

УДК 537.527

Моделирование процессов сварочной ванны при электродуговой сварке

Жайнаков Аманбек Жайнакович, д.ф.-м.наук, академик
Султангазиева Рена Турдубековна, к.ф.-м.н., доцент
Медралиева Бубусара Ниясбековна, и.о.доцента
КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, г.Бишкек

Аннотация. В данной работе приводятся математические модели процессов в сварочной ванне при электродуговой сварке в приближении свободной поверхности ванны и при взаимодействии с потоками электрической дуги.

Mathematical modeling of weld pool processes in arc welding

Abstract. This paper presents the mathematical model of the processes in the weld pool during arc welding in the approximation of the free surface and interaction with the flow of an electric arc.

Вопросы формирования сварного соединения тесно связаны с необходимостью изучения процессов движения металла в сварочной ванне. Быстрое протекание процессов, высокая температура и значительное излучение при сварке обуславливают сложность прямого изучения реальных процессов. Для адекватного теоретического описания процессов, протекающих при сварке металлических материалов, требуется принимать во внимание сложное взаимодействие различных физических процессов и явлений, связанных с нагревом и плавлением основного материала при воздействии источника нагрева. Взаимодействуют между собой гидродинамические, температурные и электромагнитные поля, а также поля упругих напряжений, обусловленные силой гравитации. Моделирование таких процессов целесообразно для оптимизации параметров режима сварки и получения сварных соединений с улучшенными качественными характеристиками. Процесс проплавления основного материала является конечным результатом теплового и силового взаимодействия технологического источника энергии с обрабатываемым материалом. Характеристики сварного шва (размеры, форма, микроструктура и т.д.) и теплопередачи в твердой / жидкой интерфейс в значительной степени зависят от потока жидкости в сварочную ванну. В результате, чтобы получить хороший прогноз формы шва, а также тепловые циклы и вызванные остаточные напряжения вокруг зоны сварки (где риск перелома является самым высоким), необходимо принимать во внимание развитие формирования сварочной ванны и ее динамику во времени. Глубина проплавления, а также его форма определяется концентрацией вводимой в зону сварки энергией. Для построения наиболее правильной модели необходимо учитывать, как катодные явления, так и анодные с учетом слоев диффузионного взаимодействия и пространственного заряда. На основе экспериментальных данных и анализа физических процессов в электрической дуге можно установить характер распределения и параметры регулирования плотности тока на аноде, определить оптимальные условия ведения процесса сварки, которые будут обеспечивать требуемые геометрические и эксплуатационные характеристики сварного соединения.

Сварочная ванна образуется за счет проплавления присадочного и основного металлов. Под сварочной ванной подразумевают ванну жидкого металла, капли, образующиеся на конце присадочного материала и капли, находящиеся в пути в дуговом промежутке. Кристаллизация жидкого металла начинается с неполностью оплавленных зерен основного металла. При движении источника теплоты вдоль обрабатываемого материала условия формирования интерфейса «проплавленный металл-шов-основной металл» также играют заметную роль в формировании качественного шва. Исходная концентрация любого элемента в сварном шве складывается из долей участия основного металла, присадочного материала и защитного покрытия.

Для описания процессов, проходящих в расплавленном металле ванны, следует совместно решать нелинейную систему уравнений магнитной гидродинамики движения вязкой жидкости, систему уравнений Максвелла распределения векторов напряженностей электрической и магнитной составляющих электромагнитных полей. При отсутствии протекания тока через металлическую ванну в качестве силовых факторов, воздействующих на расплавленный металл, выступают термогравитационная сила Архимеда и термокапиллярная сила Марангони.

Ранние математические модели сварочной ванны [1-3] описывают три основные силы, имеющие место в процессах сварки плавлением электрической дугой с неплавящимся электродом: электромагнитные силы, вызванные взаимодействием дивергенцией тока, проходящей через сварочную ванну и сгенерированным им магнитным полем, архимедова сила, вызванная градиентом температуры внутри сварочной ванны в присутствии гравитационного поля и градиентом поверхностного натяжения, вызванного разностью температур на поверхности сварочной ванны. Модели предполагают плоской поверхности сварочной ванны, применимость модели для токов ниже 200А. Модели указывают потоки жидкости на поверхности к центру или от центра к краям сварочной ванны в зависимости от поведения коэффициента поверхностного натяжения. В дальнейшем, модель дополняется для случая параболической формы поверхности сварочной ванны силами давления дуги и вязкого взаимодействия потоков расплавленного металла с потоками плазмы [4]. В работе [5] представлена модель симуляции всего процесса плавления с учетом теплообмена между дугой и ванной, учетом

реальной геометрии сварочной ванны, учетом межфазовых явлений на границе плавления и кристаллизации, учетом радиационных потерь с поверхности сварочной ванны, учетом точных зависимостей физических свойств металла от температуры. В работе [6] 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 (диаметр токового канала на аноде) и теплового пятен дуги.

Динамика движения металла в сварочной ванне есть баланс между гравитационными, аэродинамическими силами, электромагнитными силами, силами поверхностного натяжения и реактивными силами испарения.

Схема расчетной области представлена на рис.1. Рассмотрим основные силы, действующие в сварочной ванне:

1) Архимедова сила: плотность металла уменьшается с увеличением температуры. Так как источники тепла сосредоточены в центре поверхности сварочной ванны, поэтому в центре сварочной ванны жидкий металл теплее, чем по краям. Гравитация вызывает движение более тяжелой жидкости с краев ванны вглубь ванны, следовательно, жидкий металл тонет вдоль границ ванны и поднимается вдоль оси ванны, как показано на рисунке 2а.

2) Сила Лоренца. Линии тока плотнее сосредоточены по центру сварочной ванны (анодном пятне) направлены от катода к обрабатываемому изделию, будут вызывать направленный вниз по центру потоки жидкого металла. Таким образом, жидкий металл проталкивается вниз по центру ванны и поднимается вдоль краев сварочной ванны, образуя вихрь, направленный против часовой стрелки. Чем меньше размер анодного пятна, тем плотнее линии тока, и, следовательно, тем больше Сила Лоренца действующая вниз на жидкий металл (рис.2б).

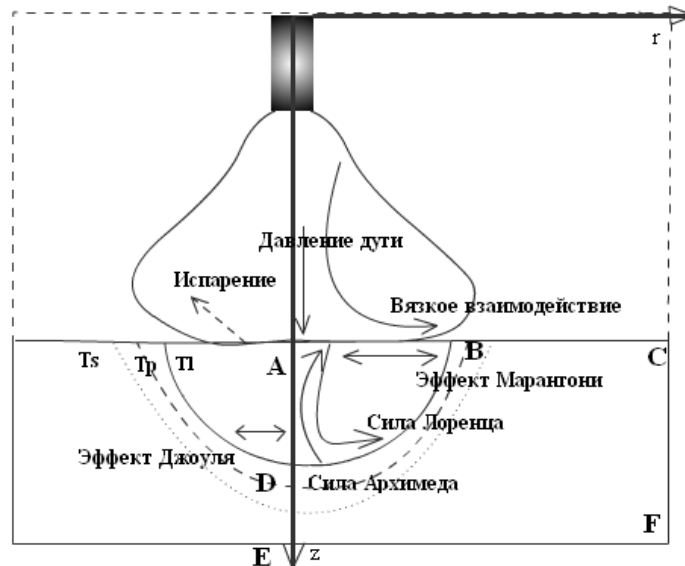
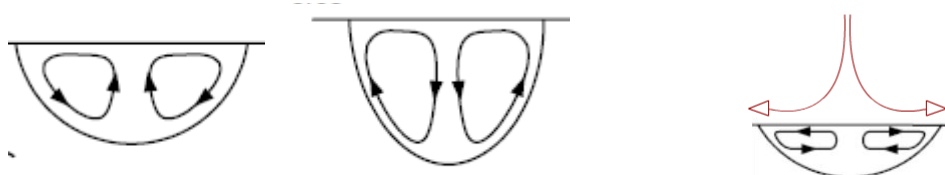


Рис.1 Схема расчетной области

3) Напряжение сдвига вызвано градиентом поверхностного натяжения в отсутствие поверхностно-активного вещества. Поверхностное натяжение α жидкого металла уменьшается с ростом температуры, а градиент $\frac{\partial \alpha}{\partial r} < 0$. Жидкий металл с более низким поверхностным натяжением движется в радиальном направлении от центра сварочной ванны к краям с более высоким поверхностным натяжением. Другими словами, внешнее напряжение сдвига индуцируется на поверхности ванны градиентом поверхностного натяжения. Вызванная конвекция – это термокапиллярная конвекция или конвекция Марангони.



а) Сила Архимеда

б) Сила Лоренца

в) Сила вязкого взаимодействия с плазмой

Рис.2 Направление потоков жидкого металла под воздействием различных сил

4) Вязкое взаимодействие с потоками плазмы. Плазма перемещаются наружу при высоких скоростях вдоль поверхности сварочной ванны и вызывают внешнее напряжение сдвига на поверхности ванны. Это напряжение сдвига вызывает жидкий металл течь от центра поверхности ванны к краю. Эти движущие си-

лы включаются либо в исходные уравнения или в качестве граничных условий при компьютерном моделировании течений жидкого металла в сварочной ванне (рис.2в).

В данной работе для сварочной ванны выдвинуты следующие допущения: Процесс сварки ограничивается стационарной точечной сваркой с неплавящимся электродом в замкнутом объеме, система является осесимметричной; течения ламинарные, поскольку размер ванны относительно мал; в предположении жесткой поверхности анода. Другими словами, деформация поверхности сварочной ванны не влияет на расчетные явления переноса. Таким образом, сварочную ванну в координатах $r - z$ описывают системой МГД уравнений, подобно электрической дуге:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0$$

Уравнения движения для радиальной составляющей:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u u)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) - 2\mu \frac{u}{r^2} + j_z B_\theta$$

Уравнения движения для аксиальной составляющей:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u v)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + j_r B_\theta - \rho g \beta (T - T_0)$$

Закон сохранения энергии

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho c_p u T - a \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho c_p v T - a \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{\sigma} (j_r^2 + j_z^2) - \frac{\partial}{\partial z} (\rho v f_l H_f) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u f_l H_f)$$

Электромагнитные уравнения

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma r \frac{\partial \gamma}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \gamma}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r j_z r dr$$

Закон Ома

$$j_r = -\sigma \frac{\partial \gamma}{\partial r}; \quad j_z = -\sigma \frac{\partial \gamma}{\partial z}$$

Система дополняется зависимостями теплофизических коэффициентов от температуры и давления. В уравнении энергии источниковый член включает в себя джоулево тепло и потери тепла на плавление. Он показывает поведение удельной теплоты плавления во время изменения фаз: теплота поглощается во время плавления, то есть при изменении твердой фазы к жидкой, и высвобождается в процессе затвердевания. H_f - удельная энтальпия

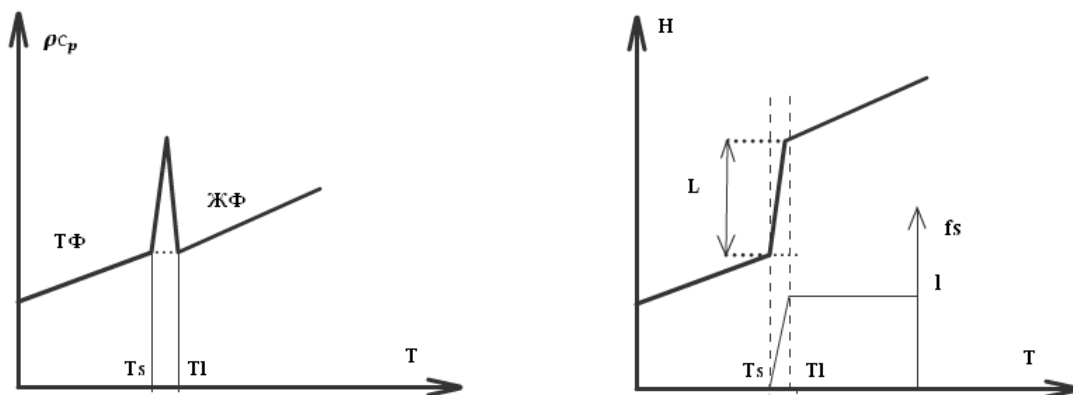
$$H_f = \begin{cases} L & T > T_l \\ f_l L & T_s \leq T \leq T_l \\ 0 & T < T_s \end{cases} \quad (2)$$

где L - удельная теплота плавления металла анода.

В сварочной ванне жидкая фракция f_L меняется линейно от температуры (s - твердая фракция)

$$f_L = \begin{cases} 1 & T > T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ 0 & T < T_s \end{cases} \quad (3)$$

Энтальпия связана с удельной энтальпией формулой $h = c_p T + f_l H_f$



а) Зависимость f_L от температуры

б) Зависимость энтальпии от температуры

Рис.3 График жидкой фракции сварочной ванны

Скрытая теплота выделяется или поглощается, когда материал претерпевает фазовые изменения. Она меняется от нуля в твердой фазе до максимального значения. Это изменение может состояться резко при одной температуре - т.е. температуре плавления T_{plav} , или в течении некоторого температурного интервала от температуры твердой фазы T_s до температуры жидкой фазы T_l (Рис.3).

Данный участок – участок твердо-жидкого состояния; на этом участке зоны происходит формирование шва на частично оплавленных зернах основного металла. Поэтому основной металл на этом участке находится в твердо-жидком состоянии. Участок имеет небольшую ширину. По своему составу и структуре он отличается от соседнего участка основного металла. За время контакта жидкой и твердой фаз в нем протекают диффузионные процессы, и развивается химическая неоднородность. Совокупность первого участка околошовной зоны и пограничного участка металла шва именуют зоной сплавления или переходной зоной. На этом участке часто образуются трещины, ножевая коррозия, усталостные разрушения при вибрационной нагрузке, хрупкие разрушения и т. п. Ширина переходной зоны зависит от природы источника нагрева, теплофизических свойств, состава и толщины основного металла, режима сварки и других факторов.

Граничные условия для свободной поверхности могут быть двух типов: кинематические - установка скорости на жидкой границе, и динамические, связанные с давлением. Форма свободной поверхности сварочной ванны определяется из условия баланса внутренних и внешних сил на ее поверхности.

Граничные условия на свободной границе жидкость - газ включают в себя:

- Нормальные напряжения от баланса давления жидкости и сил вязкого трения, балансом капиллярных сил и сил давления дуги в дуге условия сварки, записаны с учетом тензора вязких напряжений

Нормальная составляющая

$$-P + 2\mu \frac{\partial u}{\partial z} = -P_{\text{дуги}} + \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Тангенциальные составляющие

$$\mu \frac{\partial v}{\partial z} = -f_L \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}$$

Поток тепла в сторону анода через интерфейс «плазма-жидкий металл» определяется следующим образом:

$$\text{Для вольфрамового неплавящегося катода } \lambda_{\text{дуги}} \frac{\partial T_{\text{дуги}}}{\partial z} + j\varphi_a = \lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z}$$

φ_a - работа выхода для металла анода

В приближении свободной поверхности сварочной ванны тепловой поток от дуги рассматривают в следующем виде:

$$q(r) = -\frac{Q}{2\pi r_a^2} \exp\left(\frac{-r^2}{2r_a^2}\right)$$

где Q - количества тепла от дуги, r_a - радиус анодного пятна

Тепловые потери с поверхности сварочной ванны включают конвективные потери, радиационные и потери на испарение:

$$q_{\text{conv}} = \lambda(T - T_0)$$

$$q_{\text{rad}} = \sigma_\varepsilon \varepsilon (T^4 - T_0^4)$$

$$q_{\text{evap}} = W_v h_{fg}$$

где λ - коэффициент теплопроводности, T_0 - температура окружающей среды, σ_ε - коэффициент Стефана-Больцмана, ε - излучательная способность вещества,

h_{fg} - удельная теплота испарения, W_v - скорость испарения, которая находится из следующего приближения:

$$\log W_v = A_v + \log P_{\text{atm}} - 0,5 \log T$$

A_v - постоянная, зависящая от материала обрабатываемого изделия.

Таким образом, граничные условия на поверхности сварочной ванны для температуры примут вид:

$$\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = \frac{Q}{2\pi r_a^2} \exp\left(\frac{-r^2}{2r_a^2}\right) - \lambda_a (T_a - T_0) - \sigma_\varepsilon \varepsilon (T_a^4 - T_0^4) - W_v h_{fg} - j\varphi_a$$

Система МГД уравнений (1) решается в переменных «вихрь-функция тока»:

ω - напряженность вихря, ψ - функция тока, χ - функция электрического тока, которые в случае цилиндрической системы координат в случае осевой симметрии определяются соотношениями:

$$\omega = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right);$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial r} = \rho i r, \quad -\frac{\partial \psi}{\partial z} = \rho v r; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \chi}{\partial r} = r j_z, \quad -\frac{\partial \chi}{\partial z} = r j_r;$$

Граничные условия для данных переменных представляем в следующем виде:

	AB	BC	AE	CF	EF
ω	$\mu_a \omega_a = -\frac{1}{r} \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}$	$u=0$ $v=0$	$\frac{\partial w}{\partial r} = 0$	$w=0$	$w=0$
ψ	$\psi = 0$	$\psi = 0$	$\frac{\partial \psi}{\partial r} = 0$	$\psi = 0$	$\psi = 0$
T	$\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = \frac{Q}{2\pi r_a^2} \exp\left(\frac{-r^2}{2r_a^2}\right) - \lambda_a(T_a - T_0) - \sigma_\varepsilon \varepsilon(T_a^4 - T_0^4) - W_v h_{fg} - j\varphi_a$	$\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = \frac{Q}{2\pi r_a^2} \exp\left(\frac{-r^2}{2r_a^2}\right) - \lambda_a(T_a - T_0) - \sigma_\varepsilon \varepsilon(T_a^4 - T_0^4) - W_v h_{fg} - j\varphi_a$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$
χ	$\frac{\partial \chi_a}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \chi_a}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \chi}{\partial r} = 0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$	$\frac{\partial \chi}{\partial z} = 0$

Обоснование выбора граничных условий на оси симметрии, на боковой и нижних границах изделия, а также постановка условий для переменной ω - напряженность вихря приводятся в работе [7]. Система МГД уравнений (1) для сварочной ванны в переменных (4) и представленными в таблице граничными условиями решалась методом конечных разностей.

Численные расчеты проводились для нескольких значений силы тока, при постоянном давлении 1 атм и постоянном межэлектродном расстоянии 5 мм. Исследовалось влияние гидродинамического фактора на формирование сварочной ванны в следующих случаях: 1) без учета конвекции расплава; 2) учитывается лишь свободная конвекция; 3) учитывается действие термокапиллярной силы; 4) совместное воздействие термогравитационной и термокапиллярной сил.

Литература:

1. Oreper G.M., Szekely J. "Heat and Fluid-flow phenomena in weld pool", Journal of fluid mechanics, Vol.147, p.63-76,1984
2. Kou S., Wang Y.H. "Computer Simulation of convection in moving arc weld pools" Metallurgical Transactions A, Vol.17A, p.2271-2277,1986
3. Wang Y.H. Kou S. "Driving Forces for convection in weld pools" Advances in welding sciences and technology, p.65,1986
4. Saedi H.R., Unkel W. "Thermal-Fluid model for Weld Pool geometry dynamics", Journal of Dynamics Systems, measurement and control, Vol. 111, p.268-276, 1989
5. Zacharia T., Eraslan A.H., Aidun D.K., David S.A. "Three-dimensional transient model for arc welding process", Metallurgical transactions B., Vol. 20B, p.645-659, 1989
6. K. A. Yushchenko, D. V. Kovalenko, I. V. Krivtsun et al. "Experimental studies and mathematical modeling of penetration in TIG and A-TIG stationary arc welding of stainless steel", Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-212-1117-08, 2008
7. A. Jainakov, J. Usenkanov, R. Sultangazieva "On joint modeling of processes in electric arc plasma and melted metal", 6 general assembly of federation of engineering institutions of Islamic countries, 27-30 June-1999, Almaty