

УДК 621.791.754.042.

В.А. ЛЕНИВКИН, Д.В. КИСЕЛЁВ**ОСОБЕННОСТИ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА**

Исследованы особенности саморегулирования плавления электродной проволоки при механизированной сварке в защитной среде аргона и аргоносодержащих смесях. Выявлен механизм циклического изменения тока и напряжения дуги. Определены пути стабилизации плавления электродной проволоки за счёт применения жёстких статических характеристик питающей системы и увеличения положительного наклона статической характеристики дуги.

Ключевые слова: сварка, плавящийся электрод, саморегулирование плавления электрода, стабильность электрических параметров режима.

Введение. При сварке в аргоне и аргоносодержащих смесях наилучшее формирование шва достигается при сварке длинной дугой с мелкокапельным или струйным переносом электродного металла на токах близких или выше критических, [1]. Однако при сварке на таких токах наблюдается отклонения тока и напряжения дуги при неизменной настройке питающей системы и неизменной скорости подачи электрода. Это приводит к нарушению струйного переноса металла с переходом на смешанный – струйный с отдельными крупными каплями. Такой характер переноса металла нарушает равномерность формирования шва и его проплавление.

Постановка задачи. В задачу данной работы входило исследование процесса плавления электрода при механизированной сварке плавящимся электродом в аргоне и аргоносодержащих смесях и определение путей стабилизации процесса механизированной сварки в защитных газах, обеспечивающих равномерность плавления электрода.

Методы испытаний. Исследования проводились при наплавке валиков на пластины из стали 20 проволокой Св 08Г2С диаметром 1,2 мм. Электрические параметры процесса сварки (ток и напряжение) регистрировали запоминающим электронным осциллографом, поведение дуги и её внешний вид (форма), образование капли на электроде и перенос металла в дуге фиксировались скоростной видеокамерой со скоростью 2000 кадров в секунду.

Для определения путей стабилизации параметров режима сварки в аргоне и аргоносодержащих смесях рассмотрен характер саморегулирования процесса при сварке длинной дугой. Саморегулирование (самовыравнивание) дуги при сварке плавящимся электродом – это свойство системы восстанавливать устойчивое энергетическое состояние после выхода её из равновесия под действием возмущений без применения специальных регулирующих устройств. Такое восстановление равновесия становится возможным благодаря зависимости скорости плавления электрода от тока и напряжения на дуге, изменяющихся под действием возмущений, и непрерывному удалению расплавленного металла с торца электрода. Дуговая сварка с саморегулированием – это процесс, осуществляемый с постоянной скоростью подачи электрода; при этом различают саморегулирование дуги и дуговую сварку с саморегулированием процесса [1].

Понятие дуговой сварки с саморегулированием процесса является более общим и включает как процессы с непрерывным горением дуги и удалением расплавленного металла с торца электрода (идеальное саморегулирование), так и с прерывистым горением дуги без непрерывного удаления расплавленного металла с торца электрода в период горения дуги (интегральное саморегулирование).

Под интегральным саморегулированием понимается свойство системы (с постоянной скоростью подачи электрода) «дуга – питающая система» обеспечивать равенство скорости подачи и плавления электрода за цикл в условиях периодического изменения мощности дуги или прерывистого её горения. Периодическое изменение мощности дуги характерно для импульсно-дуговой сварки, сварки модулированным током, а также при сварке в защитной среде аргона и аргоносо-

державших смесях, которые имеют циклический характер изменения электрических параметров режима.

Процесс идеального саморегулирования дуги исследован достаточно полно [2,3,4]. В этих работах установлено, что необходимым условием идеального саморегулирования является непрерывное удаление расплавленного металла с электрода.

Изменение длины дугового промежутка l_d определяется уравнением

$$dl_d/dt = V_э - V_n. \quad (1)$$

где $V_э$ – скорость плавления электрода; V_n – скорость подачи электродной проволоки.

При капельном переносе металла, который наблюдается при сварке в аргоне на докритическом токе или на закритическом токе со смещенным переносом металла изменение длины дугового промежутка l_d определяется уравнением [5]:

$$dl_d/dt = V_э - V_n - V_k, \quad (2)$$

где V_k – скорость роста капли.

Скорость роста капли является сложной функцией скорости плавления электрода, времени и зависит от большого числа факторов, трудно поддающихся учёту, таких как химический состав материала электрода и газовой среды, поверхностное натяжение, давление дуги на каплю. Указанные факторы существенно влияют на форму капли, изменяют скорость её роста и влияют на неравномерность плавления электрода.

Для оценки влияния роста капли на изменение дугового промежутка в работе [5] введено понятие коэффициента формы капли K_ϕ :

$$K_\phi = (V_э - V_k) / V_э, \text{ или } K_\phi = 1 - K_1.$$

В [5] установлено, что в первый момент после отрыва капли скорость плавления электрода равна скорости роста капли и $K_\phi = 0$, и дуговой промежуток начинает сокращаться со скоростью равной скорости подачи электрода. При большом объеме капли скорость её роста мала, K_ϕ принимает величину близкую к единице. Поэтому в случае идеального саморегулирования процесса, когда расплавленный металл непрерывно удаляется с торца электродной проволоки, K_ϕ равен единице.

Система саморегулирования дуги обеспечивает стабилизацию тока. Стабилизация тока достигается благодаря изменению противо-ЭДС дуги при всех видах внешних возмущений, наблюдаемых при сварке (по длине дуги Δl_d , питающему напряжению ΔU_n , эквивалентному сопротивлению питающей цепи $\Delta R_э$). Величина стабилизации тока Δi_2 определяется крутизной наклона статической характеристики саморегулирования дуги $k_{дс} = dU_p/dI > 0$.

Скорость плавления электрода растёт с увеличением тока и уменьшается с повышением напряжения дуги. Поэтому статические характеристики саморегулирования дуги $U_d = f(I_d)$ при $V_n = \text{const}$ имеют определённую крутизну, обусловленную изменением тепловыделения в вылете электрода.

В работе [1] получены уравнения статических характеристик саморегулирования из условий:

- скорость плавления электрода определяется тепловой мощностью, вводимой дугой в электрод и тепловой мощностью, выделяющейся в вылете электрода от проходящего по нему тока;

- скорость плавления электрода определяется током и напряжением дуги.

Из первого условия:

$$I_d = (1/k_{дс})((k_{дс} - k_{дт}) V_n / k_{ст} + U_d), \quad (3)$$

или

$$I_d = I_3 + U_d / k_{дс}, \quad (4)$$

где $I_3 = (k_{дс} - k_{дт}) V_n / (k_{дс} k_{ст})$, – заданная величина тока; $k_{дс}$ – крутизна наклона статической характеристики саморегулирования; $k_{дт}$ – крутизна наклона статической характеристики дуги; $k_{ст}$ – коэффициент саморегулирования по току.

Из второго условия уравнение статической характеристики саморегулирования процесса при крутизне статической характеристики дуги $k_{дт}=dU_d/dI \neq 0$ принимает вид:

$$I_d = V_n / (k_{ст} + k_{дт} k_{сн}) + k_{сн} U_d / (k_{ст} + k_{дт} k_{сн}), \quad (5)$$

где $I_3 = V_n / (k_{ст} + k_{дт} k_{сн})$; $k_{сн}$ – коэффициент саморегулирования по напряжению.

Точка устойчивой работы системы «дуга – питающая система» (параметры режима сварки I_d , U_d) определяется пересечением вольтамперной характеристики источника питания со статической характеристикой саморегулирования процесса (кривой устойчивой работы).

Энергетические параметры процесса дуговой сварки плавящимся электродом (I_d , U_d) будут оставаться неизменными, если длина дугового промежутка будет оставаться постоянной $l_d = \text{const}$ (статическая характеристика дуги будет проходить через точку с координатами I_d , U_d).

Однако при сварке плавящимся электродом длинной дугой (процесс без коротких замыканий) при неизменной настройке статической характеристики питающей системы и постоянной скоростью подачи электродной проволоки наблюдается циклическое изменение тока и напряжения дуги (рис.1,а и б), которые связаны с изменением длины дугового промежутка (рис.1,в) за счёт неравномерности плавления электрода. Так, для видеокадра 1 внешняя составляющая длины дуги l_d составляет 2,4мм, ток и напряжения, соответствующие этому кадру (точки 1 на осциллограммах тока рис.1,б и напряжения 1,а), составляют 224 А и 25,2 В. С ростом l_d до 6 мм (видеокадр 4) напряжение возрастает до 28,6 В, а ток снижается до 191 А. Это приводит к снижению скорости плавления электрода, что, в свою очередь, влияет на неравномерность формирования шва.

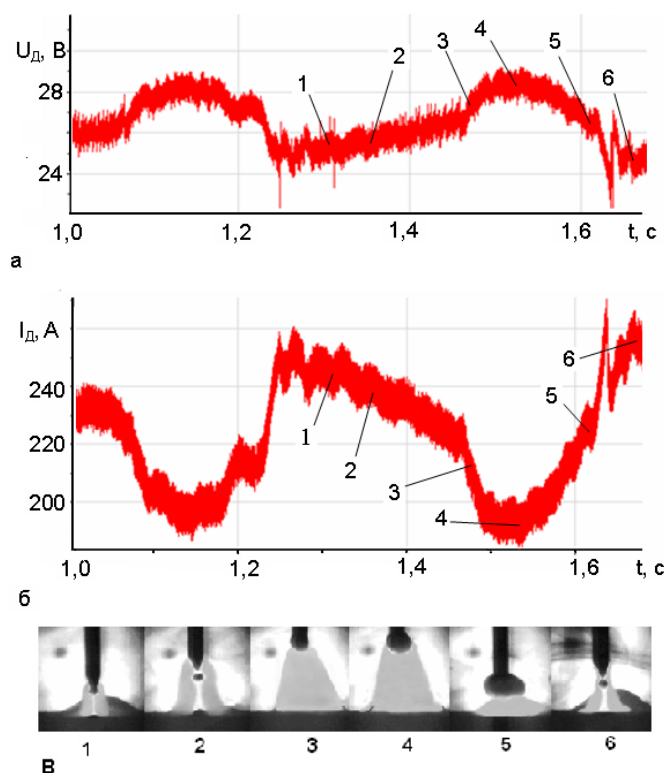


Рис.1. Осциллограммы напряжения (а), тока (б) и кадры видеопictures (в) при сварке в аргоне проволокой Св-08Г2С: полярность тока обратная; V_n – 6 м/мин; 1 – 6 номера видеокадров и соответствующие им точки на осциллограммах тока и напряжения

На рис.2 показано изменение тока и напряжения дуги при возмущении по длине дуги, вызванное неравномерностью плавления электрода. Точка (а) с координатами I_d , U_d (рис.2,а) со-

ответствует заданным устойчивым параметрам режима сварки. Она получается в результате пересечения вольтамперной (статической) характеристики дуги 1 со статической характеристикой саморегулирования (кривой устойчивой работы) 2 при условии, что скорость подачи электрода V_{Π} равна скорости его плавления V_3 . Точка (а) при этом расположена на статической характеристике дуги 3 и соответствует заданной длине дугового промежутка $\ell_{д1}$.

При возмущении по длине дугового промежутка $\Delta \ell_{дr}$, которое связано с неравномерностью плавления электрода, произойдёт отклонение электрических параметров режима на величину Δi_1 и $\Delta U_{дr}$. При увеличении длины дугового промежутка от $\ell_{д1}$ до $\ell_{д2}$ на $\Delta \ell_{дr}$ при неизменном токе $I_{дr}$ произойдёт отклонение напряжения на $\Delta U_{дr}$, которое определяется как:

$$\Delta U_{дr} = k_{д} \Delta \ell_{дr} \quad (6)$$

где $k_{д}$ – градиент потенциала столба дуги.

Для определения величин отклонения тока и напряжения произведем следующее построение. Из точки (а), рис.2,а отложим отрезок ab , равный $\Delta U_{дr}$. Через точку (b) проведем пунктирную линию (3') эквидистантно статической характеристики дуги (3) так, чтобы она пересеклась с кривой устойчивости работы (2) и статической характеристикой питающей системы (1).

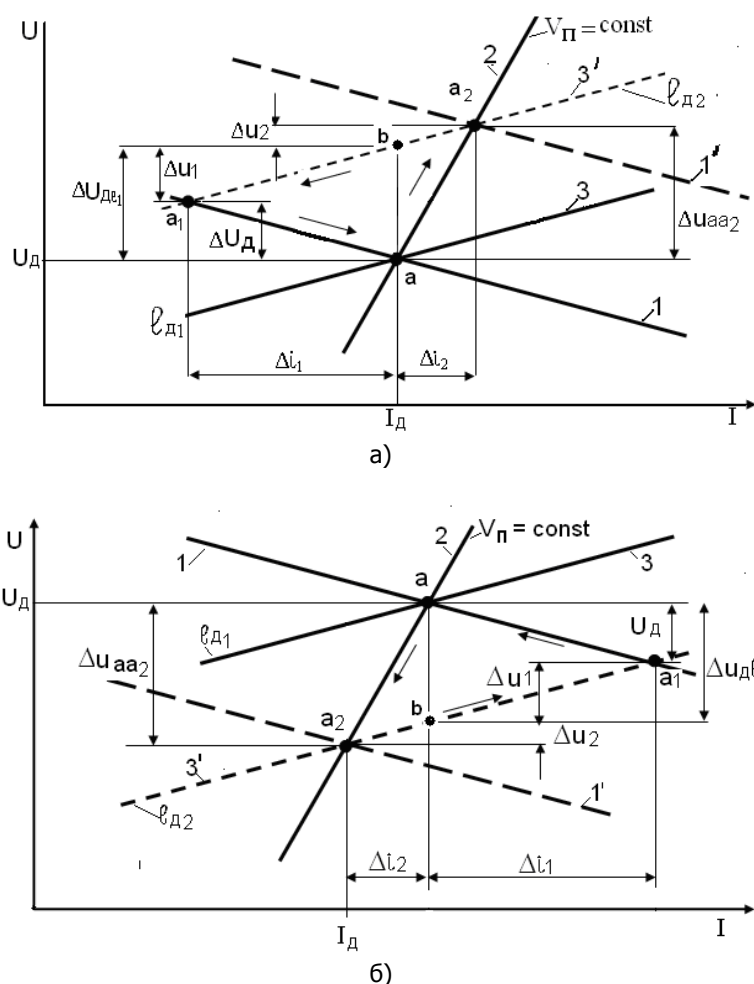


Рис.2. Изменение тока и напряжения дуги при возмущении по её длине:
а – при увеличении длины дуги; б – при уменьшении длины дуги; 1 – статическая характеристика источника питания; 2 – статическая характеристика саморегулирования; 3, 3' – статическая характеристика дуги до и после возмущения

Пересечение характеристик (2) и (3') образуют точку (a_2) устойчивой работы, когда скорость подачи электрода V_n равна скорости его плавления V_n при условии, что через эту точку будет проходить статическая характеристика питающей системы (1') При этом напряжение на дуге возрастёт на величину ΔU_{aa2} , а ток дуги на величину ΔI_{12} . В этом случае процесс сварки с параметрами, соответствующими точке (а), должен переместиться в точку (a_2). Напряжение на дуге возрастёт на величину

$$\Delta U_{aa2} = \Delta I_{12} k_{дс}, \quad (7)$$

а ток на величину

$$\Delta I_{12} = \Delta U_{aa2} / k_{дс}, \quad (8)$$

где ΔI_{12} – отклонение (возмущения) по току при переходе режима от точки (а) к точки (a_2); $k_{дс}$ – крутизна характеристики саморегулирования.

При увеличении длины дугового промежутка от $l_{д1}$ до $l_{д2}$ статическая характеристика дуги (3) перемещается вверх эквидистантно в положение (3'), пересекается со статической характеристикой саморегулирования (2) в точке (a_2) и со статической характеристикой питающей системы (1) в точке (a_1) (рис.2,а). В точке (a_2) будет выполняться условие, при котором скорость подачи электрода равна скорости его плавления в том случае, если статическая характеристика питающей системы (1) займёт положение (1'). При этом напряжение возрастёт на величину ΔU_{aa2} , а ток дуги увеличится на ΔI_{12} . В этом случае процесс сварки с параметрами, соответствующими точке (а), должен переместиться в точку (a_2). Так как положение статической характеристики питающей системы остаётся неизменной при увеличении длины дуги на $\Delta l_{д}$, рабочая точка процесса сварки переходит в точку (a_1). При этом напряжение на дуговом промежутке увеличивается по сравнению с напряжением в точке (а) на величину $\Delta U_{д}$

$$\Delta U_{д} = \Delta I_{11} / k_{пс}, \quad (9)$$

а ток снижается на величину

$$\Delta I_{11} = \Delta U_{д} k_{пс}, \quad (10)$$

где $k_{пс}$ – коэффициент питающей системы dI/dU .

Такое изменение параметров режима на величину $\Delta U_{д}$ и ΔI_{11} приводит к снижению тепловой мощности, расходуемой на нагрев вылета электрода от проходящего по нему тока и дуги, снижению скорости плавления электрода и сокращению дугового промежутка. Таким образом, процесс из точки (a_1) переходит к заданным параметрам режима в точку (а).

При уменьшении длины дуги на $\Delta l_{д}$ от заданной величины (точка а) характер отклонения параметров режима на ΔI_{11} , ΔI_{12} и ΔU_{11} , ΔU_{12} показан на рис.2,б. На рисунке видно, что напряжение на дуге снижается на $\Delta U_{д}$, а величина тока увеличивается на ΔI_{11} . Указанное изменение параметров режима на величину $\Delta U_{д}$ и ΔI_{11} приводит к повышению тепловой мощности, расходуемой на нагрев вылета электрода от проходящего по нему тока и дуги, повышению скорости плавления электрода и увеличению дугового промежутка. Процесс из точки (a_1) переходит к заданным параметрам режима в точку (а).

Проанализируем влияние свойств элементов системы «дуга – питающая система» на величину отклонения параметров режима $\Delta U_{д}$, ΔI_{11} , ΔI_{12} при изменении длины дугового промежутка, вызванного неравномерностью плавления электрода.

На рис.2,а видно, что отклонение напряжения $\Delta U_{д}$ от заданной величины $U_{д}$, с одной стороны, определяется как:

$$\Delta U_{д} = \Delta I_{11} / k_{пс}, \quad (10)$$

с другой стороны,

$$\Delta U_{д} = \Delta U_{aa2} - (\Delta U_{11} + \Delta U_{12}), \quad (11)$$

где U_{aa2} – изменение напряжения на дуге, вызванное переходом в новую устойчивую рабочую точку a_2 за счёт изменения длины дугового промежутка до $l_{д2}$; $\Delta U_{aa2} = \Delta I_{12} k_{дс}$, а $(\Delta U_{11} + \Delta U_{12})$ – изменение напряжения на дуге за счёт изменения тока при постоянной длине дугового промежутка $l_{д2}$:

$$(\Delta U_{11} + \Delta U_{12}) = (\Delta I_{11} + \Delta I_{12}) k_{дт}. \quad (12)$$

Подставив (7) и (12) в уравнение (11), получим:

$$\begin{aligned} \Delta U_d - \Delta i_2 k_{дс} - (\Delta i_1 + \Delta i_2) k_{дт}, \\ \Delta U_d = \Delta i_2 (k_{дс} - k_{дт}) - \Delta i_1 k_{дт}. \end{aligned} \quad (13)$$

Приравняв (10) и (13), получим:

$$\Delta i_1 (1/k_{пс} + k_{дт}) = \Delta i_2 k_d \Delta l_d. \quad (14)$$

Так как

$$\Delta i_2 (k_{дс} - k_{дт}) = \Delta U_d \ell = k_d \Delta l_d,$$

то уравнение (14) примет вид:

$$\Delta i_1 (1/k_{пс} + k_{дт}) = k_d \Delta l_d. \quad (15)$$

Решая (15) относительно отклонения по току, получаем:

$$\Delta i_1 = k_d \Delta l_d k_{пс} / (1 + k_{дт} k_{пс}). \quad (16)$$

Рассчитаем величину отклонения тока Δi_1 по (16) для данных процесса, приведенного на рис.1: $\Delta l_d - 3,6$ мм, $k_d - 1$ В/мм, $k_{пс} - 20$ А/В, $k_{дт} - 0,04$ В/А. Получим расчетное отклонение по току 36 А, что имеет высокую сходимость с экспериментальными данными – 34 А.

Из уравнений (10) и (16) следует, что при применении питающей системы с жёсткой характеристикой, когда $k_{пс}$ стремится к бесконечности, отклонение по напряжению $\Delta U_d \rightarrow 0$, а $\Delta i_1 \rightarrow k_d \Delta l_d k_{пс}$. При применении питающей системы со штыковой характеристикой, когда $k_{пс}$ стремится к нулю, отклонение по напряжению $\Delta U_d \rightarrow \infty$, а $\Delta i_1 \rightarrow 0$.

На рис.3 показаны отклонения параметров режима ΔU_d , Δi_1 и Δi_2 от свойств элементов системы «дуга – питающая система», вызванные неравномерностью плавления электрода. Из рис.3,а следует, что при уменьшении наклона статических характеристик питающей системы 1, 1' при неизменной длине дуги (статическая характеристика дуги 3) отклонение по напряжению $\Delta U_{д1}$ и $\Delta U_{д1}'$ в точках пересечения (a_1) и (a_1') уменьшается, отклонение по току Δi_1 и $\Delta i_1'$ увеличивается.

На рис.3,б показано, что при увеличении наклона статической характеристики дуги (3) и (3') при одном и том же отклонении длины дугового промежутка и при неизменном наклоне статической характеристики питающей системы (2) отклонение по напряжению $\Delta U_{д1}$ и $\Delta U_{д1}'$ в точках пересечения (a_1) и (a_1') уменьшается, одновременно снижается и отклонение по току Δi_1 и $\Delta i_1'$.

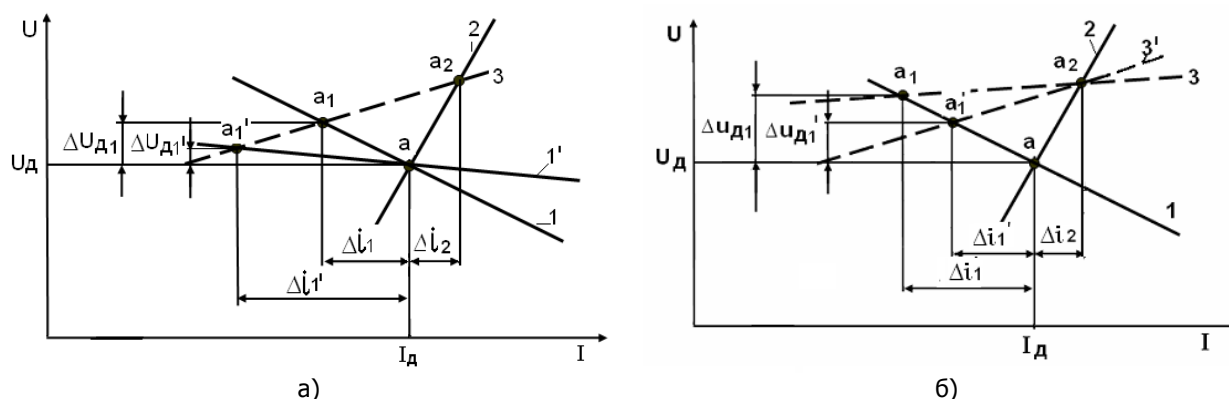


Рис.3. Изменение тока и напряжения дуги при возмущении по её длине:

а – при разных наклонах статических характеристик питающей системы; б – при разных наклонах статических характеристик дуг; 1, 1' – статическая характеристика источника питания; 2 – статическая характеристика саморегулирования; 3, 3' – статические характеристики дуги

По данным [1], крутизна вольтамперной характеристики дуги зависит от материала электрода, защитной среды и увеличивается с ростом длины дуги и диаметра электрода. Так, например, для проволоки марки Св – 08Г2С диаметром 2 мм в диапазоне сварочных токов в CO_2 от 200 до 500 А крутизна вольтамперной характеристики дуги изменяется от 0,036 – 0,045 В/А для длин дуг от 2 до 6,5 мм. Градиент крутизны вольтамперной характеристики дуги в указанном диапазоне составляет 0,002 В/(А мм). При сварке в аргоне проволокой СвАМг61 в диапазоне токов 100 – 500 А для длин дуг от 2,3 до 6,5 мм $k_{дт}$ составляет 0,022 – 0,034 В/А, а градиент крутизны вольтамперной характеристики дуги – 0,0019 В/(А мм). На рис.3,а,б видно, что указанные изме-

нения параметров системы не оказывают влияние на Δi_2 . Из (10), (16) и рис.3 следует, что при механизированной сварке плавящимся электродом в защитных газах высокая стабильность процесса плавления электрода достигается при применении питающей системы дуги с жёсткой характеристикой и большим положительным наклоном характеристики дуги.

Выводы:

1. Саморегулирование плавления электродной проволоки при механизированной сварке с постоянной скоростью её подачи осуществляется за счёт изменения длины дуги, вызванной неравномерной скоростью плавления электрода, путём изменения тепловой мощности, расходуемой на его плавления, за счёт отклонения тока и напряжения дуги.

2. Высокая стабильность процесса плавления электрода при механизированной сварке плавящимся электродом в защитных газах достигается при применении питающей системы дуги с жёсткой статической характеристикой и большим положительным наклоном статической характеристики дуги.

3. Основное влияние на стабильность саморегулирования плавления электрода оказывает коэффициент питающей системы.

Библиографический список

1. Ленивкин В.А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах/ В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
2. Рабинович И.Я. Оборудование для дуговой электрической сварки. Источники питания дуги / И.Я. Рабинович – М.: Машгиз, 1958. – 380 с.
3. Каспржак Г.М. Структура и методика анализа процесса саморегулирования дуги при сварке / Г.М. Каспржак, Л.Е. Алёкин //Автоматическое регулирование дуговой сварки: сб. науч. тр. – М.: АН СССР, 1958.
4. Технология электрической сварки плавлением; под ред. Б.Е. Патона.– Москва – Киев: Машгиз, 1963. – 663 с.
5. Дюргеров Н.Г. Саморегулирование в процессах дуговой сварки: монография / Н.Г. Дюргеров / РГУПС. – Ростов н/Д, 2008. –102 с.

Материал поступил в редакцию 19.10.09.

V.A. LENIVKIN, D.V. KISELYOV

THE SELF-REGULATION FEATURES OF FUSION OF AN ELECTRODE

Features of self-regulation of electrode wire fusion under the machine welding in the protective environment of argon and argon mixtures are investigated.

The mechanism of cyclic changes in the current and arc voltage is revealed.

Ways of stabilization of electrode fusion through the application of rigid static characteristics of feeding system and increase of the positive slope of the static characteristics of the arch are defined.

ЛЕНИВКИН Вячеслав Андреевич (р.1936), профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» ДГТУ (1990), доктор технических наук (1989). Окончил РИСХМ (1963). Область научных интересов: физические и технологические свойства сварочной дуги в защитных газах и системы управления процессами сварки.

Автор более 250 научных трудов, имеет более 40 патентов и изобретений, 2 монографии и 12 учебников.

КИСЕЛЁВ Дмитрий Вадимович (р. 1967), инженер-механик сварочного производства. Окончил ДГТУ (1993).

Область научных интересов: физические и технологические свойства сварочной дуги в защитных газах и системы управления процессами сварки.

Автор 6 научных публикаций.

ddd33@rambler.ru