

Глава I

Теория сварочных процессов

УДК 621.791.753

ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

В.К. Шелез¹, В.А. Цыганов², С.П. Торпачёв³¹ Белорусский государственный научно-производственный концерн порошковой металлургии НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь² Белорусский государственный научно-технический университет, г. Минск, Республика Беларусь³ Государственное учреждение «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт сварки и защитных покрытий с опытным производством», г. Минск, Республика Беларусь

В работе описана имитационная модель, построенная на основе анализа процессов в дуге, моделирования теплопередачи в системе «дуга - анод», «электрод - капля металла», анализа динамики плавления проволоки и переноса металла в сварочную ванну. Предложены уравнения плавления, образования и переноса капли электродного металла в сварочную ванну без ее разбрызгивания.

Введение

Прогнозирование режимов импульсно-дуговой сварки (ИДС) плавящимся электродом имеет большое практическое значение и является весьма сложной проблемой современной сварочной теории. Тенденции развития сварочного производства, а также широкое применение ИДС требуют разработки высоко надежных физико-математических моделей диагностики и обеспечения сварочного процесса ИДС, которые могут вводиться с применением современных компьютерных средств. Использование адекватных моделей ИДС в производстве делает его более динамичным и перспективным, поскольку для отыскания оптимального режима сварки проводится эмпирический выбор комбинаций многих параметров, который требует много времени и других ресурсов.

Для описания процесса ИДС требуется самосогласованная математическая модель, позволяющая находить параметры режимов сварки исходя из технологических условий, параметров источника и периферии сварочного контура. Поскольку ИДС является нестационарным процессом в акте каплеобразования и переноса, при его описании должен учитываться весь спектр основных параметров, начиная с характеристик источника питания и заканчивая параметрами сварочных материалов и исходного металла.

1. Плавление электрода и перенос металла

Величина электрической мощности в процессе сварки определяет скорость плавления электрода. Реакция электрода на изменения тока довольно медленна, а длина вылета при ИДС практически постоянна, что позволяет ввести достаточно простое описание скорости плавления.

Плавление анода определяется двумя источниками теплоты: поглощением электронов дуги и джоулевым нагревом электрода протекающим током [1]. Важную роль при описании играет температура капля при расчете энергии, отдаваемой электронами аноду. Она может быть примерно оценена из соотношения

$$T_{an} = T_e - T, \quad (1)$$

где T_{an} , T_e , T – температура поверхности капли, электронов и столба дуги соответственно. Однако для имитационного подхода вопрос нахождения темпе-

ратуры поверхности капли, электронов и плазмы дуги имеет важное значение в плане проверки адекватности подхода к фундаментальным явлениям тепломассопереноса в анодной зоне. Характерные значения температур: $T \approx 11600\text{K}$ при энергиях электронов в плазме порядка 1эВ ; $T_{an} \approx 3000\text{K}$ – приблизительно равна температуре кипения стали. Тогда электронная температура будет $T_e \approx 14600\text{K}$, т.е. в анодной зоне имеет место сильная температурная неравновесность. Средняя температура капли находится между температурой плавления $T_m \approx 1400 - 1500\text{K}$ и температурой кипения и составляет примерно $2100 - 2300\text{K}$ [2].

Тепловая мощность, выделяющаяся в аноде,

$$\gamma A v_m H_h = i u_{an}(i) + I_{eff}^2 R_{eff}, \quad (2)$$

где H_h – средняя энтальпия нагрева капли; A – площадь сечения электрода; γ – плотность материала электрода; i_{eff} , R_{eff} – эффективный сварочный ток за время цикла и эффективное электрическое сопротивление.

Величина R_{eff} представляет собой среднее по длине вылета твердой проволоки электрическое сопротивление

$$R_{eff} = \frac{1}{A} \int_0^{Z_{hw}} \rho dz, \quad (3)$$

где $\rho = \rho(H)$ – удельное сопротивление, зависящее от энтальпии металла H . Одномерное дифференциальное уравнение нагрева проволоки может быть упрощено с учетом линейной зависимости температуры проволоки от координаты Z [2]. Тогда, проинтегрировав по Z уравнение от 0 до Z_{hw}

$$A v_f \gamma \frac{dH}{dZ} = I_{eff}^2 \frac{\rho}{A}, \quad (4)$$

с учетом $H(0)=H_0$, $H(Z_{hw})=H_m$ и формулы (3), получим соотношение

$$I_{eff}^2 R_{eff} = A v_f \gamma \alpha (H_m - H_0), \quad (5)$$

где H_m , H_0 – энтальпия проволоки при плавлении и у контактного наконечника соответственно; α – поправочный коэффициент, уточняющий моделирование

нагрева твердой проволоки током. Выражая скорость плавления v_m из (2) с учетом (5), имеем:

$$v_m = \frac{i u_{an}(i)}{A H_h} + v_f \frac{H_m - H_0}{H_h} \quad (6)$$

В простейшем случае энтальпия капли H_h может быть оценена как полусумма энтальпий плавления H_m и испарения H_{vap} :

$$H_h = 0,5(H_m + H_{vap}) \quad (7)$$

Существенным недостатком модели, разработанной в [3], является тот факт, что в выражении для джоулевой составляющей не учитывается поступление теплоты в электрод от расплава капли, а также не учитывается выделение теплоты за счет джоулева тепла в капле. Эти факторы рассмотрены в работе [4].

Высота шарового сегмента капли определяется из баланса массы металла расплавленного электрода и шарового сегмента капли V_s :

$$V_s = \frac{1}{6} \gamma_l \pi h(t) [3r + h^2(t)] = \gamma_l \pi r^2 \int_0^t v_m(t') dt', \quad (8)$$

откуда для высоты $h(t)$ имеем уравнение

$$3rh(t) + h^3(t) = \frac{6\gamma}{\gamma_l} r^2 \int_0^t v_m(t') dt' \quad (9)$$

Изменение скорости плавления электрода вызывает изменение длины дуги, напряжения и сварочного тока. Однако в цикле каплеобразования и переноса должно выполняться условие равенства скорости подачи электрода и средней за время цикла скорости плавления:

$$v_f = (t_p + t_b)^{-1} \int_0^{t_p+t_b} v_m(t) dt, \quad (10)$$

где t_p , t_b – значения времени импульса и базового состояния в цикле соответственно. Формула (10) есть условие саморегулирования процесса в установленном режиме ИДС.

Для моделирования капельного переноса при ИДС без коротких замыканий необходимо учитывать электромагнитную силу F_{em} , силу тяжести F_g и силу поверхностного натяжения F_σ , действующие на каплю в процессе плавления и переноса. Электромагнитная сила

$$F_{em} = 10^{-7} i^2 \ln \left(\frac{r_{col}(i)}{r} \right), \quad (11)$$

где радиус столба дуги

$$r_{col}(i) = \frac{(i^2 g_e)^{\frac{1}{3}}}{4,2 \cdot 10^{-4} U_{eff}^{1,58}} \quad (12)$$

Сечение столкновения электрона с атомом $g_e = 2,5 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$, U_{eff} – эффективный потенциал ионизации смеси, равный

$$U_{eff} = -\frac{T}{5800} \ln \sum_i n_i^{0,5} \exp \left(-\frac{5800 U_i}{T} \right), \quad (13)$$

где n_i , U_i – относительные концентрации компонентов в смеси газа и их потенциалы ионизации соответственно.

Сила тяжести и поверхностная сила, действующие на каплю до начала отрыва, равны:

$$F_g = \frac{4}{3} \pi r_d^3 \gamma_l g; \quad F_\sigma = 2\pi r \sigma, \quad (14)$$

где g , σ – ускорение силы тяжести и коэффициент поверхностного натяжения жидкого металла. Условие баланса трех сил в момент времени t_1 означает начало отрыва капли от анода:

$$F_{em}(t_1) + F_g(t_1) - F_\sigma(t_1) = 0 \quad (15)$$

При отсутствии баланса выполняется равенство

$$F_{em}(t) + F_g(t) - F_\sigma(t) = \frac{4}{3} \pi r_d^3 \gamma_l \cdot a(t), \quad (16)$$

где $a(t)$ – ускорение капли при отрыве.

Принимая ускорение средним по времени \bar{a} , а также учитывая, кроме баланса сил (16), баланс энергии,

$$\frac{4}{3} \pi r_d^3 \gamma_l \bar{a} \cdot S(t_2) = \pi r \sigma + \frac{2}{3} \pi r_d^3 \gamma_l [\bar{a}(t_2 - t_1)]^2, \quad (17)$$

можно в некотором приближении определить ускорение \bar{a} , путь капли $S(t_2)$ до момента времени отрыва t_2 , а также само время отрыва.

Расчитывая высоту сегмента $h(t)$ по (9), из баланса (15) определяется время начала отрыва капли t_1 с учетом, что в начале отрыва радиус жидкой части на конце анода

$$r_l = \frac{r^2 + h^2}{2h} \quad (18)$$

Затем, с использованием уравнений (16) и (17) в предположении, что

$$r_p(t_2) = 0,02r, \quad (19)$$

можно определить время разрыва перемычки t_2 , среднее ускорение капли при отрыве \bar{a} , и путь, пройденный до отрыва $S(t_2)$. В формуле $r_p(t_2)$ – радиус перемычки перед разрывом.

2. Самосогласование процесса ИДС при I_b-U_p-модуляции

Выполнение условия (10) должно гарантировать самосогласование процесса переноса металла в ИДС в установившемся режиме. Из уравнений (6) и (10) можно получить выражение для скорости плавления следующим образом. Выразив значения v_f из (6) и приравняв его к правой части (10), получим:

$$v_f = \frac{1}{\alpha(H_m - H_0)} \left[v_m H_h - \frac{1}{\gamma A} i u_{an}(i) \right] = \quad (20)$$

$$(t_p + t_b)^{-1} \int_0^{t_p+t_b} v_m(t) dt$$

Проинтегрировав уравнение (20) по t от 0 до (t_p+t_b) , в результате придем к равенству (21):

$$[H_h - \alpha(H_m - H_0)] \int_0^{t_p+t_b} v_m(t) dt = \frac{1}{\gamma A} \int_0^{t_p+t_b} i u_{an}(i) dt,$$

в котором отражен баланс тепловой энергии, получаемый электродом от анодной зоны в виде тепла. Поскольку, как видно из (16), мгновенная скорость плавления $v_m(t)$ однозначно определяется мгновенной мощностью, выделяемой в виде тепла на аноде, то можно опустить интегралы в выражении (21) и будут справедливы зависимости

$$v_m(t) = \left\{ \gamma A [H_h - \alpha(H_m - H_0)] \right\}^{-1} \cdot i(t) u_{an}[i(t)]; \quad (22)$$

$$f = \left\{ (t_p + t_b) \gamma A [H_h - \alpha(H_m - H_0)] \right\}^{-1} \cdot \int_0^{t_p+t_b} i(t) u_{an} [i(t)] dt, \quad (23)$$

которые определяют условия самосогласования процесса ИДС через зависимость скоростей подачи и плавления проволоки исключительно от характеристики дуги в анодной зоне.

Выводы

1. На основе анализа процессов, имеющих место в дуге, а также на основе моделирования теплопередачи в электрод-анод, динамики плавления проволоки и переноса электродного металла разработана имитационная модель ИДС плавящимся электродом.

2. Получено выражение для мгновенной длины дуги, в котором зависимость длины дуги от скорости пролета капли в дуговом промежутке описывается членом в виде функции Хевисайда, включающим в момент начала отрыва капли от электрода.

3. На основе баланса сил, действующих на каплю, и баланса энергии капли при ее взаимодействии с электрическим, гравитационным полями и силами поверхностного натяжения, получена система урав-

нений для определения времени начала отрыва капли, времени разрыва перемычки (отделение капли от электрода), среднего по времени ускорения капли во время отрыва и пути, который проходит капля при отрыве от электрода.

4. Записано условие переноса капли в сварочную ванну без разбрызгивания, состоящее в том, что время момента отрыва капли от электрода должно быть больше суммарного времени импульса и спада сварочного тока до базового значения.

Литература

1. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 230 с.
1. Hirata Y. Physics of welding (III)-Melting rate and temperature distribution of electrode wire // Welding intern., 1995, № 9. P. 348–352.
3. Судник Б.А., Иванов А.В., Дилтай У. Анализ эффективной тепловой мощности импульсной дуги при МАГ-сварке стали методом математического моделирования с экспериментальной проверкой. // Сб. статей Тульского ГУ, 1999. С.68–80.
4. Цыганов В.А., Торпачев С.П., Новик Н.В., Селицкий В.С. Плавление электродного металла в условиях теплоизоляции боковой поверхности. Труды Межд. конф. «Математика в индустрии» (июнь, 1998г., Таганрог). С.325–326.

V.K. Sheleg, V.A. Tsyganov, S.P. Torpachev

Development of Simulation Model of Pulse Arc Welding with Consumable Electrode

The simulation model, based on the analysis of arc processes, simulation of heat transfer in the system «arc-anode», «electrode-drop of the molten metal», analysis of the dynamic of wire melting and metal transfer in the welding pool is described. The equations for melting, formation and transfer of the drop of molten metal in the welding pool is given.

© В.К. Шелег, В.А. Цыганов, С.П. Торпачёв, 2004.

УДК 621.791.753

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СВАРКИ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ДЕФЕКТЫ СОЕДИНЕНИЯ

С.П. Рагунович | А.А. Радченко, С.В. Селицкий, С.П. Торпачёв

Государственное учреждение «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт сварки и защитных покрытий с опытным производством», г.Минск, Республика Беларусь

В работе приведены результаты экспериментального исследования влияния среднего значения и дисперсии величин сварочного тока, напряжения и мощности сварочной дуги на такие дефекты сварного соединения, как неравномерность формы шва, шлаковые включения, подрезы, прожоги, крупночешуйчатость сварного шва и другие. Приведены временные зависимости этих параметров процесса, а также гистограммы значений величины мощности и функции вероятности. Получено, что чем выше дисперсия электрических характеристик процесса сварки, тем более управляемым проходит процесс каплепереноса через дуговой промежуток. За счёт этого происходит более чёткое разделение базовых и импульсных электрических характеристик, и дисперсия, таким образом, возрастает.

Введение

В соответствии с европейскими стандартами соединение элементов с помощью сварки является процессом специальным, поскольку его результаты не могут быть в достаточной полной мере проверены при последующих испытаниях и контроле. В связи с этим возникает необходимость проверки всех факторов, оказывающих влияние на качество процесса непосредственно во время его протекания.

Исследование дуговых процессов при сварке плавлением должно проводиться с использованием как теоретических методов статистической физики с разработкой на их основе моделей диагностики, так и экспериментальными методами получения динамических электрических характеристик процесса, исследования физических особенностей сварных

соединений в зависимости от величин отклонений статистических моментов величины мощности дуги.

При анализе экспериментальных данных по току и напряжению дуги было замечено, что определенное сочетание реализаций тока и напряжения, а именно их произведение, имеет соответствующую функцию плотности распределения вероятностей с выраженным одномодальным характером. Это обстоятельство дает основание с достаточной для практики точностью описывать ее с помощью ограниченного числа статистических моментов и, следовательно, определять изменения в процессе сварки по отклонениям моментов от заданных и, тем самым, находить количественные оценки различных дефектов сварного соединения (пористость, крупночешуйчатость,