

## ВИРТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ШВОВ В ПРОЦЕССЕ ОРБИТАЛЬНОЙ TIG-СВАРКИ

С. И. Полосков (Москва)

Достигнутый уровень имитационного моделирования позволяет во многих случаях заменять изучаемый объект его «образом», на котором с помощью реализуемых на компьютерах расчетно-логических алгоритмов [1] возможно изучение исходного объекта. Наиболее эффективен такой подход для анализа сложных процессов и явлений.

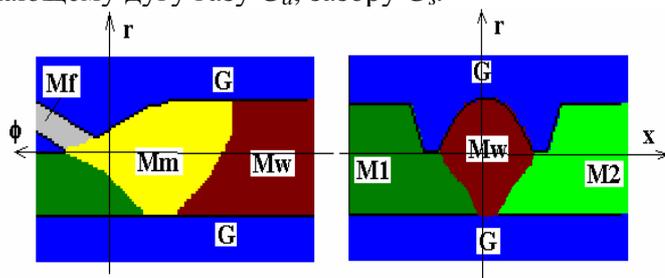
Ввиду сложных причинно-следственных связей, возникающих при изменении пространственного положения сварочной ванны и влияющих на вероятность возникновения дефектов, особенности формирования швов при орбитальной сварке предлагается изучать на виртуальной модели процесса с компьютерной имитацией значимых параметров.

*Концепция создания модели.* Формализацию физико-металлургических явлений, протекающих при сварке, можно описать в рамках аппарата математической физики [2]. К сожалению, создание полностью завершенных теоретических моделей орбитальной сварки, учитывающих многочисленные варианты процесса, чрезвычайно сложная задача [3], осложняемая необходимостью учета динамического изменения основных явлений при сварке [4], в том числе теплового воздействия дуги, образования, формирования и кристаллизации сварочной ванны.

Цель настоящей работы – создание виртуальной модели процесса орбитальной TIG-сварки неповоротных стыков труб, способной помочь определить параметры процесса и допуски на их отклонения, при которых обеспечиваются требования к качеству швов, и наглядно демонстрирующей протекание трех характерных процессов TIG-сварки: без подачи и с подачей присадочной проволоки, а также с колебаниями электрода в разделке и импульсным воздействием дуги на сварочную ванну [5].

*Физические процессы при формировании шва.* Особенность процессов дуговой сварки заключается во взаимодействии различных по природе физических явлений. Первичными являются процессы в электрической дуге, создающей тепловой поток и давление на поверхности металла. Тепловой процесс определяет температуру металла и размеры сварочной ванны. Внешние воздействия и внутренние силы в ванне вызывают деформацию поверхности расплава, которая фиксируется на фронте кристаллизации в шве.

*Пространство моделирования.* Строение пространства моделирования описано дискретной функцией  $\vartheta$ , указывающей принадлежность точки пространства к одной из зон, внутри которой среда имеет определённые свойства [6]. Выделим зоны (рис. 1), соответствующие: металлу первой  $M_1$  и второй  $M_2$  стыкуемых труб, присадочной проволоке  $M_f$ , расплаву  $M_m$ , закристаллизовавшемуся металлу  $M_w$ , плазме дуги  $G_p$ , окружающему дугу газу  $G_a$ , зазору  $G_s$ .



**Рис. 1. Строение и координаты пространства моделирования процесса орбитальной сварки неповоротных стыков труб**

Задачей моделирования является определение положения криволинейных поверхностей раздела  $M_m \cap M_l$ ,  $M_m \cap M_w$ ,  $M_f \cap M_m$ ,  $M_n \cap G_p$ ,  $M_m \cap G_a$ ,  $M_m \cap M_s$ . Для упрощения описания положения зон и разделяющих зоны поверхностей воспользуемся цилиндрической подвижной декартовой системой координат  $\varphi, r, z$ , в которой дуга перемещается с частотой сварки  $\omega_w$ , а труба неподвижна. Для учета многочисленных физических явлений виртуальную модель расчленим на подмодели (рис. 2).

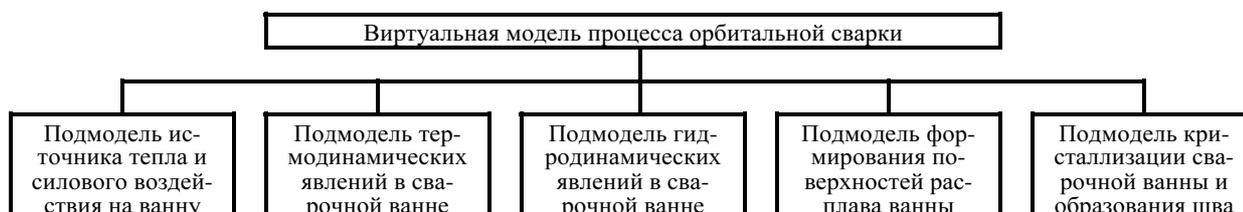


Рис. 2. Структура виртуальной модели процесса орбитальной сварки

Известно [7], что на качество сварных соединений влияют технологические особенности процесса сварки, конструктивные и организационные факторы. Виртуальная модель процесса позволять оценивать их влияние на качество сварных соединений.

*Подмодель источника тепла и силового воздействия.* Распределение теплового потока и давления дуги на поверхности сварочной ванны определяется формой ее поверхности, величиной тока сварки и его сосредоточенностью на поверхности ванны [8]:

$$j_a = \left[ a_j + (1 - a_j) \frac{2r^2}{r_j^2} \right] \cdot \frac{2I_d}{\pi r_j^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_j^2}\right), \quad (1)$$

$$q_a = \left[ a_q + (1 - a_q) \frac{2r^2}{r_q^2} \right] \cdot \frac{2 \cdot 0,7 \cdot P_u}{\pi r_q^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_q^2}\right) + \frac{2 \cdot 0,3 \cdot P_u}{\pi r_q} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_q^2}\right), \quad (2)$$

$$p_d = \frac{2F_d}{\pi r_p^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_p^2}\right), \quad (3)$$

где  $I_d$  – ток дуги,  $P_u$  – мощность дуги, поступившая в изделие,  $F_d$  – сила давления дуги,  $a_{j,q}$ ,  $r_{j,q,p}$  – параметры распределения. Расчетные зависимости (1), (2), (3) можно описать бимодальным распределением, которое сводится к нормальному при  $a_{j,q} = 1$ .

*Подмодель термодинамических явлений в сварочной ванне.* Во всех точках пространства моделирования состояние вещества определяется энтальпией  $H$ , вычисляемой решением нестационарного уравнения сохранения энергии [7]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}[\lambda(T) \text{grad} T] + \rho(\vec{v}, \text{grad} H) + Q, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность среды;  $\vec{v}$  – скорость движения металла;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $Q$  – интенсивность потока теплоты.

Зависимости теплопроводности и температуры с энтальпией описываются нелинейными функциями  $\lambda(H, \vartheta)$  и  $T(H, \vartheta)$ , учитывающими теплоёмкость и теплоту фазовых и агрегатных превращений вещества в зоне  $\vartheta$  при граничных условиях

$$\begin{aligned}
 T &= T_0 \text{ при } x \rightarrow \pm\infty \text{ или } r \rightarrow \pm\infty ; \\
 \frac{\partial T}{\partial r} &= 0 \text{ при } r=0 ; \\
 \frac{\partial T}{\partial \varphi} &= 0 \text{ при } \varphi=0 \text{ или } \varphi=2\pi .
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Тепловое воздействие дуги на металл, как распределение потока тепла дуги через поверхность расплава, учтено зависимостью (3) в подмодели источника тепла.

*Подмодель формирования поверхностей расплава.* Положение свободных поверхностей ванны расплава определяется решением уравнения равновесия давлений на этой поверхности: капиллярного  $p_\sigma$ , дуги  $p_d$ , испарения металла ванны  $p_v$ , гидростатического  $p_g$ , внутреннего  $p_b$ :

$$p_\sigma + p_d + p_v + p_g + p_b = 0 . \tag{6}$$

Капиллярное давление является функцией кривизны поверхности расплава, описываемой как отклонение  $\Delta r(\varphi, z)$  от нормали к поверхности трубы радиусом  $R$ . При допущении о малых значениях кривизны поверхности капиллярное давление определяется решением уравнения

$$p_\sigma = \sigma(T) \left( \frac{\partial^2 \Delta r}{R^2 \partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Delta r}{\partial z^2} + \frac{1}{R} \right), \tag{7}$$

где  $\sigma(T)$  – коэффициент поверхностного натяжения.

Давление дуги на поверхности расплава определяется током дуги  $I$  и его плотностью  $j$  в точке поверхности. Распределение плотности тока и силового воздействия дуги учтено в подмодели теплового и силового воздействия дуги зависимостями (1) и (2).

Реактивное давление испаряющегося металла ванны под действием дуги определяется по температуре в произвольной точке поверхности расплава:

$$p_v = A e^{\frac{B}{T} + C} \tag{8}$$

где  $A, B, C$  – коэффициенты, зависящие от типа металла.

Гидростатическое давление в ванне определяется по формуле

$$p_g = \rho g h , \tag{9}$$

где  $g$  – гравитационное ускорение;  $\rho$  – плотность расплава;  $h$  – высота столба расплава для рассматриваемой точки поверхности.

*Подмодель гидродинамических явлений в сварочной ванне* дополняет подмодель формирования поверхностей расплава описанием изменения центра тяжести ванны при перемещении дуги вдоль стыка. При этом высота  $h$  отсчитывается (рис. 3), от верхней (по направлению силы тяжести) точки  $G$  поверхности расплава, которая может располагаться как на внешней, так и на внутренней, относительно дуги, поверхности ванны.

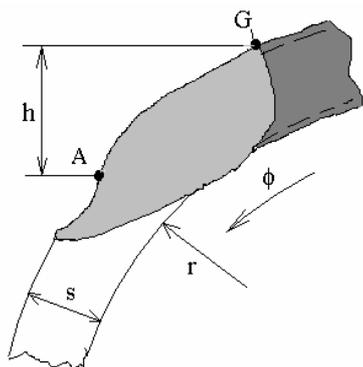


Рис. 3. Параметры сварочной ванны, учитываемые при определении гидростатического давления

Высота  $h$  находится вариационной процедурой:

$$R_G - (R_G + \Delta r(\varphi_G, z_G)) \sin(\alpha + \varphi_G) \Rightarrow \max ; \quad (10)$$

$$\varphi_G, z_G = \text{var} ,$$

где  $R_G$  – внешний или внутренний радиус трубы в зависимости от расположения точки  $G$ ;  $\alpha$  – угол поворота оси дуги (оси системы координат) относительно вектора силы тяжести. Высота столба гидростатического давления в точке  $A$  поверхности расплава определяется как

$$h = R_G - (R_G + \Delta r(\varphi_G, z_G)) \sin(\alpha + \varphi_G) - R_A + (R_A + \Delta r(\varphi_A, z_A)) \sin(\alpha + \varphi_A), \quad (11)$$

где  $R_A$  – внешний или внутренний радиус трубы в зависимости от расположения точки  $A$ .

Внутреннее давление в расплаве определяться из равенства массы металла, поступающего в сварочную ванну, массе кристаллизующегося металла.

Скорость увеличения объема  $V_M$  сварочной ванны вследствие теплового расширения металла кромок определяется зависимостью

$$\frac{\partial V_M}{\partial t} = \omega \int \int_{S_{rz}} \frac{r p_0}{\rho(T_{r,z})}, \quad (12)$$

где  $\rho_0$  – исходная плотность металла;  $\rho(T_{r,z})$  – плотность металла при температуре в рассматриваемой точке.

Скорость изменения объема ванны  $V_3$  вследствие заполнения зазора и разделки кромок расплавленным металлом определяется отношением площади поперечного сечения зазора  $S_3$  к скорости сварки:

$$\frac{\partial V_3}{\partial t} = \omega \int_{R_B}^{R_T} r y(r) dr, \quad (13)$$

где  $R_T, R_B$  – внешний и внутренний радиусы трубы,  $y(r)$  – ширина зазора или разделки кромок на расстоянии  $r$  от оси трубы.

Изменение объема металла  $V_f$ , поставляемой присадочной проволокой, равно:

$$\frac{\partial V_f}{\partial t} = v_f \frac{\pi d_f^2}{4}, \quad (14)$$

где  $v_f, d_f$  – скорость подачи и диаметр проволоки.

Скорость изменения объема ванны вследствие кристаллизации рассчитывается интегрированием по изотермической поверхности температуры солидуса  $L \sim M$ :

$$\frac{\partial V_s}{\partial t} = \iint_{L \cap M} \left( v_w \operatorname{grad}_x H + \frac{\partial H}{\partial t} \right) \frac{dydz}{\operatorname{grad}_x H}. \quad (15)$$

Текущий объем расплава  $V_m$  в сварочной ванне равен:

$$V_m = \int_0^t \left( \frac{\partial V_M}{\partial t} + \frac{\partial V_f}{\partial t} - \frac{\partial V_3}{\partial t} - \frac{\partial V_s}{\partial t} \right) dt. \quad (16)$$

В результате решения уравнений (6)–(10) получим координаты поверхностей сварочной ванны  $\Delta r(\varphi, z)$ . При этом объем расплава между этими поверхностями

$$V_\Delta = \iint_{M \cap G} \Delta r(\varphi, z) r d\varphi dz \quad (17)$$

должен быть равен объёму, рассчитанному по балансу плавления и кристаллизации:

$$V_\Delta = V_m. \quad (18)$$

Это достигается итерационной корректировкой внутреннего давления

$$p_b = p_b \frac{V_m}{V_\Delta}. \quad (19)$$

*Подмодель кристаллизации* учитывает теплонасыщение, а также фиксирует поверхность ванны на фронте кристаллизации в соответствии с граничным условием

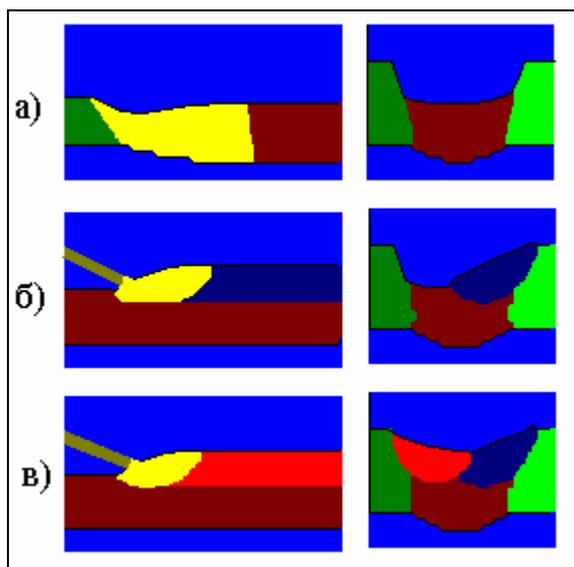
$$\frac{\partial^2 r_L}{r^2 \partial \varphi^2} = 0 \quad \text{для } M_m \cap M_w \cap G_a. \quad (20)$$

*Виртуальное моделирование процесса сварки.* Основным принципом, положенным в основу компьютерной имитации орбитальной TIG-сварки, является численное воспроизведение эволюции формирования соединения с момента начала воздействия дуги на металл и формирования ванны до завершения кристаллизации шва. При этом последовательно за малый шаг времени рассчитываются значения взаимодействующих физических параметров для множества точек области формирования ванны и шва.

Решение уравнения энергии выполняется методом конечных разностей с расщеплением по физическим процессам и пространственным координатам на равномерной прямоугольной сетке с учетом сопряженного теплообмена на граничных поверхностях. Уравнение равновесия давлений на поверхности сварочной ванны также решается методом конечных разностей, с учетом итерационного изменения внутреннего давления в расплаве до достижения баланса массы на одной или двух равномерных двухмерных сетках для верхней и нижней поверхностей ванны.

Установление взаимосвязи между отклонениями параметров и вероятностью возникновения дефектов позволяет наглядно демонстрировать последствия нестабильности процессов сварки, отказов оборудования, нерациональности действий персонала.

*Результаты компьютерной имитации.* Решение уравнений компьютерной модели виртуального процесса орбитальной сварки позволяет имитировать условия образования швов с выполнением корневого прохода, как с присадочной, так и без присадочной проволоки, а также колебаний электрода при заполнении (наплавки) разделки. На рис. 4 представлены результаты имитации, которые показывают возможность оценки условий формирования шва при выбранных параметрах сварки.



**Рис. 4. Результат имитации многопроходной сварки стали 12X18H10T толщиной 6 мм с U-образной разделкой кромок: а – первый проход: ток дуги 80 А, скорость сварки 0,1 м/мин без присадочной проволоки; б, в – второй и третий проходы: ток дуги 80 А, скорость сварки 0,2 м/мин, диаметр присадочной проволоки 0,8 мм, скорость подачи 0,4 м/мин**

Частичная линеаризация и аппроксимация установленных зависимостей позволяет определять в рамках программного обеспечения OrbitWeldSim параметры распределений возможных дефектов в зависимости от изменения сварочного тока, скоростей сварки и подачи присадочной проволоки, длины и амплитуды колебаний дуги, расхода защитного газа, а также геометрии рабочей поверхности электрода, диаметра свариваемых труб и формы разделки. Виртуальная модель процесса является дополнением адекватной модели орбитального сварочного автомата. В совокупности эти модели наглядно демонстрируют на мониторе, каким образом возникают дефекты при недопустимом отклонении параметров, устанавливаемых на виртуальном пульте мышью. Кроме того, предусмотрена возможность демонстрации, как негативные последствия возмущений в многомерном пространстве режимов сварки могут быть компенсированы целенаправленно осуществляемыми управляющими воздействиями на поверхности раздела  $M_m \cap M_l$ ,  $M_m \cap M_w$ ,  $M_f \cap M_m$ ,  $M_n \cap G_p$ ,  $M_m \cap G_a$ ,  $M_m \cap M_s$ . Имитация возмущений в виртуальном процессе позволяет также оценивать влияние на стабильность и воспроизводимость качества формирования швов технологических и конструктивных факторов, которые необходимо учитывать при проектировании процессов сварки, разработке технических требований на сварочное оборудование, составлении учебно-методических материалов для подготовки персонала.

### Выводы

1. Разработана виртуальная модель процесса формирования швов в процессе орбитальной TIG- сварки, которая основывается на системе уравнений математической физики, учитывающих силовое и тепловое воздействие дуги на свариваемый металл, равновесие давлений на поверхности сварочной ванны в многомерном пространстве режимов сварки.

2. Разработан алгоритм, устанавливающий вероятность возникновения дефектов от технологических и конструктивных факторов, надежности сварочного оборудования, рациональности действий персонала.

3. Виртуальная модель формирования швов и компьютерная программа имитации характерных возмущений процесса TIG- сварки и управляющих воздействий позволяет учитывать условия образования сварочной ванны и ее кристаллизации в вирту-

альных тренажерах для подготовки сварщиков-операторов, а также при решении технологических задач в процессе проектирования технологий орбитальной сварки.

### Литература

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Физматлит, 2002. – 320 с.
2. Полосков С.И., Ерофеев В.А., Масленников А.В. Прогнозирование качества сварных соединений на основе физико-математической модели процесса орбитальной сварки//Сварочное производство. – 2005. – №2. – С. 8–16.
3. Полосков С.И., Ищенко Ю.С., Букаров В.А. Анализ факторов, определяющих формирование сварочной ванны при орбитальной сварке неповоротных стыков труб (обзор)//Сварочное производство. – 2003. – №2. – С. 11–19.
4. Судник В.А., Рыбаков А.С., Зайцев О.И. Математическое и программное обеспечение TigSim для анализа процесса дуговой сварки вольфрамовым электродом в аргоне//Труды ТулГУ: Компьютерные технологии в соединении материалов. – Тула: ТулГУ, 2005. – Вып. 3. – С. 128–145.
5. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки. В 3-х т. Т. 2.: Математическое моделирование и оптимизация формирования различных типов сварных швов. – Челябинск: ЮУрГУ, 2003. – 601 с.
6. Ерофеев В.А. Прогнозирование качества электронно-лучевой и лазерной сварки на основе компьютерного моделирования. – Тула: ТулГУ, 2002. – 140с.
7. Полосков С.И., Воронцов Н.Ю., Мошнин А.А. Влияние производственно-технологических факторов на вероятность образования дефектов в процессе автоматической орбитальной сварки//XII Бенардосовские чтения: Проблемы сварки и электротехники. – Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2005. – С. 39–42.
8. Полосков С.И., Ерофеев В.А., Логвинов Р.В. Моделирование распределения теплового потока и давления дуги в процессе орбитальной TIG-сварки//Сварочное производство. – 2005. – №8. – С. 10–15.