

03;04

Влияние параметров плазмы дуги на форму сварочной ванны

© В.Я. Фролов, А.И. Торопчин

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: eie@spbstu.ru

Поступило в Редакцию 16 февраля 2015 г.

Рассмотрено влияние эффекта Марангони на форму сварочной ванны. Приведены результаты компьютерного моделирования процессов генерирования сварочной дуги с неплавящимся вольфрамовым электродом в защитном газе. Приведены результаты экспериментальных исследований, проведен их сравнительный анализ. Расчеты производились в пакете прикладных программ при различных значениях силы тока.

Дуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в защитном газе широко распространена в современной промышленности. Физическая сущность процесса заключается в ионизации газового промежутка между вольфрамовым электродом и металлической заготовкой с помощью высоковольтного высокочастотного осциллятора и последующей передачи тепла от электрической дуги заготовке. В зависимости от свариваемого материала существует возможность вести процесс на постоянном токе прямой полярности или на переменном токе. В данной статье рассматривается нагрев электрической дугой стальной детали, поэтому используется прямая полярность, когда неплавящийся вольфрамовый электрод выступает в роли катода, а заготовка — в роли анода для обеспечения большего проплавления заготовки и меньшего нагрева вольфрамового электрода. При самых распространенных в индустрии рабочих режимах сварки по току до 300 А около 70% тепла выделяется на аноде и 30% на катоде. В зависимости от режима сварки температура плазменной дуги составляет от 12 000 до 23 000 К, что является достаточным для образования сварного шва, защищенного от влияния окружающей среды потоком инертного газа (аргон, гелий или смесь аргона с гелием).

С целью оптимизации сварочного процесса, а также в помощь технологическим службам и лабораториям сварки разработаны и по-

стоянно совершенствуются компьютерные модели плазменной дуги и модели поведения сварочной ванны. Имея возможность прогнозировать глубину проплавления свариваемого металла и форму сварочной ванны в зависимости от геометрии сварочной горелки, рода газа, полярности и силы тока, можно предсказать процесс формирования сварного шва, уменьшить сварочные деформации, рассчитать и оптимизировать расход сварочных материалов и защитных газов. В данной статье демонстрируются результаты решения совместной задачи генерирования дуги и ее влияния на заготовку.

Стационарная двухмерная модель процесса сварки была рассчитана с помощью программного пакета ANSYS CFX. В программе учтены уравнения баланса энергии, неразрывности, движения и система уравнений Максвелла, а также силы, действующие на сварочную ванну [1,2]:

- эффект Марангони, возникающий вследствие наличия градиента поверхностного натяжения;
- сила Архимеда, возникающая вследствие разницы плотностей;
- сила, возникающая под действием давления дуги;
- электромагнитная сила, возникающая вследствие магнитного поля и электрического тока.

Особенную важность представляет учет эффекта Марангони, влияющего на форму сварочной ванны и на движение расплавленного металла внутри нее. Он заключается в переносе вещества вдоль границы раздела двух жидкостей, который происходит из-за наличия поверхностного натяжения. Чем больше значение поверхностного натяжения жидкости, тем с большей силой она стягивается. Таким образом, жидкость перемещается в область с большим коэффициентом поверхностного натяжения [3–5].

Влияние эффекта Марангони учитывается с помощью следующего уравнения:

$$M_A = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где γ — поверхностное натяжение расплавленной детали, T — температура заготовки [1].

Характер зависимости значения поверхностного натяжения от температуры нагреваемой детали определяет как профиль сварочной ванны, так и направление движения расплавленного металла в ванне. При падающем характере указанной выше зависимости форма сварочной

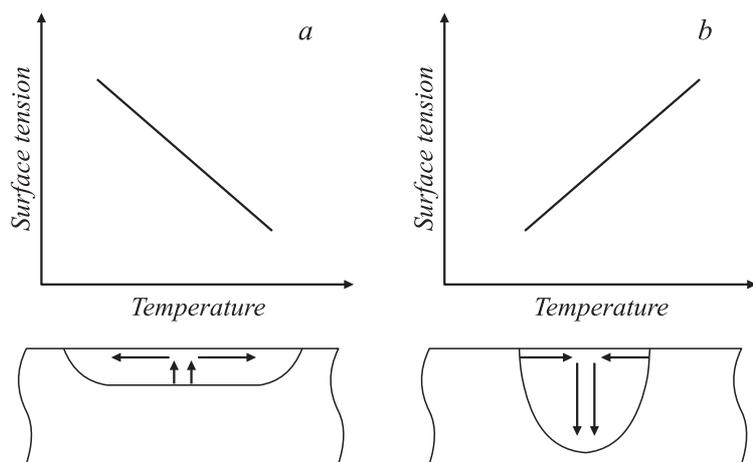


Рис. 1. Вариации профиля сварочной ванны и движения расплавленного металла при падающей зависимости значения поверхностного натяжения (Surface Tension) от температуры (Temperature) нагреваемой детали (a) и возрастающей (b).

ванны, а также направление движения будут соответствовать рис. 1, a, при возрастающем — рис. 1, b [4].

Для компьютерного моделирования процесса сварки были приняты следующие параметры: сила сварочного тока 200 А, расстояние между электродом и заготовкой 10 мм, диаметр вольфрамового катода 3.2 мм, диаметр керамического сопла 11 мм, вылет вольфрамового электрода 3.5 мм, расход инертного защитного газа (аргона) 15 l/min, в качестве анода — деталь из стали марки S235 с падающим характером зависимости поверхностного натяжения от температуры и толщиной 10 мм.

На рис. 2 представлен результат компьютерного моделирования дуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в защитном газе при силе тока 200 А. Ширина сварочной ванны составила 10 мм при глубине проплавления 1.4 мм. Также рис. 2 демонстрирует форму сварочной ванны с учетом расчета в модели уравнения для эффекта Марангони (I) и без его учета (II) [6]. Очевидно, что включение в модель эффекта Марангони с различным (для каждой марки сварив-

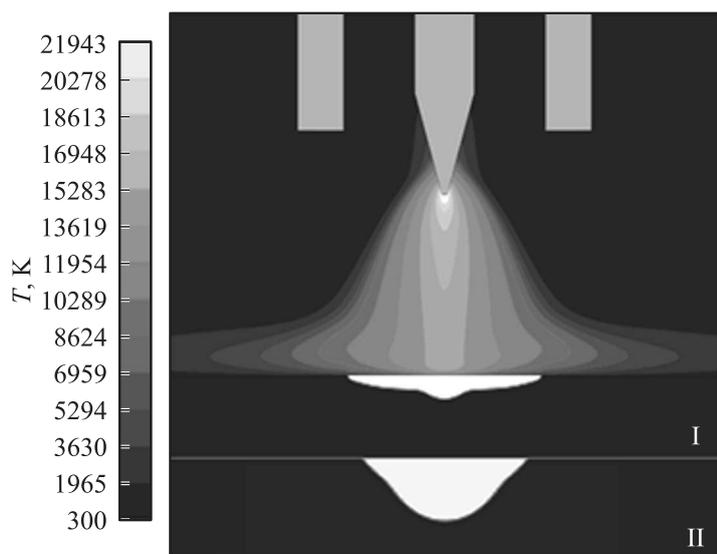


Рис. 2. Профиль сварочной ванны и распределение температуры сварочной дуги при токе 200 А. Белая зона в детали показывает профиль сварочной ванны. I — форма сварочной ванны с учетом расчета в модели уравнения для эффекта Марангони, II — без его учета, T — температурная шкала.

ваемого материала) поверхностным натяжением позволяет корректно рассчитывать параметры сварочной ванны.

С целью подтверждения адекватности полученных в ходе расчетов результатов была разработана следующая методика проведения эксперимента: источник тока подсоединен к сварочной горелке, представляющей керамическое сопло и вольфрамовый электрод. Поджиг плазменной дуги производится с помощью осциллятора. Ток измеряется датчиком на основе эффекта Холла. Напряжение снимается с держателя электрода. Сигналы, такие как ток и напряжение, записываются осциллографом. Анодом служит низколегированная сталь марки S235 толщиной 10 мм. В качестве защитного газа используется аргон особой чистоты. Спектроскопическая диагностика температуры плазмы осуществлялась по измерениям абсолютных интенсивностей [7–9] спектральной линии аргона 696.54 nm в трех участках дуги (1 mm ниже катода, середи-

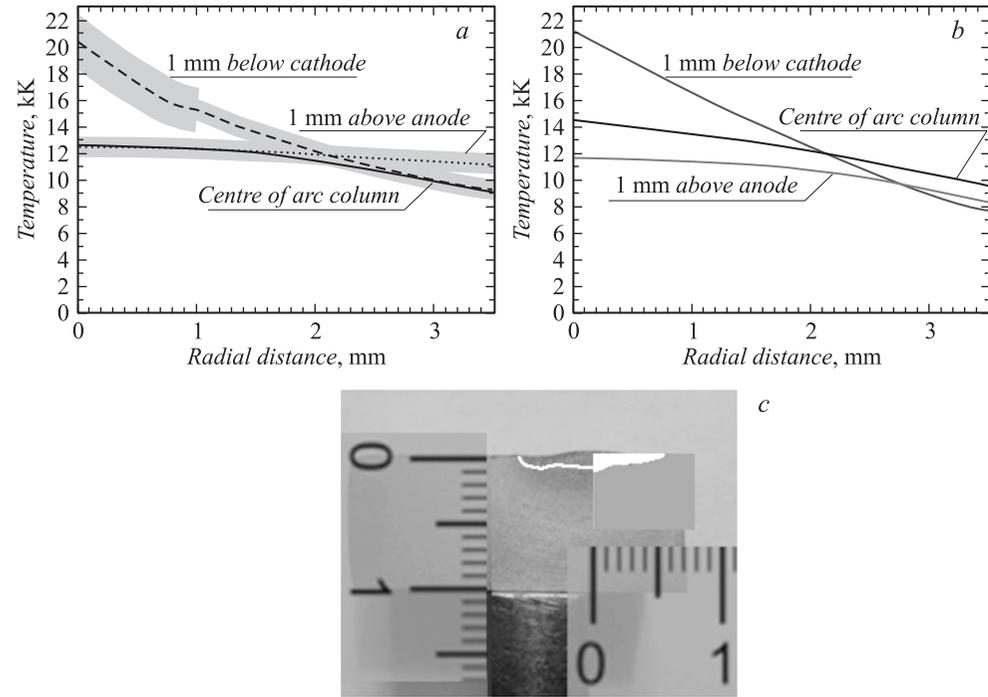


Рис. 3. Сравнение экспериментальных (а) и рассчитанных в ANSYS CFX (b) значений температуры плазменной дуги и макрошлифа нагретой сварочной дугой заготовки и профиля, полученного в ANSYS CFX (c), при расстоянии между катодом и анодом 10 mm сила тока 200 A. Centre of arc column — центр сварочной дуги; 1 mm below cathode — 1 mm ниже катода; 1 mm above anode — 1 mm выше анода.

на дуги и 1 mm выше анода). Экспериментальные и рассчитанные в программном пакете ANSYS CFX значения температуры в трех участках сварочной дуги приведены на рис. 3, *a* и *b*. Нагрев образцов производился в течение 10 s. По результатам экспериментов сделан макрошлиф нагретой сварочной дугой заготовки, представленный на рис. 3, *c*.

Компьютерная модель дуги и сварочной ванны адекватно отражает реальный процесс сварки, что доказывают результаты, полученные после обработки данных спектроскопической диагностики и производства макрошлифов. В ходе исследований также были проведены опыты с различной геометрией сварочной горелки и разными значениями силы тока, смоделирован ряд задач, варьируя параметры в программном пакете ANSYS CFX. Полученные результаты согласуются с теорией, представленной в данной статье.

Незначительные различия в результатах расчетов и экспериментов и погрешность результатов спектроскопической диагностики температуры плазмы связаны с асимметрией реальной дуги и последующей обработкой результатов (преобразование Абеля), а также с допущениями в компьютерной модели: отсутствием испарения металла; ламинарностью плазменного потока; отсутствием движения поверхности сварочной ванны.

На следующих этапах работы необходимо включить в разрабатываемую модель вышеуказанные эффекты, имеющие влияние на параметры сварочной дуги и ванны.

Список литературы

- [1] Фролов В.Я., Васильев Е.О., Сосо И. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. В. 2(78). С. 119–125.
- [2] Фролов В.Я., Иванов Д.В., Грачев С.Ю., Васильев Е.О., Сосо И. // Труды 9-й Международной конференции „Пленки и покрытия–2009“. СПб., 2009. С. 288–297.
- [3] Tanaka M., Lowke J.J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. R1–R23.
- [4] Tanaka K., Yamamoto K., Lowke J.J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. P. 434009 (11 p).
- [5] Mougnot J., Gonzalez J.-J., Freton P., Masqu`ere M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 46. P. 135 206 (14 p).

-
- [6] *Toropchin A., Frolov V., Uhrlandt D.* // Proc. XX Symposium on Physics of Switching Arc. Eds. V. Aubrecht, M. Bartlova. Brno, 2013. P. 301–304.
- [7] *Olsen H.N.* // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1963. V. 3. P. 305–333.
- [8] *Haddad G.N., Farmer A.J.D.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1984. V. 17. P. 1189–1196.
- [9] *Wilhelm G., Kozakov R., Gött G., Schöpp H., Uhrlandt D.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. P. 085 202 (11 p.).