сварных соединений [3].

Более равномерное охлаждение, протекающее практически в одну стадию, обеспечивается при использовании в качестве охладителя жидкого азота. Данный эффект достигается за счет газовой пленки, легко образующейся при нагреве жидкого азота и покрывающей охлаждаемую поверхность. Теплота

парообразования жидкого азота составляет 197,6 кДж/кг, что в несколько раз меньше аналогичного показателя для воды, поэтому при использовании жидкого азота имеет место не только равномерное, но и медленное охлаждение, исключающее возникновение значительных напряжений и деформаций при сварке [5]. Вместе с тем низкая охлаждающая способность жидкого азота не способна обеспечить достаточные скорости охлаждения и высокие механические свойства сварных соединений из аустенитной стали.

**Методика эксперимента.** Показатели прочности и ударной вязкости определяли в ходе испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ 6996. При этом определяли величину временного сопротивления  $\sigma_b$ , значение удельной вязкости разрушения KCV.

Для испытаний на прочность при растяжении использовали стандартные плоские образцы с ослабленным сечением в области сварного шва. Образцы были вырезаны в соответствии с размерами образца типа XXIV [6] из сваренных встык пластин из аустенитной стали 12X18H10T толщиной 4 мм. Выпуклость сварного шва на образцах удалялась до основного металла. Таким образом, толщина образца равнялась толщине основного металла и составляла 4 мм, радиус закругления канавок – 6 мм, минимальная ширина образца – 6 мм. Растяжение в процессе испытаний проводили на разрывной машине АЛАТОО со скоростью 2 мм/мин с фиксацией диаграммы «нагрузка – деформация».

Для испытаний на ударную вязкость изготавливались образцы размерами 55×8×4 мм с выполненным поперек основного металла V-образным надрезом глубиной 2 мм, угол раскрытия которого составлял 45°, а радиус при вершине – 0,25 мм. Поверхность основного металла образцов не обрабатывалась.

**Результаты и их обсуждение.** В последнее время для охлаждения тонкостенных сложных конструкций используются водные растворы органических веществ со свойством обратной растворимости. Относящиеся к таким средам раствор полиэтиленгликоля, двухкомпонентный раствор полиэтиленоксида и алкилфенола, другие подобные им растворы по охлаждающей способности значительно превосходят воду, позволяют в широком интервале варьировать скорость охлаждения нагретой детали, имеют удовлетворительную равномерность отвода тепла [5]. Вместе с тем использование данных охладителей значительно повышают себестоимость сварочных работ, существенно ухудшает условия работы сварщика.

Большие возможности совершенствования технологии сварки открываются при использовании новых эффективных сварочных материалов, к которым относится твердый диоксид углерода. Можно выделить следующие основные достоинства данного сварочного материала:

- низкую температуру, которую материал сохраняет в течение всего времени использования;
- способность переходить без образования жидкой фазы из твердого состояния в газообразное;
- высокую охлаждающую способность, которая в несколько раз превосходит аналогичный показатель для водяного льда.

Проведенные исследования показали, что использование твердого диоксида углерода при дуговой сварке создает условия для интенсивного образования в области горения дуги смеси углекислого газа и оксида углерода. При наличии такой газовой смеси обеспечивается стабильное мягкое горение дуги, уменьшается разбрызгивание расплавленного металла, исчезает чешуйчатость поверхности сварного шва [7].

В представленной работе исследовано влияние условий охлаждения при дуговой сварке в среде аргона образцов из аустенитной стали на физико-механические свойства металла сварных швов, а именно на прочность и ударную вязкость. Для определения температурного поля свариваемых деталей проведено математическое моделирование процесса дуговой сварки как в обычных условиях, так и с охлаждением высокотемпературной области сварного шва твердым диоксидом углерода. При этом использовалась схема дуговой сварки, при которой охлаждающая среда подавалась на уже сформированные участки сварного шва на некотором расстоянии позади от перемещающейся сварочной дуги.

Значения температур в различных точках свариваемых деталей в зависимости от времени сварки определялись путем решения дифференциального уравнения теплопроводности следующего вида:

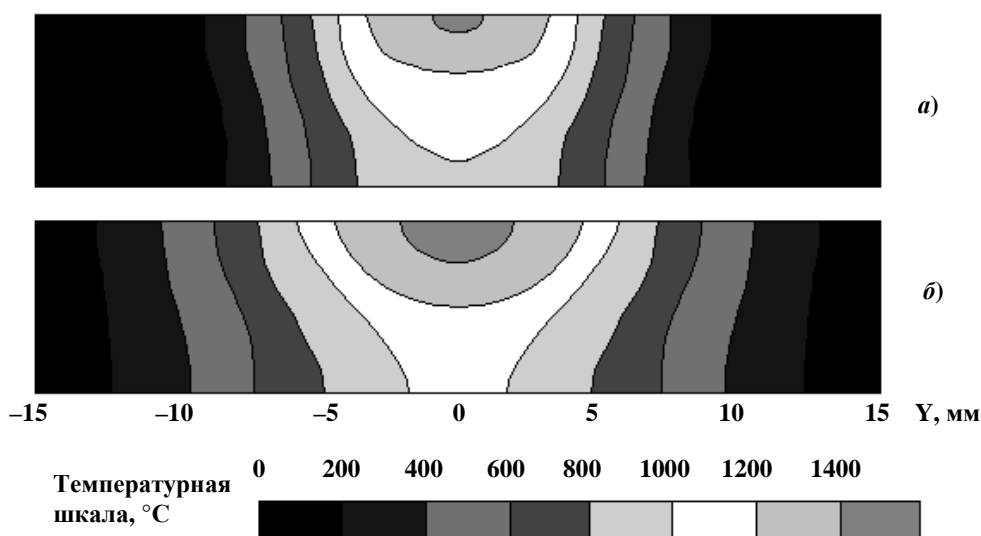
$$\rho \cdot C_p \cdot \partial T / \partial t = \partial (\lambda \cdot \partial T / \partial x) / \partial x + \partial (\lambda \cdot \partial T / \partial y) / \partial y + \partial (\lambda \cdot \partial T / \partial z) / \partial z + Q,$$

где  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – удельная теплоемкость, Дж/кг·°C;  $T$  – температура, °C;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/м·°C;  $Q$  – входящий тепловой поток, Вт/м<sup>3</sup>.

Дифференциальное уравнение в частных производных решали численным методом конечных элементов способом Ньютона – Рафсона [8; 9]. При определении температурного поля деталей от действия сварочной дуги при дуговой сварке использовалась модель источника тепла в форме двойного эллипсоида, в котором плотность теплового потока была распределена по закону Гаусса. Такой вид модели позволяет повысить точность расчетов за счет учета различных градиентов температур движущегося источника тепла, а также сократить количество и время вычислений [10].

В результате математического моделирования получены температурные поля (или значения температур) в свариваемых деталях в зависимости от времени и расстояния до сварочной дуги для различ-

ных условий сварки. Значения температур в поперечном сечении сварного шва в зависимости от расстояния до сварочной дуги отображены на рисунке.



*a* – с охлаждением твердым диоксидом углерода; *б* – без охлаждения

**Значения температур в зависимости от расстояния (*Y*) от сварочной дуги в поперечном сечении сварного соединения, выполненного дуговой сваркой**

Из приведенных данных видно, что при использовании для охлаждения свариваемых деталей твердого диоксида углерода площадь нагретого до высоких температур металла сокращается в 1,45 раза. Результаты моделирования температурного поля свариваемых деталей коррелируют с результатами макроанализа поверхности шлифов сварных соединений, по которым можно судить, что при использовании охлаждения твердым диоксидом углерода зона термического влияния в них уменьшается в среднем в 1,5 раза по сравнению со сваркой без охлаждения. Данные о механических свойствах сварных соединений, полученных дуговой сваркой в среде аргона как в обычных условиях, так и в условиях охлаждения высокотемпературной области сварного шва твердым диоксидом углерода, приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Механические свойства сварных соединений

Показатель	Условия охлаждения	
	Без охлаждения	Охлаждение твердым диоксидом углерода
Прочность ( $\sigma_B$ ), МПа	430	482
Ударная вязкость (KCV), Дж/см <sup>2</sup>	234	273

Результаты испытаний на прочность и ударную вязкость сварных соединений из аустенитной стали свидетельствуют о следующем:

- прочность и вязкость сварных соединений, полученных дуговой сваркой без охлаждения, являются самыми низкими;
- прочность и вязкость сварных соединений, полученных дуговой сваркой с охлаждением диоксидом углерода, в 1,12 и 1,17 раза выше прочности и вязкости соответственно сварных соединений, полученных дуговой сваркой без охлаждения.

**Закключение.** В результате проведенных исследований установлено, что при дуговой сварке с охлаждением диоксидом углерода обеспечивается сокращение площади зоны нагрева металла соединяемых деталей до высоких температур по сравнению с дуговой сваркой без охлаждения.

Выявлено, что за счет уменьшения тепловложения в свариваемый металл при охлаждении сварного шва твердым диоксидом углерода наблюдается уменьшение ширины зоны термического влияния по сравнению со сваркой без охлаждения. Очевидно, это произошло за счет высокой охлаждающей способности твердого диоксида углерода и равномерного охлаждения нагретой поверхности металла

при его использовании, что позволяет получать высокие скорости охлаждения с равномерным распределением их значений при воздействии на высокотемпературные участки сварного шва.

Определены значения прочности и ударной вязкости сварных соединений из аустенитной стали. Сварные соединения получены дуговой сваркой без охлаждения, а также дуговой сваркой с охлаждением твердым диоксидом углерода. Установлено, что прочность и ударная вязкость сварных соединений с охлаждением твердым диоксидом углерода в 1,12 и в 1,17 раза соответственно больше прочности и ударной вязкости сварных соединений, выполненных без охлаждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
2. Сагалевиц, В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М. Сагалевиц. – М. : Машиностроение, 1974. – 248 с.
3. Куликов, В.П. Технология сварки плавлением / В.П. Куликов. – Минск : Дизайн ПРО, 2001. – 256 с.
4. Цяо, Г. Бездеформационная сварка с использованием эффектов термического растяжения для соединения материалов малой толщины / Г. Цяо // Автоматическая сварка. – 2006. – № 12. – С. 3–13.
5. Металловедение алюминия и его сплавов / А.И. Беляев [и др.]. – М. : Металлургия, 1983. – 280 с.
6. Сварные соединения. Методы определения механических свойств : ГОСТ 6996-66. – Опубл. : офиц. изд. – М. : Стандартинформ, 2005.
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. Федоренко, Р.П. Введение в вычислительную физику / Р.П. Федоренко. – М. : Изд. МФТИ, 1994. – 528 с.
9. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов / В.М. Вержбицкий. – М. : Высш. шк., 2002. – 840 с.
10. Goldak, J.A. Computational Welding Mechanics / J.A. Goldak, M. Akhlaghi. – Springer, 2005. – 321 p.

Поступила 05.07.2017

#### INCREASING STRENGTH OF ARC WELDING JOINTS

*F. PANTELEENKO, A. SHUMAV*

*Some approach to increase the mechanical properties of welding joints, for example strength, has been considered. It has been proposed to increase the mechanical properties by limiting on zone of high temperature heating by the use of hard dioxide carbon as a coolant. It has been accomplished the numerical simulation of arc welding of welding joints to calculate the temperature field of pieces. It has been used non-symmetric three-dimensional model of the heat source. The model had the heat flow distribution in double ellipsoid area as the Gaussian law. Numerical simulation demonstrates the decrement of zone of high temperature heating in the course of arc welding with the use of hard dioxide carbon as a coolant. Strength of welding joints of austenitic steels under different cooling conditions has been defined. It is found that the use of hard dioxide carbon had led to increasing of strength  $e$  in comparison with the strength of welding joints accomplished under usual conditions.*

**Keywords:** *arc welding, welding joint, welding simulation, mechanical properties, increasing strength.*