



ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ СКОРОСТЯМИ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ И ЕЕ ПЛАВЛЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ С КОРОТКИМИ ЗАМЫКАНИЯМИ

В. А. ЛЕБЕДЕВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена математическая модель, описывающая зависимость тока дугового процесса и соответственно скорости плавления электродной проволоки от изменяющегося характера ее движения в процессе сварки плавящимся электродом, в частности, при коротких замыканиях дугового промежутка.

Ключевые слова: дуговая сварка, механизированный процесс, электроды, импульсы, скорость плавления, сварочный ток, математическая модель

В последнее время все большее внимание уделяется дуговой механизированной сварке с импульсным воздействием на процесс за счет импульсов тока от специальных источников (импульсно-дуговой процесс) или применения импульсной подачи электродной проволоки. Эти воздействия дают определенные преимущества по сравнению со стационарными (невозмущенными) процессами.

В технической литературе опубликован ряд материалов, в которых рассматриваются проблемы, связанные с технологическими особенностями использования импульсной подачи проволоки [1] и техническими средствами реализации такого движения [2]. Однако недостаточно внимания уделено исследованиям, связанным с влиянием изменяющейся скорости подачи на параметры дугового процесса, в частности, такой важной характеристики, как скорость плавления электродной проволоки. Знание этих закономерностей необходимо как для определения параметров движения проволоки в зону горения дуги и элементов управления переносом электродного металла в сварочную ванну, так и для оценки влияния возмущений в системе подачи (отклонений в скорости подачи по сравнению с заданным значением) на формирование сварочного шва и характеристики процесса сварки в целом.

Целью настоящей работы является получение аналитической зависимости между скоростью подачи электродной проволоки и скоростью ее плавления при изменяющемся характере движения проволоки, в частности, для случая специально используемой импульсной подачи.

В работе [3] выведено уравнение, связывающее сварочный ток и скорость подачи электродной проволоки, для процесса дуговой сварки плавя-

щимся электродом в защитном газе с короткими замыканиями дугового промежутка:

$$\frac{L}{R_3 + 0,5b} \frac{d^2 I_c}{dt^2} + \frac{dI_c}{dt} + \frac{ANE_c I_c}{R_3 + 0,5s} = \frac{v_n E_c}{R_3 + 0,5s}, \quad (1)$$

где L — индуктивность сварочной цепи; R_3 — эквивалентное сопротивление сварочной цепи; E_c — напряженность электрического поля в столбе дуги; b — коэффициент, характеризующий наклон статической характеристики дуги к оси токов; $A = 1/\pi r_s^2 M$; $H = U_{x,x}(0,285 - 0,0052 U_{x,x})$; $U_{x,x}$ — напряжение холостого хода; $M = C_n \gamma_n T_n - C_o \gamma_o T_o + r_n \gamma_n$; C_n , C_o — теплоемкость металла соответственно при температурах плавления и окружающей среды; γ_n , γ_o — плотность металла при температурах соответственно плавления и окружающей среды; r_n — скрытая теплота плавления; T_n , T_o — соответственно температура плавления электродного металла и окружающей среды.

Это уравнение достаточно сложное для решения и использования при выборе параметров управляемой импульсной подачи. Для упрощения преобразуем его в вид, удобный для решения методами операторного исчисления, приняв, что скорость подачи электродной проволоки v_n — входное воздействие, а ток дугового процесса I_c — выходное:

$$\frac{I_c(p)}{v_n(p)} = \frac{E_c / (R_3 + 0,5s)}{T_1 p^2 + p + k}, \quad (2)$$

где p — оператор дифференциального исчисления; $T_1 = L / (R_3 + 0,5s)$; $k = ANE_c / (R_3 + 0,5s)$.

Уравнение (2) в операторной форме представляет собой передаточную функцию системы источник сварочного тока — механизированный процесс сварки с короткими замыканиями дугового промежутка. Влияние скорости подачи электродной проволоки на сварочный ток можно изучать, задав различные законы движения проволоки.



Рассмотрим синусоидальное изменение скорости подачи как одного из наиболее распространенных законов, целенаправленно реализуемых посредством механизмов импульсной подачи. Этот закон можно записать в виде (рис. 1, а):

$$v_{\text{п}} = V_{\text{п}} |\sin \omega t|, \quad (3)$$

где $V_{\text{п}}$ — амплитудное значение скорости подачи; ω — частота следования импульсов.

Можно найти изображение в операторной форме входной величины, которой является скорость подачи электродной проволоки, основываясь на уравнении (3) и данных работы [4]. Однако в этом случае решение (поиск оригинала) уравнения в операторной форме при поиске выходной величины (тока сварки I_c) будет достаточно сложным и громоздким.

Упростим задачу и детально рассмотрим форму импульсов подачи, получаемую при использовании реального механизма импульсной подачи и прохождения импульсов по направляющему каналу. Рассматриваемые импульсы, как правило, не имеют резких переходов (сказываются люфты и особенности формирования импульсов в механизме подачи и запаздывания в направляющем канале, особенности формирования импульсов с реверсивным движением электродной проволоки). Исходя из анализа реальных осциллограмм скорости подачи [5], формализованную форму импульса можно представить в виде, показанном на рис. 1, б. Для этого случая правомерным будет представление изображения входной величины (скорости импульсной подачи электродной проволоки) в следующем виде:

$$v_{\text{п}}(p) = \frac{(A+B)\omega}{p^2 + \omega^2}, \quad (4)$$

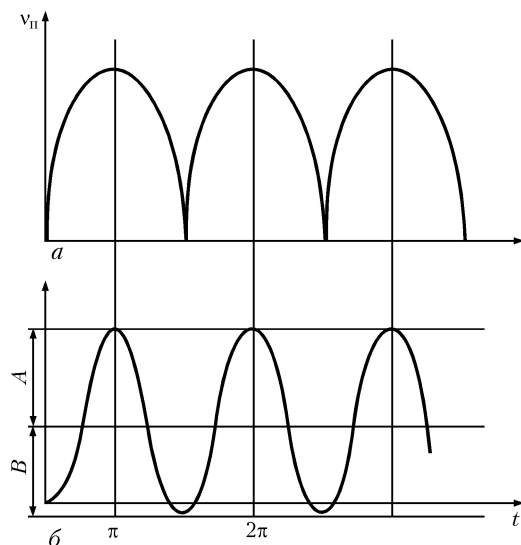


Рис. 1. Расчетная (а) и близкая к реальной (б) формы импульсов подачи

где A и B обозначены на рис. 1.

Исходя из уравнений (2) и (4) представим изображение тока сварки I_c в следующем виде:

$$I_c(p) = \frac{(A+B)D\omega}{(p^2 + \omega^2)(T_1 p^2 + p + k)} = \frac{(A+B)D\omega}{T_1 p(p^2 + \omega^2)[p^2 + (p/T_1) + (k/T_1)]}, \quad (5)$$

где $D = E_c/(R_s + 0,5s)$.

Уравнение (5) можно решить, перейдя от изображения выходной величины $I_c(p)$ к ее оригиналу $I_c(t)$, т. е. $I_c(p) = I_c(t)$, при этом указанный переход целесообразнее всего можно найти, пользуясь таблицами операторных изображений [6]. Наиболее близкой табличной формулой является следующая:

$$F(p) = \frac{1}{(p^2 + c^2)[(p+a)^2 + b^2]},$$

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{(\delta^2 - c^2)^2 + 4a^2 c^2}} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{c} - \sin(ct - \lambda) + \frac{1}{b} e^{-at} \sin(bt - \mu) \right], \quad (6)$$

где

$$\lambda = \arctg \frac{2ac}{\delta^2 - c^2}; \quad \mu = \arctg \frac{-2ab}{a^2 - b^2 + c^2}; \quad \delta^2 = a^2 + b^2.$$

Приравняв соответствующие коэффициенты знаменателей уравнений (5) и (6), получим следующие выражения для определения a , b , c :

$$a = 1/2T_1; \quad a^2 + b^2 = k/T_1; \quad b = (\sqrt{4kT_1} - 1)/2T_1; \quad c = \omega. \quad (7)$$

В выражениях (7) величина b определяет частоту вынужденных колебаний системы источник сварочного тока — дуговой процесс.

Можно указать, что при импульсной подаче интегральная скорость подачи электродной проволоки связана со скоростью подачи в импульсе следующей зависимостью:

$$v_{\text{п}} = f(t) = \xi h, \quad (8)$$

где ξ , h — соответственно частота и шаг импульсной подачи.

Учитывая, что рекомендуемый в работе [7] шаг связан с диаметром электродной проволоки d_3 зависимостью $h = 1,2d_3$, уравнение (8) запишем в следующем виде:

$$v_{\text{п}} = (1,2 \dots 1,4)d_3 \xi. \quad (9)$$

Известно, что интегральная скорость подачи $v_{\text{п}}$ при гармоническом законе ее изменения (см. уравнение (3)) связана с амплитудным значением зависимостью



$$v_{\pi} = \frac{1}{\pi} \int_0^{T/2} V_{\pi} \sin \omega t = \frac{2}{\pi} V_{\pi}, \quad (10)$$

где T — период следования импульса подачи.

Амплитудное значение скорости подачи v_{π} с учетом (9), (10) может быть представлено в виде

$$V_{\pi} = \pi(1,2 \dots 1,4) d_3 \xi / 2 \approx 2 d_3 \xi. \quad (11)$$

Учитывая постоянные сомножители уравнения (5) B , D и T_1 , а также то, что колебания скорости подачи электродной проволоки смещены относительно оси абсцисс на величину

$$B = k_{\phi} V_{\pi}, \quad (12)$$

где k_{ϕ} — величина, характеризующая форму импульса подачи), в окончательном виде получаем искомую зависимость $I_c(t)$ для случая импульсной подачи электродной проволоки

$$I_c(t) = \frac{BD}{T_1 \sqrt{(\delta^2 - c^2)^2 + 4a^2 c^2}} + \frac{(A+B)D}{T_1 \sqrt{(\delta^2 - c^2)^2 + 4a^2 c^2}} \times [\sin(ct - \lambda) + \frac{c}{b} e^{-at} \sin(bt - \mu)]. \quad (13)$$

Уравнение (13) является математической моделью, которая в аналитической форме описывает зависимость между изменяющейся по гармоническому закону скоростью подачи проволоки и током сварки. Эта модель справедлива для исследования одиночного импульса подачи, но так как процесс с короткими замыканиями является периодическим и его частота при правильно подобранных параметрах импульсной подачи [8] соответствует частоте следования импульсов, предложенный подход к описанию указанной зависимости следует считать приемлемым.

Предварительный анализ уравнения (13) показывает, что при импульсной подаче электродной проволоки ток в сварочной цепи носит колебательный характер, но при этом частота и амплитуда этих колебаний определяется одновременно двумя составляющими: как следствие изменения скорости подачи проволоки и в результате асимптотически затухающих колебательных переходных процессов в плавлении электродной проволоки.

На основании уравнения (13) были рассчитаны параметры колебаний тока сварки при использовании импульсной подачи электродной проволоки. Эти расчеты в графическом виде представлены на рис. 2.

Как и следовало ожидать, при разной частоте импульсной подачи и переходного процесса их результирующее значение зависит от достаточно

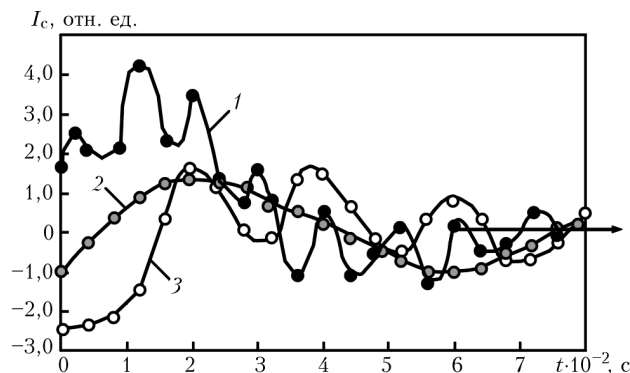


Рис. 2. Относительные колебания тока сварки при импульсной подаче электродной проволоки с синусоидальным характером движения ($b = 14 \text{ с}^{-1}$): 1 — $c = 100$; 2 — 14; 3 — 50 с^{-1}

большого количества параметров, а также особенностей плавления электродной проволоки при дуговом процессе с использованием плавящегося электрода, характеристик источника сварочного тока и параметров сварочной цепи.

Важным является то, что изменения (колебания) сварочного тока, обусловленные импульсным характером движения проволоки и колебательным переходным процессом системы дуга-дуговой процесс, происходят не синхронно с изменением скорости подачи электродной проволоки, а с определенным (вычисляемым) сдвигом от них на время, зависящее от характеристик указанной системы, а также существенные превышения сварочного тока в начальный момент действия импульса подачи над его колебаниями в установившемся режиме. Последний при сварке с короткими замыканиями дугового промежутка принят как гипотетический для оценки уровней изменения тока в зависимости от скорости подачи.

Учитывая, что скорость плавления электродной проволоки $v_{\text{пл}}$ безынерционно следует за изменениями сварочного тока и пропорциональна ему, а также учитывая уравнения (8), (12) и (13), можно представить в окончательном виде уравнение, связывающее скорость подачи электродной проволоки и ее скорость плавления в следующем общем виде:

$$v_{\text{пл}}(t) = \frac{k_f f \pi D / 2}{T_1 \sqrt{(\delta^2 - c^2)^2 + 4a^2 c^2}} \times \left\{ \frac{1}{2} + [\sin(ct - \lambda) + \frac{c}{b} e^{-at} \sin(bt - \mu)] \right\}, \quad (14)$$

где k_f — коэффициент пропорциональности, характеризующий степень зависимости $v_{\text{пл}} = f(I_c)$, которая, как правило, принимается прямо пропорциональной.

Самым доказательным примером подтверждения результатов проведенного исследования является существование принудительных коротких замыканий дугового промежутка с частотой им-

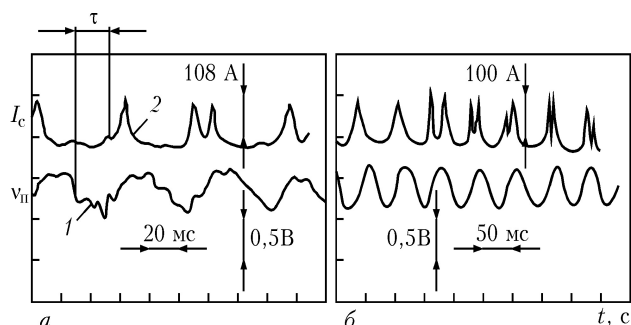


Рис. 3. Осциллограммы синхронной записи скорости подачи импульсного движения электродной проволоки (1) и тока дугового процесса (2): а — $c = 20 \text{ c}^{-1}$; б — $c \approx 30 \text{ c}^{-1}$; в — $c = 20 \text{ c}^{-1}$; б — $c \approx 20 \text{ c}^{-1}$

пульсной подачи как следствия плавления проволоки по закону, задаваемому импульсной подачей с присущими ей ускорениями в плавлении электродной проволоки в каждом импульсе и замыканию капель дугового промежутка в момент действия импульса. На рис. 3 приведены экспериментально полученные характерные осциллограммы синхронной регистрации скорости импульсного движения проволоки, воспроизводимого механизмом подачи с синусоидальным законом формирования, и тока дугового процесса. Запаздывание импульса в направляющем канале, соответствующее выводам работы [9], в настоящем эксперименте исключено из-за максимального приближения устройства регистрации скорости подачи к месту ведения дугового процесса. Видно некоторый фазовый сдвиг τ между скоростью подачи электродной проволоки и током дугового процесса, а также заметна разница в форме кривой тока сварки при разных значениях параметров c и b .

Выводы

1. Импульсный характер подачи электродной проволоки оказывает существенное влияние на ток дугового процесса, и, как следствие, скорость плавления электродной проволоки, вызывая их колебания.

Mathematical model is considered, describing dependence of the arc process current and the rate of melting of electrode wire on the variable character of its movement in the process of metal-arc welding, in particular, in short-circuiting of the arc gap.

2. Параметры колебаний сварочного тока и скорости плавления электродной проволоки при ее импульсном движении обусловлены как характеристиками импульсов подачи с их периодическим воздействием, так и характеристиками системы источник сварочного тока–дуговой процесс, представляющими собой аperiodический переходный процесс.

3. Полученная математическая модель, описывающая в аналитической форме зависимость между скоростью подачи электродной проволоки и скоростью ее плавления, может быть использована для расчета условий управления переносом электродного металла при целенаправленно задаваемых импульсах, а также для оценки влияния отклонений в скорости подачи, возникающих по различным причинам, на формирование сварного соединения.

1. Воронай Н. М. Параметры режимов и технологические возможности дуговой сварки с импульсной подачей электродной и присадочной проволоки // Автомат. сварка. — 1996. — № 10. — С. 3–9.
2. Лебедев В. А., Мошкин В. Ф., Пичак В. Г. Новые механизмы для импульсной подачи электродной проволоки // Там же. — 1996. — № 5. — С. 39–44.
3. Попков А. М. Об устойчивости системы источника питания — дуга при сварке с систематическими короткими замыканиями дугового промежутка // Свароч. пр-во. — 1980. — № 3. — С. 11–13.
4. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория автоматического регулирования. — М.: Наука, 1972. — 768 с.
5. Анализ технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки / Б. Е. Патон, В. А. Лебедев, В. Г. Пичак и др. // Свароч. пр-во. — 2002. — № 2. — С. 24–31.
6. Диткин В. А., Кузнецов П. И. Справочник по операционному исчислению. — Л.: Гостехтеориздат, 1951. — 255 с.
7. Потатьевский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.
8. Лебедев В. А., Пичак В. Г. Механизированная дуговая сварка в CO_2 с регулируемой импульсной подачей электродной проволоки // Свароч. пр-во. — 1998. — № 5. — С. 30–33.
9. Лебедев В. А. Влияние направляющего канала сварочного полуавтомата на параметры импульсной подачи электродной проволоки // Автомат. сварка. — 1999. — № 2. — С. 45–48.

Поступила в редакцию 20.01.2005