

УДК 621.791

Д-р техн. наук В. А. Лебедев, С. В. Новиков

ІЭС ім. Е. О. Патона НАН України, г. Київ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ И НАПЛАВКИ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ ВЫЛЕТА ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ

Рассмотрен процесс наплавки как периодический, где в первый полупериод происходит формирование капли, а во второй – процесс короткого замыкания. Аналитически рассчитаны зависимости силы тока от величины длины дугового промежутка и плотности тока от длины дуговой перемычки. Ключевой особенностью данной работы является переменное значение дугового промежутка, меняющееся по периодическому, наперёд заданному закону. Полученные зависимости должны помочь в разработке технологии и оборудования для контроля формирования структурных составляющих и размера кристаллитов в металле наплавляемого валика с применением внешних низкочастотных механических колебаний.

Ключевые слова: периодическое воздействие, наплавка, распределение тока, длина дугового промежутка, длина перемычки.

Процессы дуговой сварки і наплавки по-прежнему являются одними из ведущих технологий при создании различных металлоконструкций, придании ими необходимых служебных свойств, восстановлении изношенных узлов и деталей.

Для повышения технологической прочности в настоящее время широко применяются различные способы сварки и наплавки с периодическим тепловым или механическим воздействием на расплав сварочной ванны. К их числу относятся способы с механическими колебаниями ванны жидкого металла. Для изучения влияния механических колебаний ванны, их характеристик на свойства наплавленных валиков в ИЭС им. Патона НАНУ была разработана установка (рис. 1), где

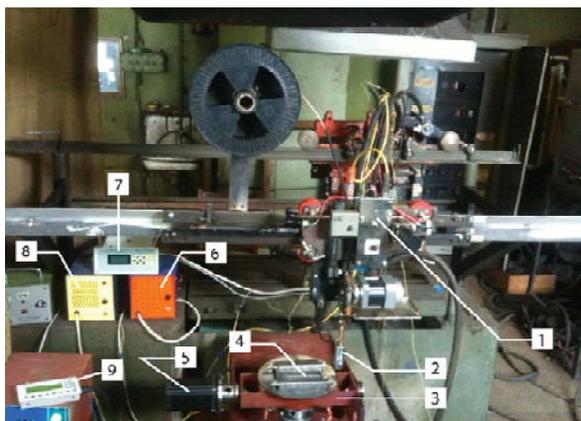


Рис. 1. Схема установки для наплавки с подвижной станиной:

1 – пульт управления перемещения горелки; 2 – горелка; 3 – станина; 4 – наплавляемая деталь; 5 – двигатель, сообщающий колебания станине; 6 – блок питания пульта управления поз.1; 7 – индикатор скорости перемещения горелки; 8 – блок питания двигателя поз. 5; 9 – программируемый пульт управления режима работы двигателя поз. 5

механические колебания ванны осуществляются в 2-х плоскостях (рис. 2). Здесь схема колебаний приводится для понимания принципа колебаний изделия, а следовательно, и самой ванны расплавленного металла.

Осуществляя процесс наплавки на данной установке, можно добиться не только формирования желательной структуры металла шва, но и обеспечить необходимую ширину шва с минимальной глубиной проплавления основного металла.

Целью настоящей работы является получение зависимости силы тока дугового процесса от величины длины дугового промежутка и плотности тока от длины дуговой перемычки, которые дают основание для разработки технологии и оборудования для контроля формирования структурных составляющих и размера кристаллитов в металле наплавляемого валика с применением внешних низкочастотных механических колебаний с управляемыми параметрами.

Как известно, процесс наплавки представляет собой перенос металла сварочной проволоки посредством периодических замыканий между электродом и сварочной ванной. А значит, скорость и устойчивость процесса наплавки будет определяться скоростью формирования и плавления перемычки между электродом и сварочной ванны. Данную величину можно представить зависимостью тока от длины дуги.

Пусть сварочная ванна движется по некоторой дуге вокруг точки A по некоторому периодическому, наперёд заданному закону – $\Psi(t)$. Расстояние от сварочной ванны до точки A также задано и равно a . Тогда длина дугового промежутка l_0 определится выражением [1] (рис. 3):

$$l_0 = \int_0^t \left(V_{nl} - V_{nz} - V_{pk} \pm V_B + a \frac{\partial \Psi(t)}{\partial t} \cos \Psi(t) \right) dt + l_n, \quad (1)$$

где $V_{нл}$ – скорость плавления проволоки, $V_{нэ}$ – скорость подачи электродной проволоки, $V_{рк}$ – скорость роста капли, V_B – скорость точки B – точки пересечения оси электрода с поверхностью ванны, l_H – начальный дуговой промежуток, образовавшийся после разрыва перемычки.

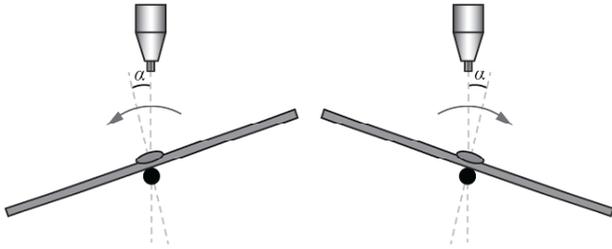


Рис. 2. Принципиальная схема перемещения станины (поз. 3) в процессе колебаний

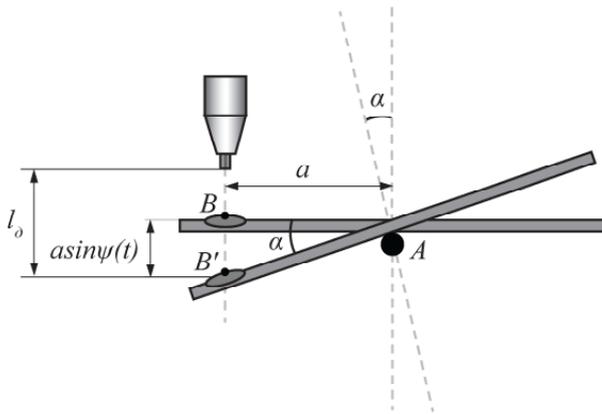


Рис. 3. Иллюстрация к определению длины дуги по уравнению (1)

Скорость изменения дугового промежутка определится из уравнения:

$$\frac{dl_d}{dt} = V_{нл} - V_{нэ} - V_{рк} \pm V_B + a \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \cos \psi(t). \quad (5)$$

Распределение тока по длине дуги до образования перемычки можно определить, считая дугу цилиндром радиуса r , а изменение напряжённости происходящим только вдоль дуги. Тогда значение определится из известного уравнения Гаусса, записанного в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial E}{\partial l_d} = \pi r^2 \int_0^{t_d} I_d dt, \quad (6)$$

где t_d – время горения дуги. Производная по времени от обеих частей равенства преобразует выражение (3) к виду:

$$\frac{\partial \left(\frac{\partial E}{\partial l_d} \right)}{\partial t} = \pi r^2 I_d. \quad (4)$$

Считая, что дуга горит при атмосферном давлении, напряжённость можно определить по формуле [2]:

$$E = 2,05 \cdot 10^8 \frac{U_i^{29} g_e^{\frac{1}{3}}}{I_d^{\frac{1}{3}} a^3}, \quad (5)$$

где U_i [эВ] – потенциал ионизации атомов газа, a – отношение статистических весов ионов и атомов, g_e [м²] – сечение столкновения частиц с электронами (рамзауэровское сечение). Тогда с учётом того, что сила тока является функцией времени и длины дуги, можно написать систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \left(\frac{\partial E}{\partial l_d} \right)}{\partial t} = \pi r^2 I_d \\ E = 2,05 \cdot 10^8 \frac{U_i^{29} g_e^{\frac{1}{3}}}{I_d^{\frac{1}{3}} a^3} \\ \frac{\partial I_d}{\partial t} = \frac{\partial I_d}{\partial l_d} \frac{\partial l_d}{\partial t}. \end{cases} \quad (6)$$

С учетом того, что параметры U_p , a , g_e являются характеристиками дуговой плазмы и являются постоянными величинами, можно ввести постоянную

$$G = 2,05 \cdot 10^8 \frac{U_i^{29} g_e^{\frac{1}{3}}}{a^3} \quad (\text{для } CO_2 [2]: U_i = 14,3 \text{ эВ};$$

$g_e = 25 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$. При наплавке стальной проволокой: $a_{Fe} = 1,55$. Тогда $G \approx 148,95$). Данная система преобразуется в следующее дифференциальное уравнение:

$$\pi r^2 I_d = \frac{4}{9} \frac{G}{I_d^{\frac{7}{3}}} \left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right) \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right) - \frac{1}{3} \frac{G}{I_d^{\frac{4}{3}}} \frac{\partial \left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right)}{\partial t}. \quad (7)$$

Или с учётом $\frac{\partial I_d}{\partial t} = \frac{\partial I_d}{\partial l_d} \frac{\partial l_d}{\partial t}$:

$$\pi r^2 I_d = \frac{4}{9} \frac{G}{I_d^{\frac{7}{3}}} \left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right)^2 \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right) - \frac{1}{3} \frac{G}{I_d^{\frac{4}{3}}} \frac{\partial \left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right)}{\partial t}. \quad (8)$$

Приведенный вид данного уравнения будет таким:

$$\left\{ \frac{\partial \left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right)}{\partial t} - \frac{4}{3} \frac{\left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right)^2 \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right)}{I_d} = - \frac{3 \pi r^2 I_d^{\frac{7}{3}}}{G} \right. \\ \left. 0 < t < t_d \right. \quad (9)$$

Решение которого, определяющее зависимость

$\frac{\partial I_\delta}{\partial l_\delta} \left(\frac{\partial l_\delta}{\partial t} \right)$, будет иметь вид:

$$\frac{\partial I_\delta}{\partial l_\delta} = \frac{3}{2} I_\delta^{\frac{2}{3}} r \sqrt{\frac{\pi}{G \left(\frac{\partial l_\delta}{\partial t} \right)}} \left(\frac{1 + e^{4t_\delta r I_\delta^{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{\pi}{G} \left(\frac{\partial l_\delta}{\partial t} \right)}}}{1 - e^{4t_\delta r I_\delta^{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{\pi}{G} \left(\frac{\partial l_\delta}{\partial t} \right)}}} \right). \quad (10)$$

Данное выражение можно выразить через функцию гиперболического котангенса [3]:

$$\frac{\partial I_\delta}{\partial l_\delta} = -\frac{3}{2} I_\delta^{\frac{2}{3}} r \sqrt{\frac{\pi}{G \left(\frac{\partial l_\delta}{\partial t} \right)}} \operatorname{cth} \left(2t_\delta r I_\delta^{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{\pi}{G} \left(\frac{\partial l_\delta}{\partial t} \right)} \right). \quad (11)$$

Т. к. значения функции гиперболического котангенса при значениях аргумента, лежащего в пределах $(1 \div 2)$, стремятся к 1, а в промежутке $(2 \div \infty)$ – всегда равны 1 (при $(2 \div -\infty)$ - -1), то выражение (11) примет вид:

$$\frac{\partial I_\delta}{\partial l_\delta} = \frac{3}{2} I_\delta^{\frac{2}{3}} r \sqrt{\frac{\pi}{G \left(\frac{\partial l_\delta}{\partial t} \right)}}. \quad (12)$$

С учётом $\frac{\partial I_\delta}{\partial t} = \frac{\partial I_\delta}{\partial l_\delta} \frac{\partial l_\delta}{\partial t}$ выражение (12) можно преобразовать в следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial I_\delta}{\partial t} = \frac{3}{2} I_\delta^{\frac{2}{3}} r \sqrt{\frac{\pi}{G} \left(\frac{\partial l_\delta}{\partial t} \right)}. \quad (13)$$

В случае максимального значения производной $\frac{\partial I_\delta}{\partial t}$ [1]: $\left(\frac{\partial I_\delta}{\partial t} \right)^{\max} = \frac{k_\delta V_c}{R}$, где k_δ [В/м] – градиент потенциала в столбе дуги,

$V_c = \left(V_{n3} \pm a \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \cos \psi(t) \right) (1 - k_{\phi\kappa})$ – скорость сокращения дугового промежутка, $k_{\phi\kappa} = (0,2 \div 0,4)$ – коэффициент формы капли, R – эквивалентное сопротивление системы; значение силы тока определится следующим образом:

$$I_\delta = \left(\frac{2}{3} \frac{k_\delta V_c}{R} \frac{1}{r} \sqrt{\frac{G}{\pi \left(\frac{\partial l_\delta}{\partial t} \right)}} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (14)$$

где значение $\frac{\partial l_\delta}{\partial t}$ определяется выражением (2). В общем случае решение уравнения (13) будет иметь вид:

$$I_\delta = \left(\frac{3}{2} r \sqrt{\frac{\pi l_\delta t_\delta}{G}} \right)^3 - I_{\max}. \quad (15)$$

Здесь t_δ – время горения дуги, а значение I_δ задаётся выражением (1); I_{\max} – ток в момент образования дуги, т. е. сразу после разрыва переключки [1].

Зависимость силы тока, протекающего через переключку от её длины, можно определить при некоторых допущениях [4]: форма переключки цилиндрическая, электрод и сварочная ванна неподвижны, физические свойства металла стационарны.

Т. к. переключка представляет собой стержень цилиндрической формы, то в отсутствии дуги нагрев будет осуществляться за счёт джоулева тепла, тогда уравнение теплового баланса для единицы длины переключки будет иметь вид [5]:

$$c_p F \left(\frac{dT}{dt} \right) = \theta j^2 F. \quad (16)$$

где c_p [Дж/(мм³·К)] – объёмная теплоёмкость стали F [мм²] – площадь поперечного сечения переключки,

θ [Ом·мм] – удельное сопротивление, $\frac{dT}{dt}$ [К/с] – скорость изменение температуры, j [А/мм²] – плотность тока.

Т. к. удельное сопротивление является функцией температуры, его можно выразить посредством закона Видемана-Франца [6]. Тогда, принимая материал переключки изотропным, уравнение (7) примет вид:

$$c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right)^2 \frac{T}{\lambda} j^2, \quad (17)$$

где k [Дж/К] – постоянная Больцмана, λ [Вт/(мм·К)] – коэффициент теплопроводности. Температура и её производная по времени определяется посредством уравнения теплопроводности для стержня [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\lambda}{c_p} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial l_\delta^2} \right) - b(T - T_c), \quad (18)$$

где b [Вт/(мм²·К)] – коэффициент эффективной теплоотдачи. Т. к. время существования переключки составляет примерно $(0,5 - 2,75) \cdot 10^{-3}$ с [4], то можно считать, что потери на теплоотдачу в окружающую среду пренебрежимо малы, тогда с учетом предельного условия, уравнение (18) примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\lambda}{c_p} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial l_\delta^2} \right) \\ 0 < t < t_{\kappa 3} \\ 0 < l < l_n, \end{array} \right. \quad (19)$$

где $t_{кз}$ – время короткого замыкания, l_n – длина пере­мычки, значение которой определяется выражением:

$$l_n = \int_0^{t_{кз}} (V_{nl} - V_{nз} - V_{рк} \pm V_B + a \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \cos \psi(t)) dt. \quad (20)$$

Решение данного уравнения будет таким [7]:

$$T = C_n e^{-\left(\frac{\pi n}{l_n}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{ср}\right)^{t_{кз}} \sin \frac{\pi n}{l_n} l_n}, \quad (21)$$

а производная будет иметь вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left[-C_n \left(\frac{\pi}{l_n}\right) \left(\frac{\lambda}{ср}\right) n^2 e^{-\left(\frac{\pi n}{l_n}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{ср}\right)^{t_{кз}} \sin \frac{\pi n}{l_n} l_n} \right], \quad (22)$$

где n – любое натуральное число, C_n – константа. Под­ставляя (21) и (22) в (17) и выражая j , получится выраже­ние зависимости плотности тока, протекающего через пере­мычку, от её длины $j(l_n)$:

$$j = \left(\frac{срe}{\pi k n}\right) \sqrt{\frac{3I_n}{\pi}}, \quad (23)$$

где l_n определяется уравнением (20).

Выводы

1. Представлен аналитический вывод зависимости величины силы тока от длины дугового промежутка $I_0(l_0)$ в процессе формирования капли и зависимость величины плотности тока от длины пере­мычки – $j(l_n)$.

Величина тока дуги в процессе формирования кап­ли прямо пропорциональна величине длины дугового промежутка. Величина плотности тока, протекающего через металлическую пере­мычку, также пропорцио­нальна длине этой пере­мычки, однако зависимость бо­лее слабая, что видно по значениям показателей степе­ней в выражениях (15) и (23). Кроме длины пере­мычки, ток короткого замыкания зависит от теплофизических

свойств металла. А ток дуги, кроме теплофизических свойств плазмы и длины дуги, зависит также от време­ни горения дуги, что позволяет осуществлять его уп­равление за счёт скоростных режимов подачи прово­локи и наплавки, тем самым осуществляя контроль ко­личества тепла, вводимого в металл, что позволяет не только формировать желаемую структуру, но и форму валика, степень проплавления основного металла и ве­личину разбрызгивания. Таким образом, процесс на­плавки с наложением внешних механических колеба­ний может быть эффективно управляемым в полупе­риод формирования капли. В полупериод короткого замыкания происходит просто перенос количества ме­талла, сформированного за счёт тепла, вложенного в первом полупериоде в каплю. Джоулево тепло опреде­ляет скорость расплавления дуговой пере­мычки, что также можно контролировать.

Список литературы

1. Дюргеров Н. Г. Причины периодических замыканий дугового промежутка при сварке короткой дугой / Дюргеров Н. Г. // Сварочное производство – № 9. – 1974. – С. 1–3.
2. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга Лесков Г. И. – М. : Машиностроение, 1970. – С. 66, 136, 68, 46–47.
3. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления / Фихтенгольц Г. М. – Т 1. – М. : Наука, 1969. – 107 с.
4. Дюргеров Н. Г. О разрыве пере­мычки между электро­дом и сварочной ванной / Дюргеров Н. Г. // Сварочное производство. – № 3. – 1972. – С. 4–6.
5. Теория сварочных процессов / [Волченко В. Н., Ям­польский В. М., Винокуров В. А. и др.] ; под ред. Фро­лова В. В. – М. : Высшая школа, 1988. – С. 223, 151.
6. Физическая Энциклопедия / гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Советская Энциклопедия. – 1998. – Т 1. – 275 с.
7. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / Ти­хонов А. Н., Самарский А. А. – М. : Наука, 1977. – С. 197–199.

Одержано 21.04.2016

Лебедєв В.О., Новиков С.В. Математична модель процесів зварювання і наплавлення з керуваннями змінами вильоту електродного дроту

Наплавлення розглядається як періодичний процес, де в перший напівперіод формується крапля, а в другий – відбувається коротке замикання. Аналітично розраховані залежності сили зварювального струму від величини довжини дугового проміжку та щільності струму від довжини дугової пере­мички. Ключовою відмінністю цієї роботи є змінне значення дугового проміжку, що змінюється за періодичним, наперед заданим законом. Отримані залежності повинні допомогти у розробленні технології та обладнання щодо контролю формування структурних складових та розміру кристалітів у металі наплавленого валика, що отриманий із застосуванням низькочастотних механічних коливань.

Ключові слова: періодичний вплив, наплавлення, розподіл струму, довжина дугового проміжку, довжина пере­мички.

Lebedev V., Novikov S. Mathematical model of welding and surfacing with the managing luffing electrode wire

The process of surfacing as periodic, where formation of drop is going to the first half part of period, and in the second – the process of short circuit is considered. The dependencies of the current from value of arc length interval and the current density from length of arc jumper are calculated analytically. The key feature of this job is variable meaning of arc's interval which is changing by a given periodic law. Obtained dependences must help in develop­ment of technology and equipment for a control of formation of structural components and crystallite size in the metal of surfacing bead, which has been obtained with use the external low-frequency mechanical oscillations.

Key words: periodic influence, surfacing, distribution of current, length of arc interval, length of bridge.