



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ–ДУГА С ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

В. Н. СИДОРЕЦ, канд. техн. наук, **А. М. ЖЕРНОСЕКОВ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложено математическое описание системы источник питания–дуга с плавящимся электродом. Исследованы условия статического существования системы с учетом теплофизических характеристик параметров и изменения вылета электрода.

Ключевые слова: дуговая сварка, плавящийся электрод, численное моделирование процесса, стационарная длина дуги, объект регулирования, статические вольт-амперные характеристики

Создание нового сварочного оборудования для дуговой сварки — источников питания, автоматов и полуавтоматов, а также систем автоматического регулирования и стабилизации процесса — требует всестороннего анализа системы источник питания–дуга с плавящимся электродом.

В этом аспекте остается актуальным математическое описание изменения длины дуги во времени как объекта регулирования, особенно в связи с появлением нового программного обеспечения, например MATLAB Simulink, позволяющего проводить моделирование различного рода электротехнических систем. Важным является математическое описание статической вольт-амперной характеристики устойчивого течения процесса сварки, которая зависит от различных физических свойств материала электрода.

Существующие подходы не совсем четко определяют оптимальные критерии системы источник питания–дуга с плавящимся электродом, поскольку отличаются различными условиями проведения экспериментов [1, 2] и не учитывают особенностей вольт-амперных характеристик устойчивого течения процесса дуговой сварки [3, 4].

В настоящей работе получены дифференциальные уравнения, с помощью которых описана система источник питания–дуга с плавящимся электродом и исследованы условия статического существования этой системы с учетом теплофизических характеристик параметров и изменения вылета электрода.

Динамика плавления электродной проволоки.

Тепловые процессы в плавящемся электроде будем рассматривать при следующих допущениях: этапы нагрева вылета электрода и его плавления достаточно обособлены и взаимодействуют между собой таким образом, что конечные условия нагрева являются начальными условиями плавления; излучением с поверхности электрода на этапе нагрева вылета электрода можно пренебречь; длина зоны плавления по сравнению с вылетом мала; перенос металла мелкокапельный (струйный).

Таким образом, нагрев вылета происходит в результате протекания в нем тока. Поступлением энергии путем теплопередачи с зоны плавления при достаточно высоких скоростях подачи проволоки можно пренебречь.

Тогда согласно закону сохранения энергии, вся мощность, выделяемая от проходящего в вылете тока, идет на увеличение внутренней энергии, т. е. на нагрев:

$$mcdT = Ri^2dt, \quad (1)$$

где m , R — соответственно масса и электрическое сопротивление элементарного участка электрода; c — удельная теплоемкость металла электрода; i — мгновенное значение сварочного тока; dT , dt — приращение соответственно температуры и времени.

Выразим переменные, входящие в выражение (1), через удельные характеристики

$$\gamma xScdT = \rho \frac{x}{S} i^2 dt,$$

где γ — плотность металла электрода; x — длина элементарного участка электрода; S — площадь поперечного сечения электрода; ρ — удельное электрическое сопротивление металла электрода.

В результате получаем дифференциальное уравнение для температуры нагрева вылета

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\rho i^2}{\gamma c S^2} \quad (2)$$

С учетом того, что при выходе из мундштука проволока имеет температуру T_0 , уравнение (2) можно проинтегрировать. В результате

$$T = T_0 + \frac{\rho i^2 (l_w - l)}{\gamma c S^2 v},$$

где l_w — расстояние между мундштуком и изделием; l — длина дуги; v — скорость подачи проволоки.

В зоне плавления электрода имеет место другой баланс энергии. Энергия поступает из приэлектродной области и расходуется только на плавление металла:



$$U_a i = \gamma S v_{пл} \left[c(T_{пл} - T_0) + \lambda - \frac{\rho i^2 (l_w - l)}{\gamma S^2 v_{пл}} \right], \quad (3)$$

где U_a — прианодное (или прикатодное в зависимости от полярности тока сварки) падение напряжения с учетом потенциала выхода электронов из металла; $T_{пл}$ — температура плавления металла; λ — удельная теплота плавления металла; $v_{пл}$ — скорость плавления.

Из уравнения (3) можно найти стационарную скорость плавления электродной проволоки:

$$v_{пл} = \frac{S U_a i + \rho (l_w - l) i^2}{\gamma S^2 [c(T_{пл} - T_0) + \lambda]}.$$

Для нестационарного случая изменение длины дуги описывается дифференциальным уравнением, правая часть которого и есть разность между скоростями плавления $v_{пл}$ и подачи v проволоки:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{S U_a i + \rho (l_w - l) i^2}{\gamma S^2 [c(T_{пл} - T_0) + \lambda]} - v.$$

Динамика электрической цепи с дугой плавящегося электрода. Электрическую цепь, содержащую дугу с плавящимся электродом, можно изобразить с помощью схемы, показанной на рис. 1.

Согласно закону Кирхгофа, напряжение холостого хода источника питания $U_{x.x}$ равно сумме падений напряжений на элементах цепи — активном сопротивлении источника питания и подводящих кабелей R_s , индуктивности источника питания и подводящих кабелей L , активном сопротивлении участка электродной проволоки от мундштука до дуги — и падения напряжения в дуговом промежутке

$$U_{x.x} = R_s i + L \frac{di}{dt} + \rho \frac{l_w - l}{S} i + El + U_{a-к},$$

где E — напряженность электрического поля в столбе дуги, не зависящая от тока; $U_{a-к}$ — сумма приэлектродных падений напряжения на аноде и катоде (в дальнейшем для упрощения записи уравнений под напряжением холостого хода источника питания $U_{x.x}$ будем понимать разность $U_{x.x} - U_{a-к}$).

С учетом приведенного выше система дифференциальных уравнений, с помощью которых описывают динамическую систему источник питания—дуга с плавящимся электродом, имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dl}{dt} = \frac{S U_a i + \rho (l_w - l) i^2}{\gamma S^2 q} - v, \\ \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (U_{x.x} - R_s i - \rho \frac{l_w - l}{S} i - El), \end{cases} \quad (4)$$

где $q = c(T_{пл} - T_0) + \lambda$ — константа, определяющая теплофизические свойства металла электродной проволоки.

Эта система дифференциальных уравнений будет в дальнейшем объектом исследования. Очевидно, что главное ее свойство — нелинейность. Поэтому последовательно применим все этапы ис-

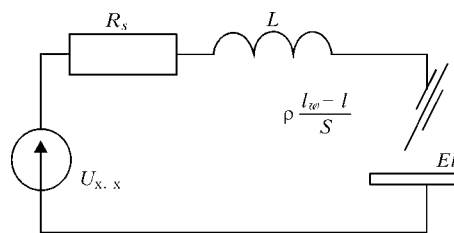


Рис. 1. Электрическая цепь, моделирующая процесс сварки плавящимся электродом

следования подобных систем, первым из которых является исследование особых точек (или точек равновесия).

Статическое состояние системы источник питания—дуга с плавящимся электродом и условия его существования. Для исследования особых точек приравняем правые части уравнений (4) нулю и получим нелинейную систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{S U_a I_0 + \rho (l_w - l_0) I_0^2}{\gamma S^2 q} - v = 0, \\ U_{x.x} - R_s I_0 - \rho \frac{l_w - l_0}{S} I_0 - E l_0 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

относительно координат особой точки I_0 и l_0 .

Из первого уравнения системы (5) можно найти зависимость l_0 от I_0 :

$$l_0 = \frac{\rho l_w I_0^2 + S U_a I_0 - q v \gamma S}{\rho I_0^2}. \quad (6)$$

Подставив эту формулу во второе уравнение системы (5), можно найти выражения, которые определяют зависимость I_0 и l_0 от параметров сварочного процесса и электрической цепи:

$$\rho R_s I_0^3 - (U_{x.x} + U_a - E l_w) I_0^2 + S(E U_a + q v \gamma \rho) I_0 - q v \gamma E S^2 = 0, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \rho E^2 l_0^3 + \rho (q v \gamma \rho - E(2U_{x.x} + U_a + E l_w)) l_0^2 + \dots \\ & \dots + [\rho U_{x.x} (U_{x.x} + U_a + 2E l_w) + \\ & + (R_s S + \rho l_w) (E U_a - 2q v \gamma \rho)] l_0 + \dots \\ & \dots + q v \gamma (R_s S + \rho l_w)^2 - U_{x.x} U_a (R_s S + \rho l_w) - \\ & - \rho U_{x.x}^2 l_w = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Оба эти уравнения являются кубическими и можно показать, что в (7) один положительный корень, а выражение (8) может иметь как положительные, так и отрицательные корни. Исследуем этот вопрос.

С физической точки зрения стационарная длина дуги имеет следующие ограничения: длина дуги должна быть положительна и не может быть больше расстояния между мундштуком и изделием:

$$0 < l < l_w. \quad (9)$$

Выражение (9) можно назвать условием существования процесса сварки плавящимся электродом. Подставляя граничные значения длины дуги из (9) в (7), (8), получаем ограничения на параметры, которые соответствуют данному условию существования



$$qv\gamma(SR_s + \rho l_w)^2 - U_{x,x}U_a(SR_s + \rho l_w) - \rho U_{x,x}^2 l_w = 0,$$

$$qv\gamma SR_s - U_{x,x}U_a + U_a El_w = 0.$$

Условия существования для скорости подачи электродной проволоки следующие:

$$U_{x,x} \frac{SR_s U_a + \rho l_w (U_{x,x} + U_a)}{q\gamma SR_s} > v > U_a \frac{U_{x,x} - El_w}{q\gamma SR_s}. \quad (10)$$

Если максимальная скорость подачи (левая часть выражения), при которой проволока упирается в изделие, достижима всегда, то минимальная скорость подачи (правая часть выражения), при которой электрод плавится до мундштука, возможна либо при достаточно высоких значениях напряжения холостого хода источника питания $U_{x,x} > El_w$ либо при достаточно малых расстояниях от мундштука до изделия $l_w < U_{x,x}/E$.

Направление неравенств в (10) и далее представляется таким образом, чтобы обеспечить соответствие с (9). Здесь и далее численные примеры и рисунки выполнены для электродной проволоки типа Св-08Г2С диаметром 1,6 мм.

На рис. 2, а показаны ограничения по скорости подачи электродной проволоки, выраженные неравенствами (10).

Для параметра сварочного процесса расстояние от мундштука до изделия l_w и условия существования можно представить в виде

$$l_{w \max} > l_w > \frac{U_{x,x}U_a - qv\gamma SR_s}{EU_a}, \quad (11)$$

где $l_{w \max}$ — максимальное удаление мундштука до изделия, при котором возможен сварочный процесс. Это значение можно определить, решив квадратное уравнение

$$qv\gamma\rho^2 l_w^2 - \rho[U_{x,x}(U_{x,x} + U_a) - 2qv\gamma SR_s]l_w + SR_s(qv\gamma SR_s - U_{x,x}U_a) = 0. \quad (12)$$

Физический смысл такого ограничения понятен. При больших вылетах электрода ограничивается ток сварки, что препятствует плавлению. Максимальное расстояние от мундштука до изделия будет

иметь место либо при достаточно большом значении напряжения холостого хода

$$U_{x,x} > \frac{qv\gamma SR_s}{U_a} \quad (13)$$

либо при достаточно малой скорости подачи электродной проволоки

$$v < \frac{U_{x,x}U_a}{q\gamma SR_s}.$$

При невыполнении условия (13) ограничение, которое накладывается правой частью условия (11), не правомерно. В этом случае действует ограничение, накладываемое левой частью этого выражения, принимающей вид $l_{w \min} < l_w < l_{w \max}$, где $l_{w \min}$ и $l_{w \max}$ — значения, которые являются корнями квадратного уравнения (12).

Очевидно также и то, что при достаточно малых напряжениях холостого хода

$$U_{x,x} < 2\sqrt{qv\gamma SR_s} - U_a$$

процесс сварки не возможен.

Проанализируем влияние сопротивления R_s , определяющего наклон внешней характеристики источника питания. Ограничения на сопротивление имеют вид

$$R_{s \max} > R_s > U_a \frac{U_{x,x} - El_w}{qv\gamma S},$$

где $R_{s \max}$ — значение, которое можно вычислить как корень уравнения

$$qv\gamma S^2 R_s^2 + S(2qv\gamma l_w - U_{x,x}U_a)R_s + \rho l_w(qv\gamma l_w - U_{x,x}(U_{x,x} - U_a)) = 0.$$

На рис. 2, б показаны ограничения, накладываемые на сопротивление R_s . Они состоят в том, что при достаточно больших значениях напряжения холостого хода источника питания ($U_{x,x} > El_w$) необходимо обеспечить некоторый наклон внешней характеристики источника за счет введения минимального R_s . При иных условиях процесс неосуществим. В случае очень «жестких» вольт-амперных характеристик источника питания

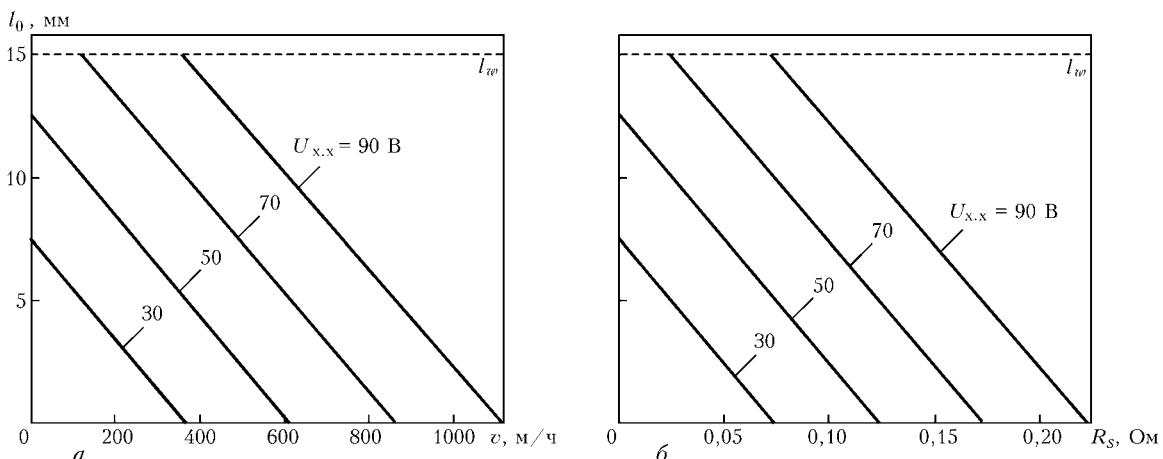


Рис. 2. Зависимость стационарной длины дуги l_0 от скорости v подачи электродной проволоки (а) и сопротивления R_s (б)

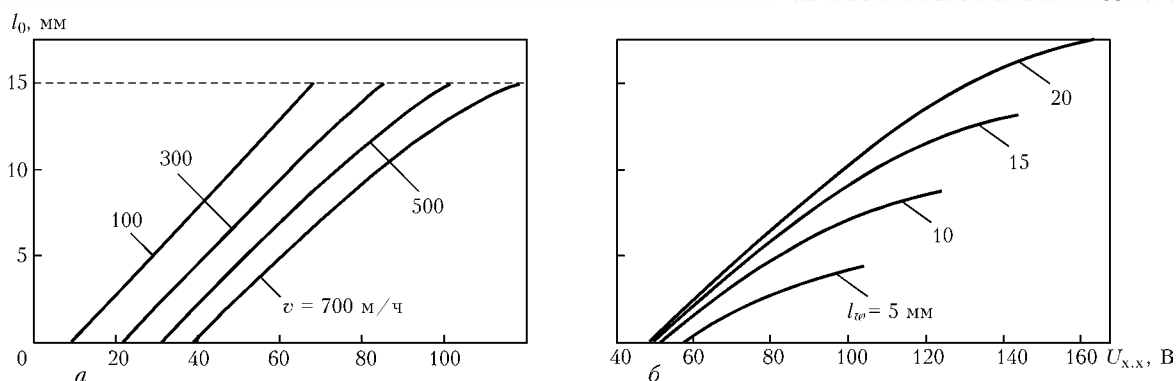


Рис. 3. Зависимость стационарной длины дуги l_0 от напряжения холостого хода $U_{x.x}$ источника при различных скорости v подачи электродной проволоки (а) и расстоянии l_w между мундштуком и изделием (б)

электродная проволока будет плавиться до мундштука.

Напряжение холостого хода является еще одним параметром, характеризующим источник питания. Ограничения, накладываемые на него, имеют вид

$$U_{x.x \min} < U_{x.x} < \frac{qv\gamma SR_s + U_a El_w}{U_a}$$

где $U_{x.x \min}$ — минимальное значение напряжения холостого хода, определяемое из уравнения

$$\rho l_w U_{x.x}^2 + U_a (SR_s + \rho l_w) U_{x.x} - qv\gamma (SR_s + \rho l_w)^2 = 0.$$

На рис. 3 представлены ограничения, которые накладываются на напряжение холостого хода источника при различных технологических параметрах сварочного процесса. Из рис. 3, б видно, что ограничения становятся более «жесткими» при уменьшении расстояния между мундштуком и изделием.

Статическая вольт-амперная характеристика дуги с плавящимся электродом. Стационарное значение длины дуги, исследованное выше, важно при определении статической вольт-амперной характеристики дуги. Это объясняется тем, что эту характеристику, т. е. зависимость напряжения от тока, легче измерить экспериментально. При наших допущениях напряжение на столбе дуги связано с ее длиной соотношением $U_0 = El_0$.

С учетом стационарной длины дуги, определенной формулой (6), выражение для статической вольт-амперной характеристики принимает вид

$$U_0 = E \frac{\rho l_w I_0^2 + S U_a I_0 - qv\gamma S}{\rho I_0^2} \quad (14)$$

Как видно из (14), статическая вольт-амперная характеристика определяется параметрами дуги (E , U_a), электродной проволоки (S , ρ , γ , q) и технологическими параметрами сварочного процесса (v , l_w), но не определяется параметрами электрической цепи ($U_{x.x}$, R_s , L).

Для того чтобы анализ был всесторонним, подробнее остановимся на исследовании общих свойств функции (14).

При выборе масштабов напряжения El_w и тока $S\sqrt{(qv\gamma)/(\rho l_w)}$ выражение (14) можно представить в виде однопараметрической функции

$$u' = 1 + \frac{n}{i'} - \frac{1}{i'^2},$$

где u' и i' — масштабированные значения соответственно напряжения и тока; $n = U_a/\sqrt{qv\gamma\rho l_w}$ — единственный параметр, который объединяет параметры дуги, электродной проволоки и технологические параметры сварочного процесса.

Отметим, что вид этой функции качественно не зависит от параметра n . Максимум лежит всегда выше и правее от пересечения функций уровня единицы, т. е. не входит в область существования, которая на рис. 4 показана жирной линией, при любых значениях параметров.

Таким образом, статическая вольт-амперная характеристика дуги с плавящимся электродом всегда имеет возрастающий характер без экстремумов и существует только в определенном диапазоне токов.

На рис. 5 представлено семейство вольт-амперных характеристик. Из рисунка видно, что условия существования (9), накладываемые на длину дуги, отражаются и на токе статического состояния рассматриваемой системы.

Для дуги плавящегося электрода он может изменяться в пределах:

$$I_{0 \min} < I_0 < \frac{qv\gamma S}{U_a} \quad (15)$$

где $I_{0 \min}$ — минимальный ток дуги плавящегося электрода, значение которого можно определить, решив квадратное уравнение

$$\rho l_w I_0^2 + S U_a I_0 - qv\gamma S^2 = 0. \quad (16)$$

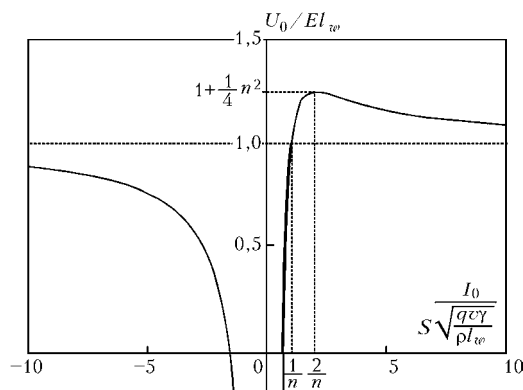


Рис. 4. Общий вид функции u'

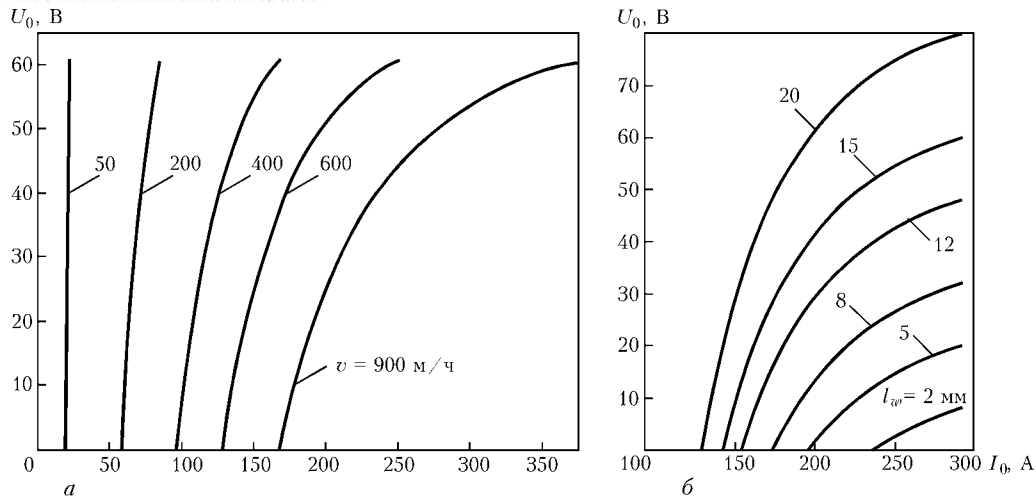


Рис. 5. Статическая вольт-амперная характеристика U_0 дуги с плавящимся электродом при различных скорости v подачи электродной проволоки (а) и расстоянии l_w между мундштуком и изделием (б)

Очевидно, что выражения (15) и (16) могут быть использованы при выборе сварочного тока по параметрам электродной проволоки и технологическим параметрам процесса сварки.

На рис. 6 показано влияние наклона внешней характеристики источника питания на параметры устойчивого процесса сварки. Чем выше напряжение холостого хода, тем больше значение минимального балластного резистора для выполнения условий существования (9). При малых напряжениях холостого хода для обеспечения полного диапазона изменения тока дуги (15) необходимы специальные источники питания с возрастающими внешними характеристиками [1].

В случае применения традиционных источников питания уменьшается диапазон изменения тока дуги: $I_{0 \min} < I_0 < I_{0 \max}$, где $I_{0 \max}$ — максимальный ток дуги плавящегося электрода, значение которого можно определить, решив квадратное уравнение

$$\rho(U_{x.x} + U_a - E l_w) I_0^2 - S(qv\gamma\rho + E U_a) I_0 + qv\gamma E S^2 = 0.$$

Этот случай на рис. 6 соответствует точечным кривым. Максимальную длину дуги, которая соответствует максимальному току, можно определить, решив уравнение

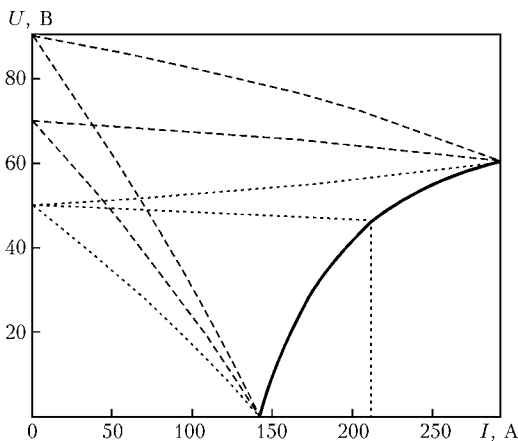


Рис. 6. Статическая вольт-амперная характеристика дуги с плавящимся электродом (сплошные линии) и внешние характеристики источников питания (штриховые и точечные)

$$E^2 l_w^2 + [qv\gamma\rho - E(2U_{x.x} + U_a)] I_0 + U_{x.x}(U_{x.x} + U_a) - qv\gamma\rho l_w = 0.$$

В работах [1, 2] приводится достаточно много экспериментальных статических вольт-амперных характеристик дуги с плавящимся электродом. Они имеют разнообразный вид и плохо поддаются объяснению и обобщению (скорее всего из-за различных условий проведения экспериментов). Проиллюстрируем это несколькими примерами. Можно снимать вольт-амперную зависимость, изменяя ток посредством изменения скорости подачи электродной проволоки. Такой способ наиболее применим у технологов. При этом статические вольт-амперные зависимости будут иметь вид, представленный на рис. 7, а. Их можно описать с помощью следующего выражения:

$$U_0 = E \frac{U_{x.x} S - (R_s S + \rho l_w) I_0}{ES - \rho I_0}.$$

Однако это не является статической вольт-амперной характеристикой дуги с плавящимся электродом. По сути, это внешняя характеристика источника питания с учетом падения напряжения на электродной проволоке. Почти все кривые однотипны, кроме случая малых скоростей подачи электродной проволоки.

На рис. 7, б представлены вольт-амперные характеристики, которые можно получить, изменив ток дуги посредством изменения расстояния между мундштуком и изделием. Формула, описывающая эти кривые, имеет следующий вид:

$$U_0 = U_{x.x} + U_a - R_s I_0 - \frac{qv\gamma S}{I_0}.$$

При больших расстояниях от мундштука до изделия характеристика может проявиться полностью; при малых — только частично, согласно условиям существования. Нередко при эксперименте определяется лишь часть характеристики. Этим, вероятно, и объясняется разброс в экспериментальных данных [1, 2].

Передаточная функция дуги с плавящимся электродом. Предложенная модель позволяет по-



лучить передаточную функцию дуги с плавящимся электродом. Поскольку дуга как элемент электрической цепи является двухполюсником, то передаточная функция может быть представлена сопротивлением

$$W(p) = \frac{\Delta u(p)}{\Delta i(p)},$$

где $\Delta u(p)$ и $\Delta i(p)$ — отображения Лапласа для приростов напряжения и тока дуги. С учетом $U_0 = E l_0$ прирост напряжения пропорционален приросту длины дуги. Для нахождения последнего воспользуемся первым уравнением системы (4). В результате

$$W(p) = E \frac{S U_a + 2\rho(l_w - l_0)I_0}{\rho I_0^2} \frac{1}{\frac{q\gamma S^2}{\rho I_0^2} p + 1} = \frac{1}{\tau p + 1}.$$

Из этой формулы видно, что дуга плавящегося электрода в случае мелкокапельного переноса представляет собой апериодическое звено первого порядка, у которого коэффициент усиления составляет

$$k = E \frac{S U_a + 2\rho(l_w - l_0)I_0}{\rho I_0^2},$$

а характерное время

$$\tau = \frac{q\gamma S^2}{\rho I_0^2}.$$

При различных соотношениях параметров характерное время τ может изменяться от десятков миллисекунд до единиц секунд.

Устойчивость системы источник питания—дуга с плавящимся электродом. Исследования устойчивости этой системы можно разделить на два этапа: изучение ее статического состояния (изложено выше) и ее динамического поведения при малых отклонениях от статического состояния.

Для этого найдем матрицу Якоби для исследуемой системы (4)

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial i} \frac{di}{dt} & \frac{\partial}{\partial l} \frac{di}{dt} \\ \frac{\partial}{\partial i} \frac{dl}{dt} & \frac{\partial}{\partial l} \frac{dl}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} (R_s + \rho \frac{l_w - l_0}{S}) & \frac{1}{L} (\frac{\rho}{S} I_0 - E) \\ \frac{S U_a + 2\rho(l_w - l_0)I_0}{q\gamma S^2} & -\frac{\rho I_0^2}{q\gamma S^2} \end{bmatrix}.$$

в окрестности статического состояния. Тогда характеристическое уравнение находится из условия $\det(J - \eta I) = 0$ и имеет вид (I — единичная матрица)

$$q\gamma L S^3 \eta^2 + S[\rho L I_0^2 + q\gamma R_s S^2 + q\gamma \rho S(l_w - l_0)]\eta + \dots \\ \dots + E U_a S^2 + \rho S I_0 [R_s J_0 - U_a - 2E(l_w - l_0)] - \\ - \rho^2 I_0^2 (l_w - l_0) = 0,$$

где η — собственные значения исследуемой системы.

Исходя из значений корней характеристического уравнения, можно определить характер локальной устойчивости динамической системы. Граничное условие, когда действительная часть собственных значений равна нулю, аналогично условию, когда коэффициент при η равен нулю, в нашем случае:

$$\rho L I_0^2 + q\gamma S^2 R_s + q\gamma \rho S(l_w - l_0) = 0. \quad (17)$$

Поскольку все слагаемые в формуле (17) имеют положительные значения, равенство не выполняется. Таким образом, система локально устойчива при всех сочетаниях параметров и ограничения остаются только для условий существования (9).

Численное моделирование и обсуждение результатов. Для того чтобы изучить динамику и устойчивость системы источник питания—дуга с плавящимся электродом, не ограничиваясь усло-

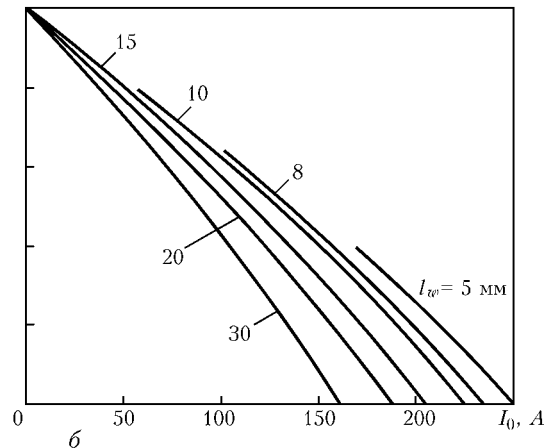
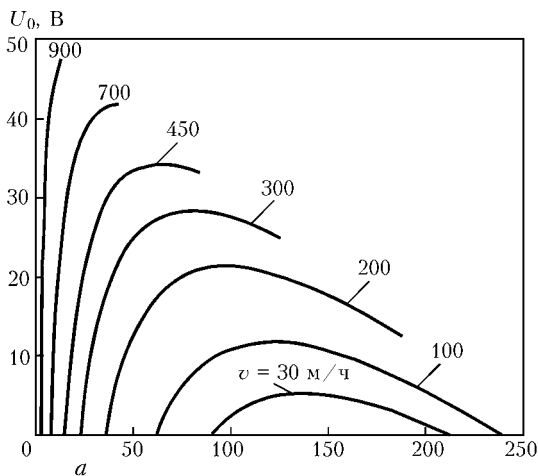


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики, полученные при изменении скорости v подачи электродной проволоки (а) и расстояния l_w между мундштуком и изделием (б)

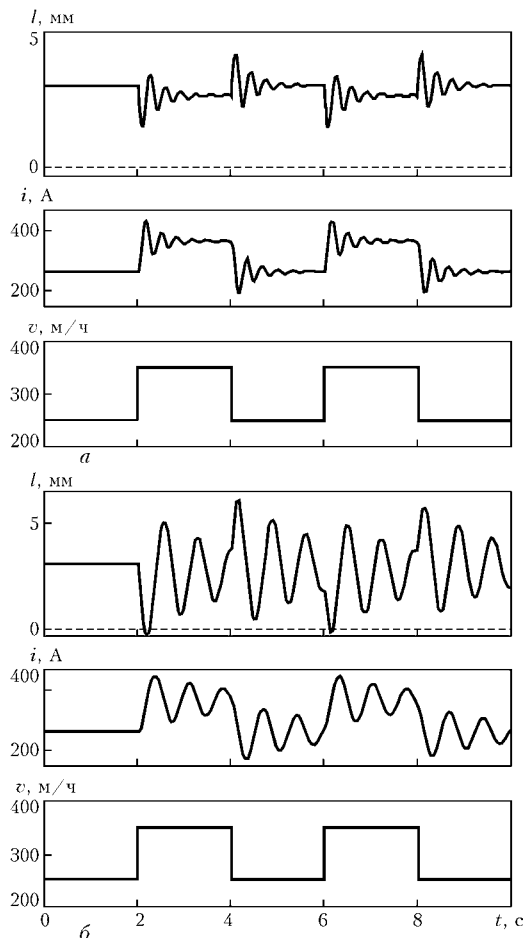


Рис. 8. Осциллограмма обработки возмущений по скорости подачи электродной проволоки системой источник питания–дуга с плавящимся электродом при $U_{x,x} = 55$ В, $R_s = 0,05$ Ом, $L = 1 \cdot 10^{-2}$ (а) и $5 \cdot 10^{-2}$ Гн (б)

виями локальности, предложенная модель (4) перенесена в программную математическую среду MATLAB Simulink. Были получены временные зависимости для переходных процессов. В качестве тестового рассмотрен случай возмущения системы по скорости подачи электродной проволоки. Исследования подтвердили правомерность сделанных выше выводов о локальной устойчивости системы. Хотя дуга плавящегося электрода является аperiodическим звеном, в составе электрической цепи она может иметь колебательный характер, особенно при больших значениях индуктивности L дросселя сварочной цепи и малых значениях балластного резистора R_s .

На рис. 8 показано, как система источник питания–дуга с плавящимся электродом обрабатывает

возмущение по скорости подачи электродной проволоки. Необходимо отметить, что при стационарной длине дуги колебательный процесс может привести к невыполнению условия существования дуги (9) в динамике (см. рис. 8, б), а это в свою очередь — к закорачиванию дугового промежутка и нарушению сварочного процесса.

Период (до 1 с) и амплитуда (десятьки ампер) колебаний тока дуги при переходном процессе достаточно велики и могут стать причиной ухудшения качества сварного шва. Повлиять на эту ситуацию трудно. Индуктивность дросселя должна быть достаточно большой, чтобы сгладить выпрямленный ток. Увеличение сопротивления приводит к ухудшению энергетических характеристик процесса сварки, а также массогабаритных характеристик источника питания.

Один из выходов в данной ситуации — это применение обратных связей по напряжению и току дуги и замена процесса сварки на постоянном токе импульсно-дуговой сваркой.

Выводы

1. Предложенная модель системы источник питания–дуга с плавящимся электродом позволяет определить параметры процесса сварки и длину дуги, при которых процесс сварки осуществим.
2. Статическая вольт-амперная характеристика дуги с плавящимся электродом имеет возрастающий характер и существует в определенном диапазоне токов.
3. Полученная передаточная функция дуги показывает, что сварочную дугу с плавящимся электродом в случае мелкокапельного переноса можно рассматривать как аperiodическое звено первого порядка.
4. Локальная устойчивость не гарантирует нормальной обработки возмущений, возникающих в системе источник питания–дуга с плавящимся электродом. Возможно нарушение условий существования в динамике, т. е. при переходном процессе.

1. *Сварка в углекислом газе* / И. И. Заруба, Б. С. Касаткин, Н. И. Каховский, А. Г. Потапьевский. — Киев: Техника, 1966. — 291 с.
2. *Потапьевский А. Г.* Сварка в защитных газах плавящимся электродом. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.
3. *Варуха Е. Н., Докторский Р. Я.* Расчет скорости плавления электрода при механизированной сварке // Свароч. пр-во. — 1991. — № 6. — С. 33–35.
4. *Цыбулькин Г. А.* К вопросу об устойчивости процесса дуговой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 2002. — № 5. — С. 17–19.

A mathematical description of the power source — consumable-electrode arc system is proposed. Conditions of static existence of the system are studied, allowing for the thermophysical characteristics of the parameters and variation of electrode stick-out

Поступила в редакцию 20.05.2004,
в окончательном варианте 05.07.2004