

УДК 621.791

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВУХДУГОВОЙ ДВУХСТОРОННЕЙ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ (ДДС)

© 2012

**В.П. Сидоров**, доктор технических наук, профессор  
**С.А. Хурин**, инженер

*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

**Ключевые слова:** двухдуговая сварка; математическая модель; провар.

**Аннотация:** предложена математическая модель двухдуговой двухсторонней сварки и изучено влияние соотношения мощностей источников на форму и глубину проплавления при соосном расположении дуг.

### ВВЕДЕНИЕ

Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом обеспечивает высокое качество шва. Недостаток данного способа – низкая проплавливающая способность дуги. Поэтому ГОСТ 14789 предусматривает односторонние стыковые соединения без разделки кромок толщиной до 4 мм и двухсторонние – до 6 мм.

В последнее время появились работы [1,2,3], в которых сварка стыкового соединения в среде аргона ведется двумя дугами с противоположных сторон пластин, которые располагаются в горизонтальной плоскости. Предпосылки, обуславливающие повышение проплавливающей способности в данном случае вполне понятны. Препятствием для внедрения данного способа ранее могли являться технические сложности в создании оборудования, заключающиеся в необходимости вести сварку одной из дуг в потолочном положении и обеспечении синхронизации скорости движения сварочных горелок. Однако с развитием технических средств эти трудности представляются вполне преодолимыми.

Сколь-нибудь подробных исследований такого варианта тандемной сварки не проводилось. Изучение технологических возможностей нового способа только традиционным экспериментальным путем весьма трудоемко. Поэтому в данной работе предполагалось значительную часть исследований выполнить с помощью теоретических расчетов распространения тепла при сварке.

Целью работы являлась формулирование основных рекомендаций по выбору параметров ДДС при соосном расположении дуг на основе создания математической модели процесса.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

За основу была выбрана схема нормально-кругового источника (НКИ), движущегося на поверхности плоского слоя [4], которая качественно наилучшим образом описывает форму сварочных ванн при большинстве способов дуговой сварки [5].

При исследовании процесса ДДС был применен принцип суперпозиций источников тепла и разработана компьютерная программа в среде MathCad. В этом случае для расчета глубины провара оказалось затруднительным применение метода дихотомии (деления толщины пластины пополам) в области, где возможно слияние изотерм и поэтому по координате Z температура плавления определялась перемещением вдоль этой оси с определенным шагом при координатах X, Y. Координате Z одного источника соответствовала координата

$\delta$ -Z второго источника. Координате X первого источника соответствовала координата  $R_1$ -X второго источника, где  $R_1$  – дистанция между источниками. Таким образом, отсчет глубины проплавления (провара) производился от первого источника.

При сравнении эффективности одностороннего и исследуемого способов сварки использовали понятие интегральной скорости сварки J и удельной энергии сварки [5]:

$$J = v_c \cdot h, \tag{1}$$

где h – провар, м;  $v_c$  – скорость движения источника тепла м/с.

$$E = q/J = q/(v_c \cdot h) \tag{2}$$

где q – эффективная мощность сварки, Вт.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На данном этапе изучали вариант с расположением источников на одной оси. Этот случай, хотя и неизбежно слияние изотерм  $\Delta T_1$  при полном проваре, с практической и теоретической точек зрения представляет интерес. Для пластин толщиной 8 мм был получен расчетный режим односторонней сварки с полным проваром ( $q_{нн} = 2860$  Вт,  $v_c = 1,35 \cdot 10^{-3}$  м/с). Плотность осевого теплового потока принималась  $q_0 = 0,42$  Вт/м<sup>2</sup> [6]. Принятой эффективной мощности при ее вольтовом эквиваленте 8 Вт/А соответствует ток дуги  $I_d = 358$  А. При ДДС на скорости  $4 \cdot 10^{-3}$  м/с (два источника такой же мощности) был получен полный провар с длиной ванны в срединной плоскости  $1,5 \cdot 10^{-2}$  м. Провар в передней части сварочной ванны изменяется постепенно, а в хвостовой, изотерма плавления практически вертикальна. На рис. 1 представлена изотерма плавления при  $q_1 = q_2 = 2860$  Вт, скорость  $V = 4 \cdot 10^{-3}$  м/с.

В результате расчетов был получен режим, при котором ванны только соприкасаются друг с другом в одной точке, что имеет место при  $v_c = 5,7 \cdot 10^{-3}$  м/с. Интегральная скорость сварки  $J = 45,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Таким образом, теоретически имеется возможность повышения интегральной скорости сварки до 4-х раз.

Аналогичный расчет был выполнен для толщины 4 мм, для которой экспериментальный табличный режим полного проплавления имеет место при  $q_{нн} = 1430$  Вт и скорости  $v_c = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м/с. В результате соприкосновение двух ванн при тандемной сварке имело место при скорости  $V = 9 \cdot 10^{-3}$  м/с при продольной координате ванны  $X = 7,5 \cdot 10^{-3}$  м. В данном случае интегральная скорость выросла в 3,6 раза.

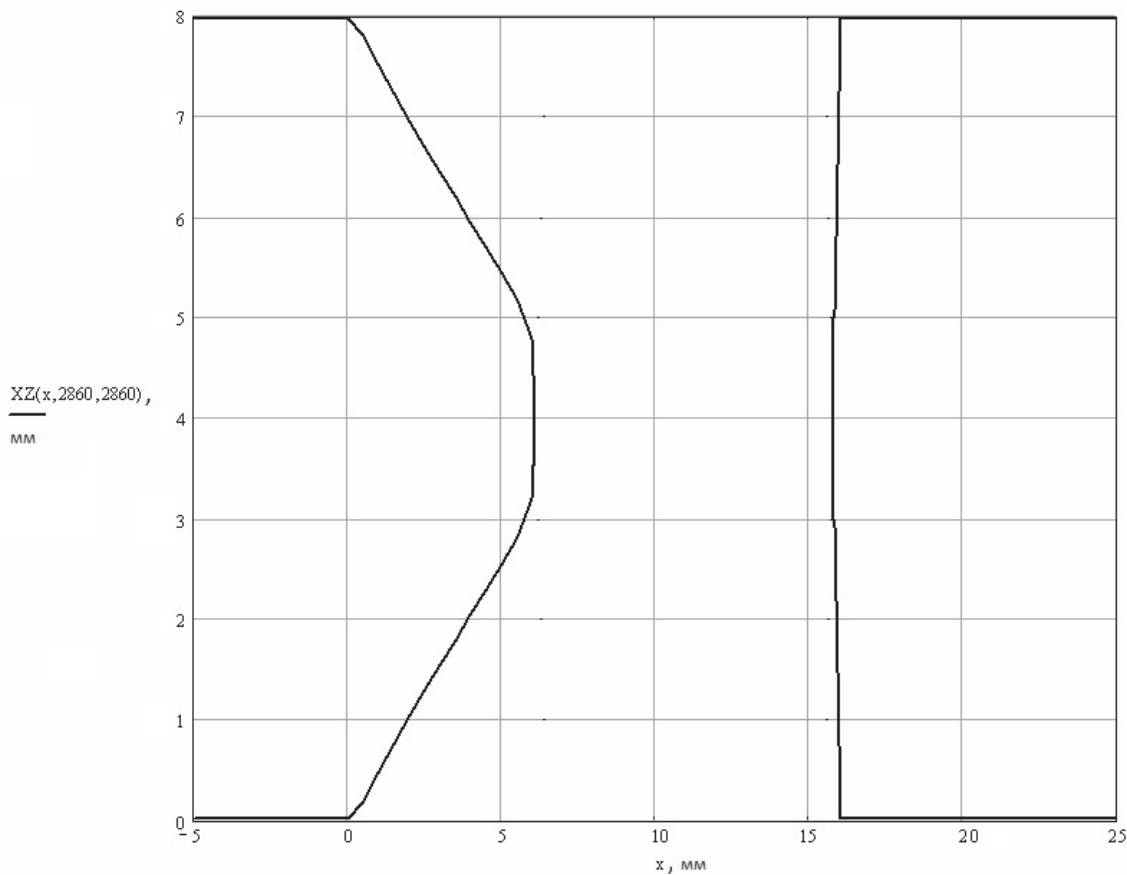


Рис. 1. Продольный профиль расчетной изотермы при температуре плавления:  $\delta = 8$  мм,  $V_c = 4 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $q_1 = q_2 = 2860$  Вт; источник движется в сторону отрицательных X.

Такой же расчет был выполнен для толщины 6 мм, для которой был получен режим полного проплавления на  $q_n = 2260$  Вт и скорости  $V = 2 \cdot 10^{-3}$  м/с. В результате соприкосновение двух ванн при ДДС имело место при скорости  $V_c = 7,3 \cdot 10^{-3}$  м/с при продольной координате ванны  $X = 1 \cdot 10^{-2}$  м. В данном случае интегральная скорость выросла в 3,65 раза. Следовательно, можно утверждать, что при сохранении мощности, полученной при односторонней сварке скорость ДДС можно повысить в 3,5–4 раза.

Действующие вдоль одной оси дуги требуют для обеспечения полного провара слияния сварочных ванн 2-х источников, что может привести к вытеканию сварочной ванны при сварке на весу из-за относительно большой массы. Можно представить и процесс с соосно действующими источниками, но источник, находящийся в потолочном положении должен иметь меньшую мощность и обеспечивать небольшой объем сварочной ванны. В этом случае может сложиться ситуация, что, несмотря на соединение сварочных ванн, силы поверхностного натяжения нижней ванны будут способны удерживать вес двух сварочных ванн. Отдельно следует отметить, что исследований в данной области в литературе найдено не было.

Поэтому было проведено моделирование влияния отношений мощностей теплоисточников на форму провара при постоянстве других условий эксперимента. Эксперименты были проведены при соотношении мощностей теплоисточников равном 1:1, 1:2 и 1:3 при одинаковой их суммарной мощности.

По результатам расчета было выявлено, что соотношением мощностей теплоисточников можно существенно регулировать объем сварочной ванны (рис. 2).

Как видно по расчетным поперечным сечениям максимальных температур плавления, при изменении соотношения мощностей теплоисточников провар снижается: так при соотношении 1:3 провара не наблюдается, а при соотношении 1:2 горловина ванн уменьшилась на 15%.

По расчетным данным были произведены контрольные эксперименты на режимах: ток дуги в нижнем положении 150, 200 и 225 А, ток дуги в потолочном положении 150, 100 и 75 А соответственно. Напряжение на дугах 11,0 В при длине 2 мм. Скорость сварки  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м/с. Образец толщиной 10 мм из стали Ст3 размерами 150×150 мм. В опытах устанавливали постоянную скорость сварки, равные длины дуг, сварочные электроды выставляли соосно с точностью  $\pm 1$  мм. На рис. 3. представлены шлифы с наложением расчетных максимальных температур плавления.

Расчетные и экспериментальные данные отличаются друг от друга менее чем на 10%. Аналогичные эксперименты были проведены на толщинах 12 и 14 мм, качественного отличия по сравнению с толщиной 10 мм не наблюдалось. На рис. 4 в качестве контрольного представлен образец толщиной 12 мм из стали 09Г2С с наложенным расчетным сечением шва. Условия эксперимента: ток дуги в нижнем положении  $I_n = 270$  А, ток потолочной дуги  $I_n = 140$  А (соотношение мощностей 1:2),  $V_c = 1 \cdot 10^{-3}$  м/с, длины дуг выставлялись 2 мм.

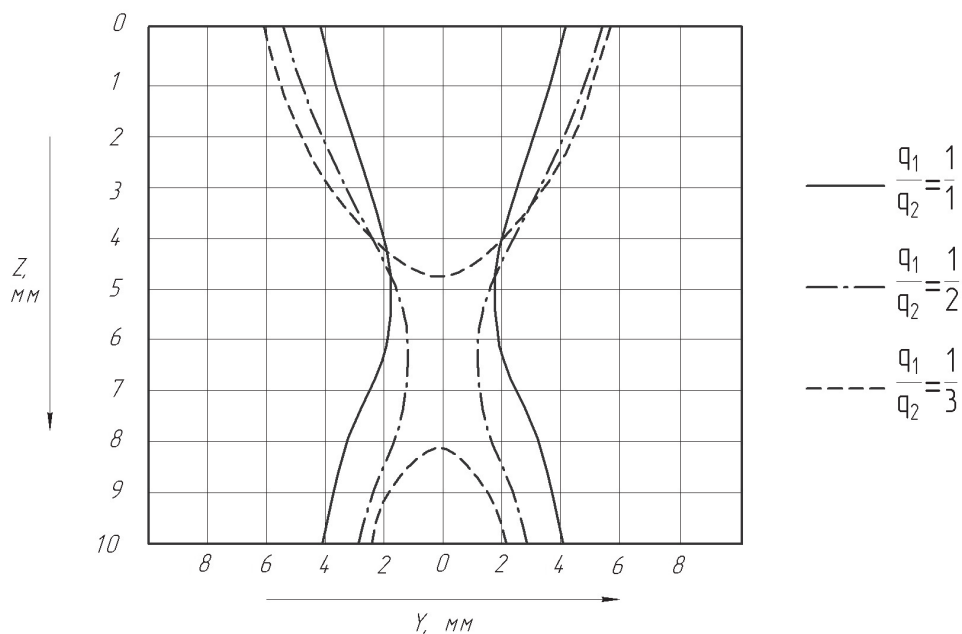


Рис. 2. Влияние соотношения мощностей теплоисточников на форму провара в поперечном сечении.  
 Общая мощность 2400 Вт,  $V_c = 1,5 \cdot 10^{-3}$  см/с,  $\delta = 10$  мм. Материал сталь: Ст3.

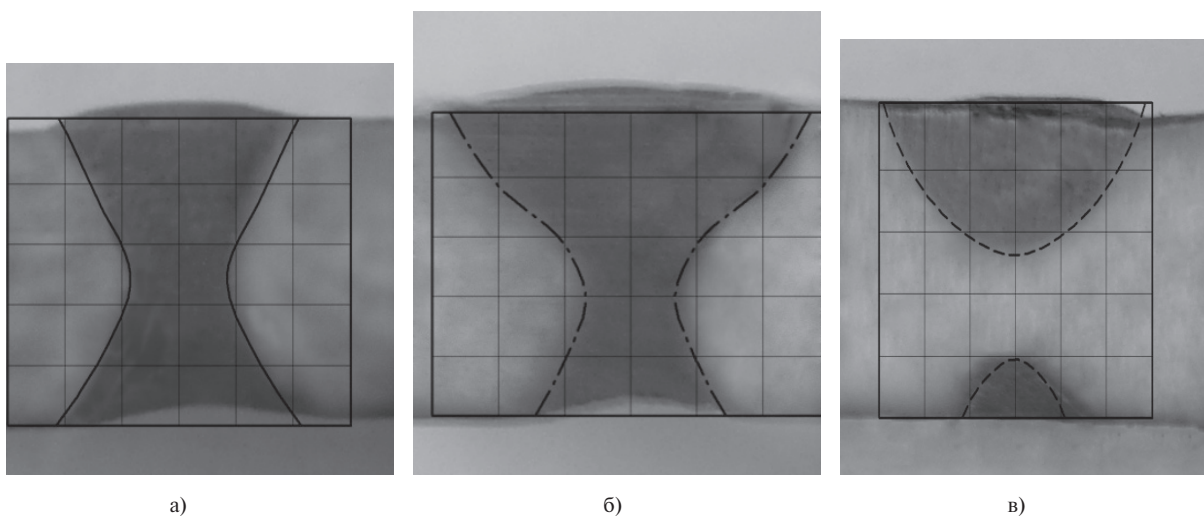


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные поперечные сечения шва при различных соотношениях мощностей теплоисточников:  
 а)  $I_{н1} = I_{н2} = 150$  А; б)  $I_{н1} = 200$  А,  $I_{н2} = 100$  А; в)  $I_{н1} = 225$  А,  $I_{н2} = 75$  А;

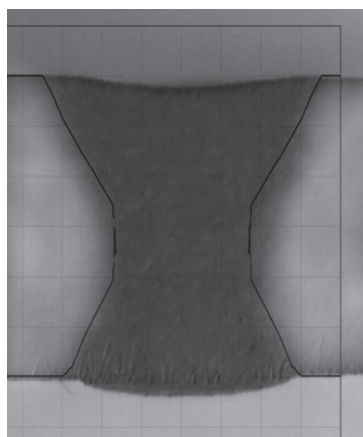


Рис. 4. Шлиф образца 09Г2С,  $\delta = 12$  мм.

**ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

В ходе экспериментов и моделирования было выяснено, что соотношения мощностей теплоисточников менее чем 1:3 мало влияет на глубину проплавления, в то же время существенно влияя на форму провара. Так же было установлено, что соотношение мощностей источников более чем 1:3 приводит к появлению непровара. На основании полученных данных можно сформулировать рекомендацию по выбору соотношения мощностей дуг. При необходимости иметь «узкий» шов в потолочном положении необходимо уменьшить ток потолочной дуги и настолько же увеличить ток дуги, находящейся в нижнем положении. Это свойство двухдуговой двусторонней сварки можно применить для ограничения шейки ванны (место соединения нижней и верхней ванны), что позволит уйти от проблемы вытекания сварочной ванны.

**ВЫВОДЫ**

1. Математическая модель ДДС, построенная на основе модели НКИ на поверхности плоского слоя с использованием принципа суперпозиций температурных полей адекватно описывает форму и размеры шва.
2. При ДДС с соосным расположением сварочных дуг интегральная скорость сварки толщин до 4 мм может быть повышена в 3,5–4 раза, а предельная свариваемая толщина без разделки кромок не менее чем с 4 до 12 мм.
3. При соосном расположении сварочных дуг соотношение их мощностей должно лежать в диапазоне от 1:1

до 1:3, так как при дальнейшем увеличении соотношения увеличивается вероятность появления непровара.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. X.-S. Leng, G.-J. Zhang и L. Wu / Experimental study on improving welding efficiency of twin electrode TIG welding method // Science and Technology of Welding and Joining. – 2006. – № 5.
2. Y. M. Zhang, S. B. Zhang / Keyhole double-sided arc welding process for deep narrow penetration // University of Kentucky. – 2002.
3. Y. M. Zhang, A. T. Male, S. B. Zhang / Metallurgical Characteristics of Double-Sided Arc Welding in High Strength Structural Steels // University of Kentucky. – 2002.
4. Денисов, П.В., Мирлин Г.А. Расчёт температуры нагрева тонколистового металла нормальнораспределённым источником при точечной сварке импульсной дугой // П.В. Денисов, Г.А. Мирлин // Сварочное производство. – 1974. – № 1. – С. 3–6.
5. Сидоров, В.П. Математическое моделирование геометрии шва при сварке конструкционных сплавов и биметаллов / В.П. Сидоров, Д.А Семистенов: Тольятти, ТГУ. 2009. – 175 с.
6. Шоек, П.А. Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона / П.А. Шоек // Современные проблемы теплообмена. – М-Л.: Энергия, 1966. – С. 110–139.

## MATHEMATICAL SIMULATION OF DOUBLEARC DOUBLESIDE TIG WELDING PROCESS (DDTIGW)

© 2012

*V.P. Sidorov*, doctor of technical sciences, professor

*S.A. Hurin*, engineer.

*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

*Keywords:* double-arc welding; mathematical model, penetration.

*Annotation:* Proposed a model of double-arc double-side TIG welding process and investigated influence of the power sources ratio on shape and depth of penetration.