



## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ТИГ И А-ТИГ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Д. В. КОВАЛЕНКО, инж., чл.-кор. НАН Украины И. В. КРИВЦУН, В. Ф. ДЕМЧЕНКО, д-р техн. наук, И. В. КОВАЛЕНКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На основе расчетных и экспериментальных данных проведен анализ распределения температуры на поверхности сварочной ванны при сварке ТИГ и А-ТИГ стационарной и подвижной дугой нержавеющей стали. Показано, что при сварке ТИГ и А-ТИГ распределение температуры поверхности сварочной ванны выше температуры кипения имеет характерную площадку, размеры которой соизмеримы с размерами анодного пятна дуги. При этом максимальная температура и размеры этой площадки меньше при сварке А-ТИГ. Обсуждены проблемы математического описания и моделирования конвекции Марангони при сварке А-ТИГ, развивающейся по термокапиллярным и концентрационно-капиллярным механизмам. В сварочной ванне могут образовываться два циркуляционных потока, в результате взаимодействия которых возникает течение расплава, направленное вглубь сварочной ванны.

*Ключевые слова:* сварка ТИГ и А-ТИГ, нержавеющая сталь, стационарная и движущаяся дуга, температура поверхности сварочной ванны, капиллярная конвекция Марангони, силовые факторы, проплавление, эксперимент, математическое моделирование

В предыдущих работах авторов [1, 2] рассмотрены феноменологическая модель существования и взаимодействия системы ТИГ/А-ТИГ дуга — сварочная ванна, а также возможность существования квазипарогазового канала при сварке А-ТИГ. На основе анализа экспериментальных данных и теоретических оценок рассмотрены особенности влияния на формирование сварочной ванны и шва тепловых, массообменных, электромагнитных, гидро- и газодинамических процессов, протекающих в столбе дуги и сварочной ванне при сварке А-ТИГ поверхностной неподвижной и движущейся дугой. Показано существенное принципиальное отличие в формировании швов, полученных сваркой ТИГ и А-ТИГ движущейся и неподвижной дугами, которое заключается в том, что при сварке подвижной дугой процессы плавления и кристаллизации металла шва происходят одновременно, а при точечной сварке разделены во времени. При этом при формировании точечного шва, полученного сваркой А-ТИГ, вследствие последующих усадочных явлений образуется характерный глубокий кратер с усилением по периферии сварного шва. При сварке А-ТИГ также возможно принципиально иное, чем при сварке ТИГ, формирование потоков плазмы столба дуги с обтеканием поверхности сварочной ванны от периферии к центру, что способствует переносу перегретого металла ко дну ванны и образованию узких и глубоких швов.

В работе [3] была предложена сопряженная математическая модель тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов в сварном изделии при стационарной (точечной) сварке ТИГ. С помощью моделирования установлено, что параметрами, определяющими тепловое состояние и гидродинамику сварочной ванны при дуговых способах сварки, являются размеры анодного  $R_a$  (диаметр токового канала на аноде) и теплового  $R_h$  пятен дуги. Принципиальное различие в проплавляющей способности сварки ТИГ и А-ТИГ обусловлено различным соотношением между размерами токового и теплового пятен. На основе результатов экспериментальных и расчетных исследований кинетики проплавления при сварке ТИГ и А-ТИГ проведен сравнительный анализ влияния трех различных силовых факторов (силы Лоренца, эффекта Марангони, силы Архимеда) на гидродинамику и тепловое состояние сварочной ванны. Показано, что при небольших размерах анодного пятна (менее 4 мм) доминирующим фактором, определяющим глубину и форму сварной точки, является центростремительная составляющая силы Лоренца.

Анализ как собственных, так и результатов работ, выполненных другими авторами, потребовал проведения дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.

Цель настоящей работы — проведение сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных о распределении температуры на поверхности сварочной ванны и рассмотрение особенностей капиллярной конвекции при сварке ТИГ и А-ТИГ стационарной и подвижной дугой нержавеющей стали.

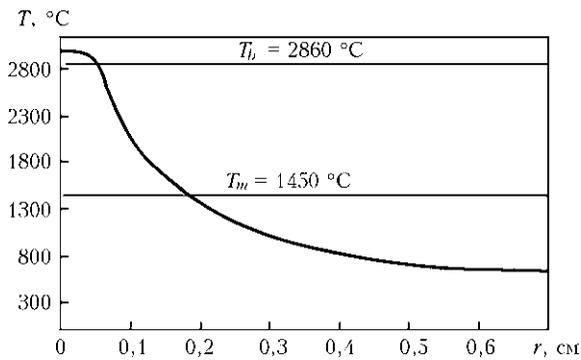


Рис. 1. Расчетные значения распределения температуры на поверхности сварочной ванны (в поперечном направлении) при  $R_a = 1,25$  мм,  $R_h = 1,5$  мм ( $T_m$  — температура плавления)

**Особенности распределения температуры на поверхности сварочной ванны.** Расчеты, выполненные с помощью математической модели [3], показали, что при определенных размерах анодного и теплового пятен стационарной ТИГ дуги при сварке нержавеющей стали 304 возможно повышение плотности теплового потока, которое приводит к дополнительному перегреву поверхности сварочной ванны выше температуры кипения  $T_b$ . В результате возрастают потери тепла на испарение и снижается степень усвоения тепла сварным изделием. Профиль температуры при перегреве поверхности сварочной ванны (в поперечном направлении) выше температуры кипения имеет характерную площадку при  $T > T_b$  (рис. 1).

Для проверки результатов расчетов моделирования провели эксперимент по определению распределения температуры на поверхности сварочной ванны вдоль ее оси. Сварку ТИГ и А-ТИГ подвижной дугой выполняли на образце толщиной 5 мм из нержавеющей стали 304. При сварке А-ТИГ использовали аэрозольный активирующий флюс ПАТИГ С-А. Режим сварки аналогичен расчетному: ток сварки 100 А, установленная длина дуги 1,5 мм, скорость сварки 100 мм/мин. Использовали вольфрамовый электрод с 2 %  $ThO_2$  диаметром 3,2 мм и углом заточки 35°. В качестве защитного газа применяли аргон (расход 12 л/мин).

Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 2. В качестве измерительного прибора использовали компьютеризированный инфракрасный пирометр Marathon MM 1МН фирмы «Raytek». Основные характеристики пирометра следующие: диапазон измеряемых температур 650...3000 °С; спектральный диапазон 1 мкм; погрешность  $\pm 0,3$  % или  $\pm 1$  °С; время реакции 1 мс; диаметр точки измерения 1 мм.

Неподвижно закрепленный пирометр был сфокусирован на точку, от-

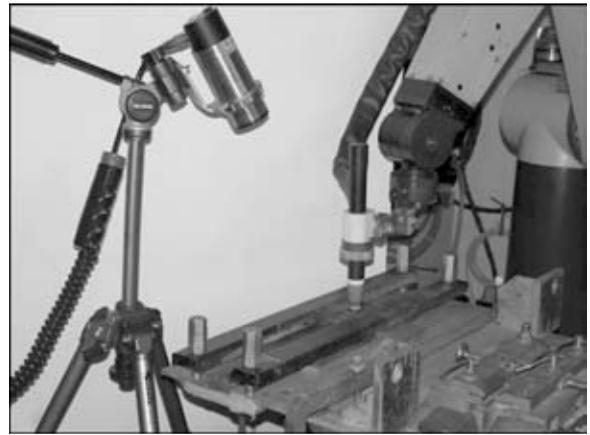


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки

меченную на поверхности свариваемого образца и расположенную на оси шва. Во время сварки сформированная дугой сварочная ванна перемещалась через отмеченную точку. При этом происходило измерение температуры на поверхности сварочной ванны вдоль ее продольной оси. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 3.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 4. При сварке ТИГ и А-ТИГ подвижной дугой распределение температуры поверхности сварочной ванны выше температуры кипения имеет характерную площадку, размеры которой соизмеримы с размерами анодного пятна дуги [4]. Диаметр этой площадки для сварки ТИГ и А-ТИГ составляет соответственно 1,75 и 1,5 мм. При этом максимальная температура площадки несколько ниже при сварке А-ТИГ (2600 °С) по сравнению со сваркой ТИГ (2650 °С). В хвостовой части сварочной ванны при сварке А-ТИГ также наблюдается несколько повышенный уровень температуры.

Следует отметить, что наличие такой площадки перегрева подтверждает возможность существования при сварке А-ТИГ квазипарогазового канала [1].

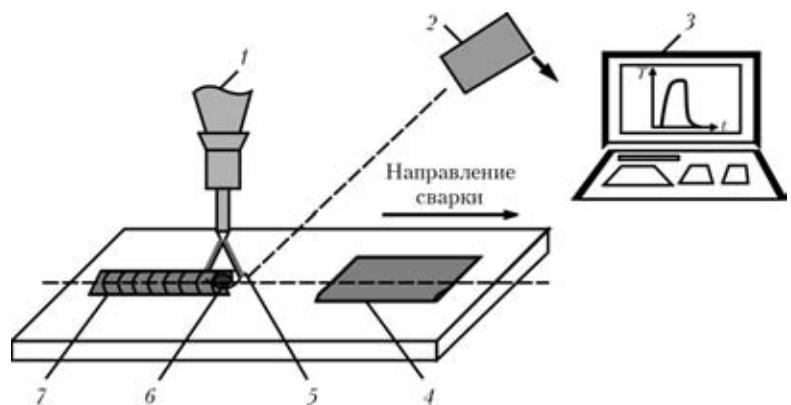


Рис. 3. Схема проведения эксперимента: 1 — горелка; 2 — пирометр; 3 — компьютерная система с программным обеспечением; 4 — активатор; 5 — дуга; 6 — сварочная ванна; 7 — шов



**Роль гидродинамических процессов и особенностей капиллярной конвекции в проплавлении металла.** Одним из силовых факторов, оказывающих влияние на гидродинамику расплава, является сила Лоренца, которая в случае точечной сварки ТИГ и А-ТИГ является осесимметричной, т. е.  $\vec{F} \approx F(r, z)$ , где  $r, z$  — радиальная и аксиальная координаты. Полученные в работе [3] расчетные данные свидетельствуют о том, что при определенных отношениях размеров анодного и теплового пятен дуги и радиусе анодного пятна  $R_a < 4$  мм, характерных для сварки А-ТИГ, доминирующим силовым фактором, определяющим гидродинамику сварочной ванны, является ротационная составляющая силы Лоренца, которая при осесимметричном электромагнитном поле является центростремительной. Следует отметить, что для поверхности сварочной ванны эта сила в анодном пятне прямо пропорциональна квадрату сварочного тока  $I^2$  и обратно пропорциональна кубу радиуса анодного пятна  $R_a^3$  [1, 2]:

$$F_{\text{rot}}^{\rightarrow}(r, 0) = -\mu_0 \frac{I^2}{4\pi R_a^3} \frac{r}{R_a} \vec{e}_r^{\rightarrow} \quad 0 < r < R_a,$$

где  $\mu_0$  — относительная магнитная проницаемость;  $\vec{e}_r^{\rightarrow}$  — единичный радиус-вектор.

Влияние размера анодного пятна на центростремительную составляющую силы Лоренца представлено на рис. 5.

Под воздействием центростремительной составляющей этой силы в сварочной ванне образуется вихревое течение расплава, которое вблизи свободной поверхности направлено от периферии к центру сварочной ванны. Движущиеся навстречу друг другу потоки жидкого металла в осевой части ванны разворачиваются в аксиальном направлении, транспортируя перегретый до температуры кипения и выше (см. рис. 1 и 4) металл из центра теплового пятна ко дну ванны. Поскольку скорости движения жидкого металла поддерживаются достаточно высокими ( $\max |\vec{V}| \approx 50$  см/с), то перемещающийся расплав в значительной степени сохраняет тепло перегрева, в результате чего в сварочной ванне вблизи фронта плавления образуется температурное уплотнение с высоким градиентом температуры. Вследствие этого создаются условия для увеличения глубины проплавления.

Рассмотрим влияние капиллярной конвекции (эффект Марангони) на проплавляющую способность дуги при сварке А-ТИГ. Известно, что поверхностно-активные элементы влияют на коэффициент поверхностного натяжения металла. В качестве поверхностно-активных элементов, поступающих из флюса в расплав при сварке А-ТИГ, могут быть кислород, сера, фтор и др. Например,

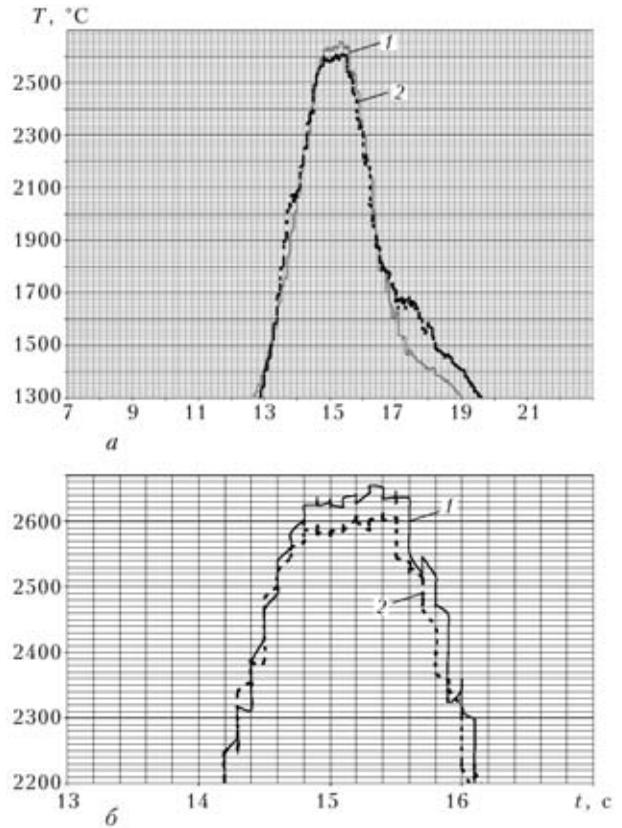


Рис. 4. Экспериментальные кривые распределения температуры на поверхности сварочной ванны в продольном направлении в зависимости от времени сварки в температурном интервале 1300...2800 (а) и 2200...2800 °С (б): 1 — сварка ТИГ; 2 — А-ТИГ

в работе [5] установлено, что коэффициент поверхностного натяжения  $\gamma$  как функция содержания кислорода  $C$  в стали возрастает с уменьшением концентрации кислорода ( $\beta_C = \partial\gamma/\partial C < 0$ ). Поскольку на поверхности сварочной ванны концентрация кислорода убывает с увеличением температуры, то  $\partial C/\partial r > 0$ , а следовательно,  $\beta_C \partial C/\partial r < 0$ . Это свидетельствует о возможности

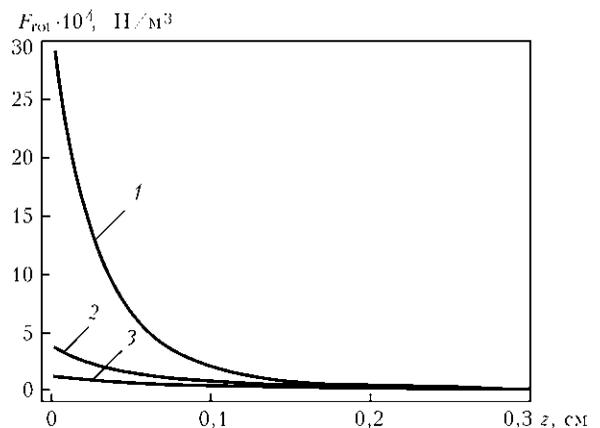


Рис. 5. Расчетные значения  $F_{\text{rot}}(R_a, z)$  вдоль аксиальной координаты  $z$  при  $I = 100$  А: 1 —  $R_a = 1$ ; 2 — 2; 3 — 3 мм



возникновения обратной концентрационно-капиллярной конвекции Марангони, обусловленной градиентом концентрации кислорода на свободной поверхности сварочной ванны.

Вместе с тем, по данным работы [6], температурный коэффициент поверхностного натяжения  $\beta_T = \partial\sigma/\partial T$  расплава железа с содержанием кислорода в пределах  $(150...350) \cdot 10^{-6}$  принимает положительное значение в температурном интервале 1873...2123 К, вследствие чего  $\beta_T \frac{\partial T}{\partial r} < 0$ , что

свидетельствует о возможности обратной термокапиллярной конвекции. При совместной концентрационно-капиллярной и термокапиллярной конвекциях условие баланса касательных напряжений на свободной поверхности расплава можно

записать в виде 
$$v \frac{\partial V_r}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\frac{1}{\rho} \left[ \beta_T \frac{\partial T}{\partial r} + \beta_C \frac{\partial C}{\partial r} \right].$$

Таким образом, при сварке А-ТИГ существует принципиальная возможность возникновения обратного (от периферии ванны к ее центру) течения Марангони, обусловленного как термокапиллярным, так и концентрационно-капиллярным механизмами. При экспериментальном определении  $\beta_T$  и  $\beta_C$  чрезвычайно важно обеспечить условия, необходимые для определения именно частных производных  $\partial\sigma/\partial C$  и  $\partial\sigma/\partial T$ , иначе экспериментальные данные могут оказаться искаженными.

В центральной части поверхности сварочной ванны в районе площадки перегрева имеет место высокотемпературный нагрев металла вплоть до температуры кипения  $T = T_b$ . Из физических соображений следует, что независимо от содержания кислорода  $\gamma(T, C) \rightarrow 0$  при  $T \rightarrow T_b$ . Это означает, что в некотором температурном интервале ( $T_{ext} < T < T_b$ , где  $T_{ext}$  — экстремальная температура) ниже температуры кипения  $\partial\sigma/\partial r = \beta_T \frac{\partial T}{\partial r} + \beta_C \frac{\partial C}{\partial r} > 0$ ,

т. е. коэффициент поверхностного натяжения при некоторой определенной температуре  $T = T_{ext}$  имеет максимум, а направление поверхностной силы в этом температурном интервале соответствует прямой (от центра к периферии ванны) капиллярной конвекции. Таким образом, на поверхности сварочной ванны при сварке А-ТИГ могут су-

ществовать одновременно встречно-направленные, а также прямая (от центра к периферии сварочной ванны, при  $T \in [T_{ext}, T_b]$ ) и обратная (от периферии сварочной ванны к ее центру при  $T < T_{ext}$ ) капиллярная конвекции. В этом случае в сварочной ванне могут образоваться два вихря, в результате взаимодействия которых возникнет течение расплава, направленное вглубь сварочной ванны.

В заключение отметим, что, по нашему мнению, существующих экспериментальных данных о зависимости  $\beta_C = \beta_C(T, C)$  и  $\beta_T = \beta_T(T, C)$  в широком температурном интервале недостаточно для того, чтобы можно было с уверенностью делать теоретические оценки влияния конвекции Марангони на проплавляющую способность сварки А-ТИГ. Для изучения этого влияния требуются дополнительные экспериментальные исследования зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры и концентрации активизирующего элемента в расплаве, особенно применительно к условиям взаимодействия слоя флюса с поверхностью сварочной ванны.

1. *Role of quasi-keyhole and Marangoni convection in formation of deep penetration in A-TIG welding of stainless steel (Phenomenological model of A-TIG welding of stainless steel) / B. E. Paton, K. A. Yushchenko, D. V. Kovalenko et al. // Proc. of Joint 16th Intern. conf. on computer technology in welding and manufacturing and 3rd Intern. conf. on mathematical modelling and information technologies in welding and related processes, Kiev, Ukraine, June, 2006. — Kiev: PWI, 2006. — P. 258–263.*
2. *Phenomenological model of existence and interaction of the system of activated arc and liquid channel of metal pool in A-TIG welding / K. A. Yushchenko, D. V. Kovalenko, I. V. Kovalenko et al. — S. 1., [2007]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-212–1112–07).*
3. *Experimental studies and mathematical modelling of penetration in TIG and A-TIG stationary arc welding of stainless steel / K. A. Yushchenko, D. V. Kovalenko, I. V. Krivtsun et al. S. 1., [2008]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-212–1117–08).*
4. *Yushchenko K. A., Kovalenko D. V., Kovalenko I. V. Investigation of peculiarities of A-TIG welding of stainless steels. — S. 1., [2003]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. 212–1047–03).*
5. *Lancaster J. F., Mills K. C. Recommendations for the avoidance of variable penetration in gas tungsten arc welding. — S. 1., [1991]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. 212–796–/91).*
6. *Taimatsu M., Nogi K., Ogino K. J. Surface tension of liquid Fe-O alloy // High Temp. Soc. Jap. — 1992. — 18. — № 1. — P. 14–19. (яп. яз.).*

Calculation and experimental data were used to conduct analysis of temperature distribution on weld pool surface in TIG and A-TIG welding of stainless steel by stationary and moving arc. It is shown that in TIG and A-TIG welding the temperature distribution of weld pool surface is above the boiling temperature and has a characteristic «platform, the dimensions of which are commensurate with those of the arc anode spot. The maximum temperature and dimensions of this «platform» are somewhat smaller in A-TIG welding. Problems of mathematical description and simulation of Marangoni convection in A-TIG welding, developing by thermocapillary and concentration-capillary mechanisms, are discussed. Two circulation flows can form in the weld pool, their interaction giving rise to melt flow directed in-depth of the weld pool.

Поступила в редакцию 24.07.2010