



МЕТОДИКИ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧИ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ

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

Проанализирован ряд известных методик выбора основных параметров механизмов импульсной подачи электродной проволоки. Приведены методики расчета параметров импульсного управления переносом электродного металла, основанные на энергетических характеристиках дугового механизированного процесса и процесса подачи электродной проволоки. Доказано, что при выборе параметров импульсного движения электродной проволоки следует учитывать ограничения, определяющие устойчивость дугового процесса с импульсной подачей.

Ключевые слова: дуговая сварка, плавящийся электрод, механизированное оборудование, перенос электродного металла, управление, разбрызгивание, потери, механизм подачи, оптимизация, импульсы

В последнее время наращивается научная база [1] и появляются новые конструкторские разработки [2] для осуществления одного из перспективных способов управления переносом электродного металла при механизированных дуговых процессах сварки с импульсной подачей электрода. Последние технические решения в этом направлении позволяют осуществлять надежную импульсную подачу электродных проволок всех известных типов — сплошных, порошковых (впервые), стальных, из алюминиевых сплавов. Конструкции современных механизмов импульсной подачи таковы, что дают возможность регулировать практически все параметры генерируемых импульсов — частоту, шаг, форму. На основании изложенного выше можно утверждать, что импульсный способ подачи электродной проволоки для управления переносом электродного металла находится в таком техническом состоянии, которое может быть оценено как готовое к применению в дуговом механизированном оборудовании [1].

Целью настоящей работы является оценка известных методик выбора основных параметров импульсной подачи электродной проволоки, а также разработка новых, учитывающих особенности сварки с указанным движением электродной проволоки.

Известно [3], что принудительный перенос капель жидкого металла, образовавшихся на торце электродной проволоки при ее импульсной подаче, происходит за счет инерционных сил, действующих на эту каплю. При этом необходимая для отрыва капли инерционная сила F_0 определяется из соотношения

$$F_0 > F_n + F_p - F_a(\pm F_m), \quad (1)$$

где F_n — сила поверхностного натяжения; F_p — сила реактивного давления паров жидкого металла; F_a — электромагнитная сила; F_m — сила, определяемая массой капли.

После начала плавления электродной проволоки на ее торце образуется капля, с ростом которой изменяются значения сил F_n , F_p , F_a , F_m . При этом каждая из них зависит как от времени существования капли, так и от ряда других физических и теплофизических параметров, т. е. для каждой в том или ином виде справедливо:

$$F_n = \pi r^2 \frac{2\sigma}{R}; \quad F_p = m_n v; \quad F_a = AI^2; \quad F_b = m_{к.о} g, \quad (2)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения капли $\sigma = f(t^0, \gamma)$; t^0 — текущая температура; γ — удельный вес электродного металла; r — радиус электродной проволоки; R — радиус кривизны поверхности капли; m_n — масса металла, испаряющегося с поверхности в единицу времени; v — начальная скорость струи пара; A — коэффициент пропорциональности; I — ток дугового процесса; $m_{к.о}$ — масса капель, отрывающихся при дуговом процессе без импульсной подачи (традиционный способ дуговой сварки плавящимся электродом в защитном газе); g — ускорение в поле земного тяготения.

Кроме того, на некоторые силовые характеристики, определяющие поведение капли электродного металла, большое влияние оказывают состав защитной среды и режим сварки, а значение F_m , кроме того, зависит также от пространственного положения сварки.

При дуговом механизированном процессе с управляемым переносом электродного металла ставят задачу принудительного транспортирования капли в металлическую ванну. Очевидно, что для получения металла шва определенного качества, а также снижения разбрызгивания электродного металла его капли должны иметь определенный размер. Этот размер задают или выбирают исходя из условий возможного минимального пребывания расплавленного металла в зоне горения дуги (во избежание выгорания легирующих элементов) и минимального инерционного воздействия энергии, определяемого также массой капли. Последнее ограничение возникает из-за того, что существующие конструкции механизмов подачи имеют ограниченные возможности требуемого ускорения импульсного движения электродной проволоки.

Определение силовых характеристик, входящих в (1), представляет собой сложную задачу, поскольку следует обязательно учитывать условия (2).

Существует несколько методик выбора параметров механических импульсов, необходимых для принудительного отрыва капли от торца плавящейся проволоки.

Методика, предложенная в работе [4], основывается на том, что условием отрыва капли при сварке с импульсной подачей электродной проволоки может быть соотношение

$$m_{к.з}g' = m_{к.о}g,$$

где $m_{к.з}$ — масса капель, заданная для отрыва, при дуговом процессе с импульсной подачей электродной проволоки; g' — ускорение капли в момент ее отрыва при импульсной подаче проволоки.

Указанная методика не предусматривает вычисления значений характеристик, входящих в (1), что существенно упрощает процедуру нахождения необходимого ускорения проволоки при ее импульсной подаче как одной из основных величин, определяющих требования к механизмам импульсной подачи. Недостатком этой методики является то, что следует иметь данные о времени $t_{к.о}$ отрыва капли электродного металла при традиционном дуговом процессе. В связи с тем, что $t_{к.о}$ также зависит от большого количества параметров и условий (тока, напряжения, состава электродной проволоки и защитного газа, вылета и диаметра проволоки и др.), значение этой величины предлагается определять экспериментально. Из-за значительных объемов проведения необходимых экспериментальных исследований различных дуговых процессов и применения разных материалов указанная методика становится трудоемкой и редко используется на практике для выбора параметров импульсной подачи и разработки механизированного дугового оборудования.

Более совершенной является методика, предложенная в работе [5]. Она дает возможность аналитически исследовать условия принудительного отрыва капли электродного металла. По этой методике определяется условие равновесия капли электродного металла с учетом практически всех известных сил, действующих на нее. Из условия равновесия сил, действующих на элементарную площадь капли при импульсном движении электродной проволоки, выведен некоторый обобщенный критерий Π , представляющий собой отношение лапласова давления в капле к суммарной силе, включающей также силу инерции:

$$\Pi = 2\sigma_{ж}/R_0(g + g')h_0r_{ж} + F_э + F_п,$$

где $\sigma_{ж}$ — поверхностное натяжение жидкого металла капли; R_0 — радиус кривизны в лобовой точке капли; h_0 — осевой размер капли, определяющий объем расплавленного металла, к которому прикладывается инерционная сила при импульсной подаче электродной проволоки; $\rho_{ж}$ — поверхностное натяжение жидкого металла капли.

Определено, что при $\Pi < 8$ в каждом импульсе подачи имеется гарантированный принудительный отрыв электродного металла. По нашему мнению, такой подход может дать более точный результат, но требует проведения большого объема расчетных работ и, кроме того, наличия данных об изменении ряда физических характеристик металла при различных температурах и специфических процессах, протекающих в дуге. При их большом количестве, когда требуется знание параметров импульсной подачи, такая методика весьма трудоемка и, как показывает опыт, на практике не используется.

При исследовании процесса переноса электродного металла принудительными способами надо учитывать, что он имеет следующие виды: принудительный перенос с короткими замыканиями дугового промежутка и без коротких замыканий, аналогичный дуговому процессу с длинной дугой.

В первом варианте процесс принудительного переноса существенно облегчается из-за наличия сил поверхностного натяжения, которые на конечном этапе переноса капли способствуют переходу ее в сварочную ванну. Очевидно, что в этом случае не требуется значительного ускорения импульсного движения электродной проволоки для действия инерционных сил, достаточных для отрыва капли. При этом следует только обеспечить меньшее время существования капли на торце электрода. В случае принудительного переноса электродного металла без коротких замыканий дугового промежутка действие инерционных сил в системе электродная проволока–капля должно превышать совокупность действий тех сил, которые до определенного времени удерживают указанную систему в неразрывном состоянии.

Ранее рассмотренные методы определения инерционных сил как результата действия импульсной подачи электродной проволоки в большей степени относятся к последнему случаю. Очевидно, что такой подход к определению механических управляющих воздействий необходимо признать правильным, однако сложность использования предложенных методик расчета и необходимость учета трудноопределимых параметров заставляют искать более простой способ оценки параметров импульсной подачи, который без особых затруднений можно использовать в конструкторской практике и при определении технологических режимов сварки с механическим импульсным воздействием.

Нами предлагается несколько иной новый подход к решению указанной выше задачи. Он основан на сравнении энергетических затрат, необходимых для отрыва капли электродного металла при стационарной подаче проволоки и принудительном отрыве и переносе капли под воздействием механических импульсов. Для упрощения определения сил, действующих на каплю электродного металла в момент ее образования при стационарной подаче электродной проволоки, представим силы, стремящиеся оторвать каплю электродного металла и удерживающие ее в виде результирующей величины $F_{рез}$, а силы, противодействующие движению капли в металлическую ванну, обозначим $F_{пр}$. При этом, опираясь на электродинамическую природу



отрыва и переноса капель с торца электродной проволоки [6], можно отметить, что силами отрыва указанной капли являются силы пондеромоторные (пинч-эффект) и газодинамического напора. Сила, удерживающая каплю на торце электродной проволоки — это сила поверхностного натяжения, а препятствующая движению капли в металлическую ванну — сила сопротивления среды, которой в дуговом промежутке является поток плазмы, имеющий определенную вязкость и плотность. Очевидно, что совместное действие указанных сил на определенном этапе роста капли обеспечивают ее отрыв и транспортирование в потоке плазмы в металлическую ванну. При этом результирующее действие сообщает капле электродного металла кинетическую энергию $W_э$, которую можно определить в виде

$$W_э = m_{к.э} v_{к.э}^2 / 2, \quad (3)$$

где $m_{к.э}$ — масса капли электродного металла при естественных условиях ее отрыва и переноса; $v_{к.э}^2$ — скорость движения капли электродного металла в потоке плазмы при естественных условиях ее отрыва и переноса.

Отметим, что масса и скорость движения капли электродного металла в традиционном дуговом процессе зависят от ряда характеристик электродных материалов, защитной среды (защитный газ), а также параметров дугового процесса. В работах [7, 8] приводятся аналитические выражения для нахождения скорости движения капли электродного металла после отрыва от торца проволоки. В нашем исследовании воспользуемся достаточно простым способом определения $v_{к.э}$, предложенным в [9]:

$$v_{к.э} = \frac{1}{d_{к.э}} \frac{ka}{1 + \sqrt{cd_{к.э}a}}, \quad (4)$$

где $d_{к.э}$ — диаметр капли электродного металла, переносимой естественным путем при стационарном движении электрода; k, a, c — коэффициенты, вычисляемые по методикам, взятым из работ [9, 10].

Для определения массы капли электродного металла, переносимой естественным путем, можно пользоваться данными из ряда работ, посвященных проблемам сварки в защитных газах. Нами при исследовании были использованы данные работ [10, 11] и др., представленные в таблицах или графически и определяющие искомую массу капли по одному или нескольким параметрам

$$m_{к.э} = f(d_э, I_д, U_д, l_э, \text{материал электродной проволоки, тип защитного газа}),$$

где $d_э, l_э$ — соответственно диаметр и вылет электродной проволоки; $I_д, U_д$ — ток и напряжение дугового процесса.

Для упрощения последующих выводов примем допущения, которые необходимо сделать при исследованиях процессов переноса электродного металла при сварке, часть из них приведены в работах [5, 10]:

форма капли электродного металла, которая переносится естественным путем или при управлении механическими импульсами, имеет неизменную форму, приближающуюся по форме к шару; электродный материал, газовая среда, плазменный поток — параметры, неизменные в цикле переноса и повторяемые на протяжении ряда циклов; плотность металла капли при естественном и принудительном переносе одинаковы.

При механическом управлении переносом значение кинетической энергии, сообщаемой капле, должно быть по крайней мере не меньше того, которое обеспечивает естественный перенос этой капли. Исходя из этого рассуждения и с учетом (3) можно записать следующее соотношение:

$$\frac{m_{к.у} v_{к.у}^2}{2} > \frac{m_{к.э} v_{к.э}^2}{2}, \quad (5)$$

где $m_{к.у}$ — масса капли электродного металла при управляемом переносе; $v_{к.у}^2$ — скорость торца электродной проволоки, при которой происходит принудительный отрыв капли, при управляемом переносе.

В работе [12] приведены характеристики управляемого переноса электродного металла, обеспечивающие низкие его потери и приемлемые формы сварного соединения, за критерий количества металла капли принят их диаметр $d_{к.у}$, при этом его соотносят с диаметром электрода $d_э$:

$$d_{к.у} / d_э = \epsilon, \quad (6)$$

где ϵ — оптимальное число.

Выразим диаметр капли через ее массу и подставим в выражение (5), которое решим относительно искомой величины $v_{к.у}$. При этом с учетом (4) получим

$$v_{к.у} > \sqrt{\frac{d_{к.э}}{d_{к.у}^3} \frac{ka}{1 + \sqrt{cd_{к.э}a}}}. \quad (7)$$

С учетом выражения (6) неравенство (7) можно записать в виде

$$v_{к.у} > \sqrt{\frac{d_{к.э}}{\epsilon d_{к.у}^3} \frac{ka}{1 + \sqrt{cd_{к.э}a}}}. \quad (8)$$

Следует отметить, что (7) и (8) имеют смысл только при условии $d_{к.у} < d_{к.э}$. В противном случае теряется возможность управляемого переноса.

При исследовании импульсной подачи электродной проволоки проведены расчеты необходимого для управляемого переноса ускорения электродной проволоки, обеспечивающего получение $v_{к.у}$ для трех видов сварочных процессов:

- 1) сварка алюминиевой электродной проволокой типа СВАМг в аргоне;
- 2) сварка стальной электродной проволокой типа Св-08Г2С также в аргоне;
- 3) сварка стальной электродной проволокой типа Св-08Г2С в углекислом газе.

При этом поставлено условие $\epsilon = 1,0 \dots 1,2$. Вычисления проводили для наиболее характерных

режимов сварки с использованием указанных проволок диаметрами 1,2 и 1,6 мм.

В результате расчетов определено, что для случая 1) ускорение движения должно составлять 25...35; для 2) — 40...60, а для 3) — 80 м/с² и более. Эти данные не противоречат выводам работы [5] и подтверждены результатами наших экспериментальных исследований [1], что свидетельствует о возможности использования предложенной методики выбора параметров импульсного движения электрода для осуществления управляемого переноса электродного металла.

Указанные расчеты проверены при выполнении сварки на вертикальной поверхности (вертикальные и горизонтальные швы). Во всех этих случаях при управляемом переносе каплей электродного металла получен положительный результат. Очевидно, это можно объяснить тем, что в случае импульсной подачи электрода в положениях, отличных от нижнего, достигается эффект, подобный тому, который имеет место при сварке в нижнем положении со стационарной подачей электродной проволоки. Импульсная подача электродной проволоки обеспечивает уровень энергии отрыва и движения капли, достаточный для преодоления последней силы земного тяготения.

Для получения управляемого переноса электродного металла с принудительными короткими замыканиями достаточно ускорить движение капли электродного металла до ее соприкосновения с ванной и обеспечить ее переход в эту ванну за счет поверхностного натяжения и воздействия возросших электродинамических сил. По нашим оценкам, основанным на экспериментальных исследованиях, ускорение, полученное каплей в этом случае, может быть в 1,5...2,0 раза меньше, чем при отсутствии коротких замыканий.

Нами выполнены расчеты необходимого ускорения торца порошковой электродной проволоки для обеспечения управляемого механическими импульсами переноса каплей. Ввиду того, что в литературе, освещающей исследование дуговых механизированных процессов сварки и наплавки, отсутствует в достаточном объеме информация о ее непосредственном применении в предложенной методике расчета, использованы некоторые опосредованные данные [13], а также сделан ряд допущений, в частности по объемам расплавляющегося электродного металла (соотнеслись указанные объемы оболочек порошковых проволок и объемы проволок сплошного сечения). Результаты этих расчетов, выполненные, например, для наплавочной порошковой проволоки типа ПП-Нп-80Х20РЗТ (ГСП-АН170) диаметром 3,2 мм, показали, что амплитуда ускорения ее импульсной подачи должна составлять не менее 35...45 м/с². Однако экспериментальные работы, проведенные с применением импульсной подачи указанной проволоки, свидетельствуют о том, что ускорение, обеспечивающее принудительный отрыв и перенос каплей электродного металла в ванну, практически в 2 раза меньше, чем расчетное. По нашему мнению, такое расхождение между расчетными и экспериментальными значениями связано с неточностью

данных, используемых в расчетах, а также с тем, что не учитывали возможное изменение характера переноса электродного металла при дуговой сварке с использованием порошковых проволок. На такое изменение в характере переноса электродного металла, в частности образование и дробление капли, указывают данные, приведенные в работе [14], а также данные о составе плазменного потока, формирующегося в условиях плавления шихты специального состава. Вполне очевидно, что требуются дополнительные исследования характера плавления и переноса электродного металла сварочных и наплавочных порошковых проволок. Однако несмотря на существенные расхождения в расчетных и экспериментальных результатах, данные, полученные с помощью предложенной методики, можно использовать для формирования начальных условий выбора механизма импульсной подачи порошковой электродной проволоки.

Ранее нами предлагался метод определения скорости и шага импульсной подачи проволоки для достижения устойчивого дугового процесса [15]. Эта методика основывается на определении скорости подачи v_y при указанном процессе, когда ток в дуге не переходит нулевого значения (что является признаком устойчивости процесса сварки):

$$v_y = \frac{[(I_{\max} - I_1)e^{-t/T_{\Pi}} - \frac{U_{x,x} - U_{k,a} - k_d I_d}{k_{d,c} - 1/k_{n,c}}](k_{d,c} - 1/k_{n,c})}{k_d(1 - k_{\phi})I_d(1 - \cos \omega t)[1 - T_{\Pi}(1 - e^{-t/T_{\Pi}})]}, \quad (9)$$

где k_d — градиент потенциала в столбе дуги; I_d — длина дугового промежутка; $k_{n,c}$ — коэффициент питающей системы, определяемый наклоном внешней вольт-амперной характеристики; $k_{d,c}$ — коэффициент динамического сопротивления дуги; $U_{x,x}$ — напряжение холостого хода; $U_{k,a}$ — падение напряжения в катодно-анодной области; T_{Π} — эквивалентная постоянная времени сварочной цепи; I_{\max} — максимальное значение тока; I_1 — начальное значение тока; k_{ϕ} — коэффициент формы капли; ω — частота перемещения торца электродной проволоки с гармоническим характером движения.

Из (9) можно сделать вывод, что при $t = t_{\Pi}$ (t_{Π} — время цикла) скорость v_d принимает такое значение, при котором ток дуги не переходит через нулевое значение, т. е. выполняется условие устойчивого течения процесса.

Такой прием, учитывающий равенство циклов принудительного переноса электродного металла при сварке с импульсной подачей электрода, позволяет не учитывать форму капли и ее размеры.

Исходя из изложенного выше при подстановке в выражение (9) значения $t < t_{\Pi}$ можно получить $v_y = v_{y,\text{крит}}$, где $v_{y,\text{крит}}$ — критическая скорость импульсной подачи проволоки, при ее повышении процесс теряет устойчивость. Допустимый из условия устойчивости процесса сварки критический шаг импульса подачи электродной проволоки имеет вид

$$S_{\text{крит}} = v_{y,\text{крит}}/2f_{\text{имп}} \text{ или } S_{\text{крит}} = k_{\text{крит}}d_{\text{э}}, \quad (10)$$



где $f_{\text{имп}}$ — частота импульсов подачи электродной проволоки; $k_{\text{крит}}$ — коэффициент взаимосвязи между критическим шагом подачи электродной проволоки и диаметром.

В итоге с учетом (8) и (9) полное условие выбора скорости подачи электродной проволоки $v_{\text{к.у}}$ при ее импульсном движении примет вид

$$\frac{[(I_{\text{max}} - I_1)e^{-t/T_{\text{н}}} - \frac{U_{\text{х.х}} - U_{\text{к.а}} - k_{\text{дл}}I_{\text{д}}}{k_{\text{д.с}} - 1/k_{\text{п.с}}}] (k_{\text{д.с}} - 1/k_{\text{п.с}})}{k_{\text{д}}(1 - k_{\text{ф}})l_{\text{д}}(1 - \cos \omega t)[1 - T_{\text{н}}(1 - e^{-t/T_{\text{н}}})]} > \\ > v_{\text{к.у}} > \sqrt{\frac{d_{\text{к.э}}}{\varepsilon d_{\text{э}}^3} \frac{ka}{1 + \sqrt{cd_{\text{к.э}}a}}}. \quad (11)$$

Неравенство (11) является базовым для выбора основных параметров импульсной подачи проволоки. На его основе с использованием (10) рассчитывается шаг подачи электродной проволоки.

Выводы

1. Механический способ управления переносом электродного металла при дуговой сварке плавящимся электродом в связи с появлением новых разработок механизмов импульсной подачи нуждается в простых и применимых на практике методиках, с помощью которых можно выбрать параметры импульсного движения электродного металла.

2. Предложенная и проверенная практикой методика определения основных параметров импульсного движения электрода, основанная на энергетических соотношениях, может быть использована для получения начальных оценочных значений скорости и ускорения импульсной подачи, которые эффективны при решении задач управляемого переноса электродного металла.

3. При выборе характеристик импульсной подачи необходимо ввести ограничения, определяющие устойчивость дуговых процессов с управляемым переносом электродного металла.

Some known methods for selection of main parameters of the mechanisms for pulsed feeding of electrode wire are analysed. Methods for calculation of parameters of the pulsed control of electrode metal transfer, based on energy characteristics of the mechanised arc and electrode wire feed processes, are considered. It has been proved that parameters of the pulsed movement of electrode wire should be selected with allowance for the limitations determining stability of the arc process with pulsed feeding.

1. 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.
2. Лебедев В. А., Мошкин В. Ф., Пичак В. Г. Новые механизмы подачи электродной проволоки // Автомат. сварка. — 1996. — № 5. — С. 39–44.
3. Дмитриенко В. П., Потатьевский А. Г. Требования к устройствам для импульсной подачи проволоки с механическим управлением переносом электродного металла // Судостроение. — 1982. — № 10. — С. 42–43.
4. Дмитриенко В. П. Расчет скорости перемещения торца электрода при сварке с механическим управлением переносом // Автомат. сварка. — 1979. — № 2. — С. 7–9.
5. Вороний В. П. Параметры режимов и технологические возможности дуговой сварки с импульсной подачей электродной и присадочной проволоки // Там же. — 1996. — № 10. — С. 3–9.
6. Дятлов В. И. Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке // Новые проблемы сварочной техники. — Киев: Техніка, 1964. — С. 167–182.
7. Петров А. В. Перенос металла в дуге и проплавление основного металла при сварке в среде защитного газа // Автомат. сварка. — 1957. — № 4. — С. 7–10.
8. Needham J. C., Cooksey S. J., Milner P. R. Metal transfer in inert gas-shielded arc welding // British Welding J. — 1960. — 7, № 2. — С. 101–104.
9. Ковалев И. М., Акулов А. И. Относительное движение капель электродного металла в потоке плазмы при сварке в защитных газах // Автомат. сварка. — 1969. — № 12. — С. 27–30.
10. Ковалев И. М., Акулов А. И. Размеры и частота переноса капель электродного металла при сварке плавящимся электродом в аргоне // Там же. — 1969. — № 8. — С. 12–17.
11. Потатьевский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.
12. Вороний Н. М., Лаврищев В. Я. Условия переноса электродного металла при сварке в углекислом газе // Автомат. сварка. — 1976. — № 5. — С. 8–11.
13. Походня И. К., Сутель А. М., Шлепаков В. Н. Сварка порошковой проволокой. — Киев: Наук. думка, 1972. — 223 с.
14. Мартин Д. Хусман. Порошковые проволоки — альтернатива штучным электродам и сплошной проволоке // Свароч. пр-во. — 1996. — № 1. — С. 34–38.
15. Дудко Д. А., Лебедев В. А., Мошкин В. Ф., Пичак В. Г. Устойчивость процессов дуговой сварки и наплавки с импульсной подачей электродной проволоки // Там же. — 2000. — № 1. — С. 12–15.

Поступила в редакцию 23.06.2003,
в окончательном варианте 08.01.2004



ОЦЕНКА КРУТИЗНЫ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен способ получения оценки крутизны статической характеристики электрической дуги при сварке плавящимся электродом, базирующийся на использовании результатов косвенных измерений некоторых параметров сварочной цепи.

Ключевые слова: дуговая сварка, плавящийся электрод, статическая характеристика дуги, устойчивость

При роботизированной дуговой сварке плавящимся электродом в защитном газе желательно, как известно, использовать источники сварочного тока с более жесткими внешними характеристиками по сравнению с источниками для ручной сварки. Однако при этом возникают некоторые опасения, связанные с возможным ухудшением устойчивости самого процесса сварки, поскольку условие устойчивости

$$S_a - S_s > -R \quad (1)$$

при определенных значениях S_s может быть нарушено [1].

В неравенстве (1) S_a — крутизна статической характеристики дуги, S_s — крутизна внешней характеристики источника тока, R — суммарное сопротивление сварочной цепи, включая сопротивление подводящих проводов, скользящего контакта в мундштуке горелки и вылета электрода.

Возникшие опасения могли быть сняты при проверке по формуле (1), если бы нам были известны значения крутизны S_a для используемых режимов сварки. К сожалению, значения S_a , как правило, заранее не известны, а их измерение сопряжено с большими трудностями, поскольку при этом необходимо поддерживать длину дуги постоянной, что при плавящимся электроде практически не выполнимо. Можно попытаться получить оценку S_a косвенным путем. С этой целью рассмотрим соотношение для постоянной времени T_s сварочного процесса [2]:

$$T_s = \frac{R_*}{EM} \quad (2)$$

где E — напряженность электрического поля в столбе дуги; M — крутизна характеристики плавления электрода; R_* — обобщенное сопротивление, вычисляемое по формуле

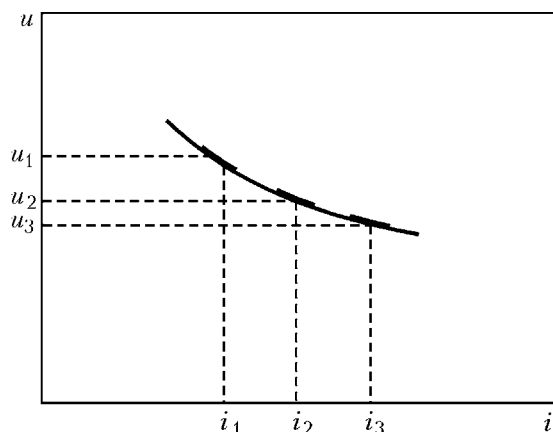
$$R_* = R + S_a - S_s. \quad (3)$$

На основании (2) и (3) можно записать

$$S_a = T_s EM + S_s - R. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что если бы каким-то образом нам удалось определить численные значения параметров T_s , E , M и R при заданном S_s , то по (4) можно было бы рассчитать искомое значение S_a . Рассмотрим такую возможность.

Постоянная времени T_s может быть достаточно точно определена опытным путем, предложенным академиком Б. Е. Патонам в работе [3], суть которого заключается в следующем. Скорость подачи электрода v_e изменяют относительно ее заданного значения v_{e0} по гармоническому закону $v_e = v_{e0} + \Delta v_e \sin \Omega t$ (здесь t — текущее время) с небольшой амплитудой Δv_e и частотой Ω . При этом измеряют напряжение u или ток i дуговой сварки, которые изменяются по тому же закону, но со сдвигом по фазе φ . В частности, согласно [4], $i = i_0 + \Delta i \sin(\Omega t - \varphi)$, где Δi , i_0 — соответственно амплитуда колебаний и постоянная составляющая сварочного тока, $\varphi = \arctg \Omega T_s$. Отсюда



Построение фрагмента статической характеристики дуги по косвенным измерениям

$$T_s = \frac{1}{\Omega} \operatorname{tg} \varphi.$$

Значение параметра M с достаточной точностью находится по формуле

$$M = \frac{\Delta v_e}{\Delta i},$$

сопротивление R можно измерить непосредственно, а значение напряженности электрического поля E для каждого конкретного условия проведения измерений можно взять из таблицы, приведенной, например, в работе [5].

Итак, мы убедились, что числовые значения всех параметров, входящих в (4), могут быть получены достаточно просто, а это означает, что существует принципиальная возможность косвенной оценки крутизны статической характеристики сварочной дуги S_a .

Получив таким образом оценку S_a , можно использовать условие устойчивости (1) и выбрать для роботизированной дуговой сварки допустимый наклон внешней характеристики источника сварочного тока по формуле

$$S_s < S_a + R.$$

Следует заметить, что все измерения для определения S_a по (4) необходимо проводить при одних и тех же параметрах режима сварки. Если необходимо получить представление о самой форме статической характеристики дуги в небольших пределах используемых режимов дуговой сварки, то нужно провести несколько таких же измерений и построить соответствующую кривую. Построение осуществляется следующим образом. В каждой фиксированной точке (i_k, u_k) , где $k = 1, \dots, n$, а n — количество точек (рисунок), под углом $\alpha = \arctg S_a(k)$ к оси i проводится небольшой отрезок (как в известном методе изоклин [6]), затем отрезки соединяют плавной линией. Эта линия как раз и будет почти эквидистантна реальной статической характеристике дуги на измеряемом интервале сварочных токов.



1. Цыбулькин Г. А. К вопросу об устойчивости процесса дуговой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 2002. — № 5. — С. 17–19.
2. Цыбулькин Г. А. О компенсации влияния неустойчивости режима сварки на оценку отклонения электрода от линии соединения свариваемых деталей // Там же. — 1998. — № 4. — С. 50–52.
3. Патон Б. Е. Саморегулирование дуги при сварке плавящимся электродом // Там же. — 1952. — № 1. — С. 38–45.
4. Цыбулькин Г. А. О влиянии скорости изменения вылета электрода и длины дуги на сигнал дугового сенсора // Там же. — 2003. — № 6. — С. 25–29.
5. Ленивкин В. А., Дюргерев Н. Г., Сагиров Х. Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. — М.: Машиностроение, 1989. — 264 с.
6. Каннингхэм В. Введение в теорию нелинейных систем. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. — 456 с.

A method is proposed for assessment of steepness of the static characteristic of an electric arc in consumable electrode welding, which is based on use of the results of indirect measurements of some parameters in the welding circuit.

Поступила в редакцию 19.01.2004

УДК 621.791.793

ВЛИЯНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ

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

Установлено влияние покрытий из $VK15$ и Al_2O_3 на усталостную и кратковременную прочность, пластичность, ударную вязкость стали 45, нержавеющей стали 10X18H10T и титановых сплавов 3В и 3М.

Ключевые слова: углеродистая сталь, нержавеющая сталь, титановые сплавы, детонационное покрытие, прочность сцепления, механические свойства

Возможность использования детонационных покрытий в современном судостроении зависит от антифрикционных свойств [1], высоких показателей прочности сцепления покрытий с основой, низкого уровня пористости [2], наличия промышленных автоматизированных детонационных комплексов «Прометей», «Перун-С» и др. [3, 4].

Тем не менее, применение в судостроении любых видов покрытий, в том числе и детонационных, невозможно без изучения их влияния на конструктивную прочность основного металла.

С этой целью проведено исследование влияния покрытий из $VK15$ и Al_2O_3 на кратковременную прочность, пластичность, ударную вязкость и усталостную прочность стали 45, нержавеющей стали и титановых сплавов 3В и 3М. Толщина покрытия составляла 0,2...0,3 мм. Образцы для механических испытаний и определения ударной вязкости не подвергали шлифовке из-за отсутствия специального профильного алмазного инструмента. Для шлифования образцов с целью определения усталостной прочности изготовлен специальный круг по профилю галтели на образце.

Механические свойства основного металла определяли на образцах НО-8 с диаметром рабочей части 15 мм, изготовленных из всех испытуемых материалов; влияние масштабного фактора оценивали на образцах НО-13 с диаметром рабочей

Таблица 1. Результаты кратковременных испытаний образцов с покрытием и без покрытия

Исследуемый образец	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	$a_n \cdot 10^{-3}$, Дж/м ²
Сплав 3М	<u>664...700</u> 679	<u>607...635</u> 626	<u>13,3...15,7</u> 14,7	<u>35,6...37,7</u> 38,9	<u>10,9...11,4</u> 11,1
Сплав 3М + покрытие Al_2O_3	<u>656...679</u> 671	<u>612...636</u> 624	<u>13,3...16,5</u> 14,7	<u>38,1...41,1</u> 39,0	<u>10,1...10,7</u> 10,5
Сплав 3В	<u>753...762</u> 757	<u>649...747</u> 701	<u>19,2...21,6</u> 20,5	<u>48,9...64,7</u> 51,7	<u>11,7...18,1</u> 12,2
Сплав 3В + покрытие $VK15$	<u>540...695</u> 618	<u>497...681</u> 594	<u>12,8...14,8</u> 14,0	<u>54,7...64,1</u> 58,2	<u>11,7...14,0</u> 12,9
10X18H10T	<u>628...718</u> 669	<u>300...552</u> 420	<u>34,5...51,5</u> 44,0	<u>65,4...70,7</u> 68,8	<u>19,0...21,22</u> 20,0
10X18H10T + покрытие Al_2O_3	<u>624...666</u> 642	<u>581...613</u> 595	<u>35,9...49,9</u> 45,8	<u>65,9...69,7</u> 67,3	<u>20,3...21,9</u> 21,2
10X18H10T + покрытие $VK15$	<u>484...627</u> 567	<u>276...344</u> 300	<u>40,0...68,4</u> 55,1	<u>70,9...76,3</u> 73,5	Не опр.
Сталь 45	<u>650...670</u> 664	<u>361...372</u> 368	<u>21,2...22,7</u> 22,1	<u>42,3...44,7</u> 43,9	<u>2,5...3,5</u> 3,0
Сталь 45 + покрытие Al_2O_3	<u>647...670</u> 657	<u>362...390</u> 369	<u>18,8...21,6</u> 20,9	<u>43,7...45,2</u> 44,5	<u>2,7...3,4</u> 3,1
Сплав 3М (НО-13)	<u>681...701</u> 690	<u>641...670</u> 648	<u>17,2...19,6</u> 18,6	<u>36,8...46,2</u> 41,0	Не опр.
Сплав 3М (НО-13) + покрытие Al_2O_3	<u>624...666</u> 642	<u>581...613</u> 595	Не опр.		

Примечание. В числителе указан разбег значений, в знаменателе — среднее.