

01;05;12

Критерий устойчивости электрошлакового процесса

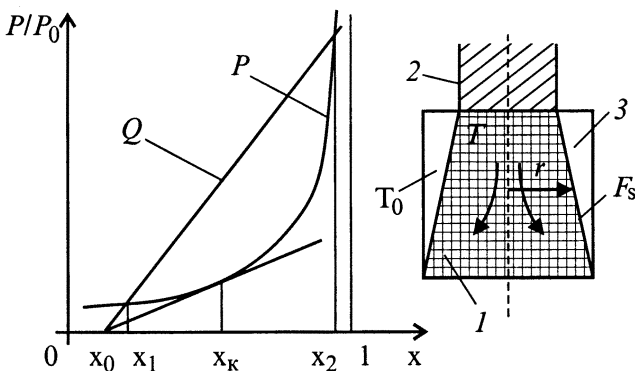
© Д.А. Дудко, А.М. Пальти, В.А. Севрюков, А.А. Снарский

Институт электросварки им. Е.О. Патона АН Украины,
252650 Киев, Украина

(Поступило в Редакцию 27 октября 1998 г.)

Дано объяснение механизма смены режима электрошлакового процесса, например, с чисто резистивного шлакового на электродуговой. Введен критерий устойчивости электрошлакового процесса W_d .

Электрошлаковый процесс — это электротермический процесс обработки расплавленного металла. Теплота, выделяющаяся при прохождении электрического тока через ванну расплавленного шлака, имеющего достаточно большое сопротивление, расходуется на плавление электрода и термическую обработку свариваемых кромок, шва либо обогрев слитка [1]. В типичной схеме электрошлакового процесса в шлаковой ванне устанавливается стационарное течение расплава шлака. Под электродом расплав движется вниз, и область наиболее интенсивного тепловыделения представляет собой усеченный конус, расположенный между расходуемым электродом и жидкой металлической ванной (схема приведена на рисунке). Скорость подачи электрода считаем постоянной (процесс квазистационарный), особенности процесса, обусловленные каплепадением, не учитываем (это соответствует, например, процессу электрошлакового обогрева). Рассмотрим случай, когда источник питания имеет жесткую характеристику ($U = \text{const} = U_0$, где U_0 — действующее значение напряжения между электродами) [1]. Устойчивость процесса с подобными источниками экспериментально изучена в работе [2]. Вместе с тем уже простые теоретические соображения (см., например, [3]) позволяют получить как известные результаты, так и новые данные об устойчивости процесса.



P и Q — кривые тепловыделения и теплоотдачи соответственно, I — область активного конуса шлаковой ванны (выделена темным фоном, стрелками показано направление течения шлака), 2 — электрод, 3 — шлаковая ванна за пределами активного конуса.

Пусть в активном конусе шлаковой ванны выделяется мощность $P = U_0^2/R(T)$. Тогда в квазистационарных условиях эта мощность должна отводиться через боковую поверхность активного конуса площадью F_s путем теплообмена, т.е.

$$P = U_0^2/R(T) \cong \alpha(T - T_0)F_s = Q. \quad (1)$$

Здесь $R(T) \cong R[1 - \gamma(T - T_n)]$, γ — константа температурной зависимости сопротивления (в диапазоне типичных рабочих температур шлаковой ванны зависимость $R(T)$ считаем линейной), T_n — некоторая известная температура из рабочего диапазона, α — коэффициент теплообмена активной области с внешней шлаковой средой. Для простоты будем считать, что активная область равномерно прогрета до температуры T , а средняя температура шлака, окружающего область, — T_0 . Заметим, что действительный механизм теплообмена значительно сложнее. Имеем место теплоперенос, обусловленный электрогидродинамическими условиями в шлаковой ванне, причем поле температур существенно неоднородно. Вместе с тем эксперименты с кино- и фотосъемкой реального шлакового расплава через кварцевое стекло позволяют выделить активную область [4], что служит основанием для упрощений, принятых в нашей модели. Вводя обозначение $x \equiv \gamma(T - T_n)$, перепишем соотношение (1) в виде

$$\frac{1}{1-x} \cong \frac{\alpha(x)F_s}{\gamma P_0} (x - x_0), \quad (2)$$

где $F_s = 2\pi rh$ — площадь боковой поверхности активной области, средней радиус которой r ; $P_0 \equiv U_0^2/R_n$; $x_0 = \gamma(T_0 - T_n)$; $\alpha(x)$ — коэффициент теплоотдачи, который, согласно известному критериальному соотношению [5,6], можно записать в виде

$$\alpha(x) = 0.664 \frac{\lambda}{h} \left(\frac{v(x)h}{\nu} \right)^{1/2} \left(\frac{\nu}{a} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

где λ, ν, a — удельная теплопроводность, кинематическая вязкость и температуропроводность жидкого шлака; h — высота активного конуса.

Кроме того, используем оценку зависимости скорости течения шлака v как функции рабочего тока процесса I и радиуса шлаковой ванны r , которую нетрудно получить

из соображений размерности,

$$v \cong \frac{I(x)}{r} \sqrt{\frac{\mu_0}{\rho}}, \quad (4)$$

где ρ — плотность жидкого шлака, μ_0 — магнитная постоянная.

Запишем (2) в виде

$$\frac{1}{\sqrt{1-x}} = Wd(x-x_0), \quad (5)$$

где введен критерий Wd , характеризующий электрошлаковый процесс

$$Wd = 2 \left(\frac{rhR_H}{\nu} \right)^{1/2} \left(\frac{\nu}{a} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_0}{\rho} \right)^{1/4} \frac{\lambda}{\gamma U_0^{3/2}}. \quad (6)$$

Здесь физические константы взяты при температуре активного конуса. Как видно из уравнения (5), устойчивость электрошлакового процесса определяется значением безразмерного критерия Wd , который характеризует соотношение выделившейся в активной области и отведенной от него тепловой мощности. На рис. 1 представлено графическое решение этого уравнения.

Проанализируем уравнение (5). При $Wd < 1/[2(1-x_0)^{3/2}] = Wd_{\min}$ прямая отводимой теплоты перестает пересекать гиперболу тепловыделения и устойчивого процесса не существует. Это может соответствовать переходу к дуговому процессу или смене механизма теплоотдачи (например, при дуговом процессе определяющим становится теплообмен излучением). При $Wd > Wd_{\min}$ уравнение имеет два корня x_1 и x_2 , из которых x_1 является точкой устойчивого, а x_2 — неустойчивого равновесия. Выясним смысл интервала (x_1, x_2) . Выше мы предполагали, что процесс стационарный, в действительности температурный параметр зависит от текущего времени процесса t , и его можно представить в виде $x(t) = x_{st} + \delta x$. При $\delta x > x_2 - x_1$ процесс становится неустойчивым (начинается неограниченный разогрев активного конуса). Таким образом, чем больше длина температурного интервала (x_1, x_2) , тем выше степень устойчивости процесса. Очевидно, с увеличением Wd указанный интервал растет. Из соотношения (6) видно, что это может иметь место при уменьшении напряжения (силы тока) или росте произведения высоты активного конуса на его средний радиус.

Исследуем влияние на устойчивость характеристики источника питания. Пусть источник имеет слабо падающую характеристику, т.е. $U = U_0 - a \cdot I$, где a — постоянная, причем $a/R_n \ll 1$. Тогда

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R} - \frac{a}{R} I, \quad \text{откуда} \quad I = \frac{U_0}{R+a}. \quad (7)$$

Здесь, как и выше, $R \cong R_n [1 - \gamma(T - T_n)]$. С использованием (7) для выделяемой мощности получим

$$P = I \cdot U \approx \frac{U_0^2}{R} \left(1 - \frac{2a}{R} \right).$$

Аналог уравнения (5) для рассматриваемого случая с учетом введенных обозначений примет вид

$$\frac{1}{\sqrt{1-x}} \left[1 - \frac{(2a/R_n)}{1-x} \right] \cong Wd(x-x_0). \quad (8)$$

В этом случае кривая тепловыделения (P) опускается ниже, расширяя интервал устойчивости (x_1, x_2) . Понятно, что для слабо растущей характеристики этот интервал, наоборот, уменьшится (знак «+» в квадратных скобках в соотношении (8)).

Изложенная выше модель позволяет понять механизм смены режима электрошлакового процесса, например с чисто резистивного на резистивно-дуговой. Модель дает качественное и в первом приближении количественное описание характера изменения устойчивости электрошлакового процесса при жесткой характеристике источника питания в зависимости от 1) геометрических параметров — размеров ванны шлакового расплава r и h , 2) физических параметров — константы температурной зависимости сопротивления шлака γ , его вязкости ν , теплопроводности λ , плотности ρ и температуропроводности a , 3) режима — амплитуды напряжения на шлаковой ванне. Зная конкретные значения параметров процесса, можно оптимизировать длину интервала (x_1, x_2) , что желательно при выборе электрического режима, свойств и количества используемого флюса. Для описания устойчивости электрошлакового процесса введен критерий Wd .

Список литературы

- [1] *Электрошлаковая сварка и наплавка* / Под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1980. 511 с.
- [2] *Волошкевич Г.З.* // Автомат. сварка. 1962. № 4. С. 19–21.
- [3] *Абрамов Г.И., Гуревич А.В., Захарченко С.И.* и др. // ФТТ. 1985. Т. 27. Вып. 8. С. 2250–2256.
- [4] *Дудко Д.А., Волошкевич Г.З., Суцук-Слюсаренко И.И., Лычко И.И.* // Автомат. сварка. 1971. № 2. С. 19–27.
- [5] *Уонг Х.* Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
- [6] *Дудко Д.А., Пальти А.М.* // Автомат. сварка. 1997. № 9. С. 19–21, 25.