

DOI 10.15589/jnn20170108
УДК 621.791.011:519.87
ЛЗЗ

MATHEMATICAL MODEL OF WELDING AND SURFACING PROCESSES WITH CONTROLLED CHANGES IN THE OUTLET OF THE ELECTRODE WIRE

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

Volodymyr O. Lebediev
office@paton.kiev.ua
ORCID: 0000-0002-0006-3576

Serhiy V. Novikov
e-mail: —
ORCID: —

Stanislav V. Drahan
dragan.welding@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8634-782X

Ivan V. Simutienkov
ivan.simutienkov@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2896-2637

В. А. Лебедев,
д-р. техн. наук¹

С. В. Новиков,
инж.¹

С. В. Драган,
канд. техн. наук²

И. В. Симутенков,
канд. техн. наук²

¹*The E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine*

²*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

¹*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев*

²*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

Abstract. The surfacing process with the use of external mechanical vibrations of low frequency has been presented as a periodic one. In its first semiperiod, a drop is formed, and in the second one, a short circuit of the arc gap takes place. The developed mathematical model of the process allows for a change of the arc gap length in a set periodic law. Analytically, the dependencies of the force of current on the arc gap length and the density of current on the arc bridge length are determined.

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

Аннотация. Процесс наплавки с применением внешних низкочастотных механических колебаний представлен как периодический, в котором в первом полупериоде формируется капля, а во втором — происходит короткое замыкание дугового промежутка. Разработанная математическая модель процесса учитывает изменение длины дугового промежутка по заданному периодическому закону. Аналитически установлены зависимости силы тока от длины дугового промежутка и плотности тока от длины дуговой перемычки.

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

Анотація. Процес наплавлення із застосуванням зовнішніх низькочастотних механічних коливань представлено як періодичний, у якому в першому півперіоді формується крапля, а в другому — відбувається коротке замикання дугового проміжку. Розроблена математична модель процесу враховує зміну довжини дугового проміжку за заданим періодичним законом. Аналітично встановлено залежності сили струму від довжини дугового проміжку й густини струму від довжини дугової перемички.

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

REFERENCES

- [1] Volchenko V. N., Yampolsky V. M., Vinokurov V. A., et al. Ed. Frolov. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, Higher School Publ., 1988. 559 p.
- [2] Dragan S. V., Simutienkov I. V., Yaros Y. A., Trembich V. Y. *Vliyaniye vysokochastotnykh kolebaniy elektroda na geometriyu proplyavleniya pri avtomaticheskoy naplavke pod flyusom* [Influence of high-frequency oscillations of the electrode on the geometry of weld penetration for automatic surfacing under flux]. Shipbuilding and marine infrastructure, 2015, issue 1, pp. 76–86.

- [3] Dyurgerov N. G. *O razryve peremychki mezhdu elektrodom i svarochnoy vannoy* [On the break of the bridge between the electrode and the weld pool]. Welding manufacture, 1972, issue 3, pp. 4–6.
- [4] Dyurgerov N. G. *Prichiny periodicheskikh zamykaniy dugovogo promezhtutka pri svarke korotkoy dugoy* [Reasons for periodic short circuits of the arc gap in short arc welding]. Welding manufacture, 1974, issue 9, pp. 1–3.
- [5] Zaruba I. I. *Elektricheskiy vzryv kak prichina razbryzgivaniya metalla* [Electrical explosion as the cause of metal splashing]. The Paton Welding Journal, 1970, issue 3, pp. 14–18.
- [6] Lebedev V. A., Dragan S. V., Simutenkov I. V. *Vliyaniye vysokochastotnykh kolebaniy elektrodnoy provoloki pri avtomaticheskoy naplavke pod flyusom na svoystva naplavlennogo sloya* [Influence of high-frequency oscillations of the electrode wire on the properties of the surfaced layer for automatic surfacing under flux]. Hardening and coating technology magazine, 2016, issue 5, pp. 17–21.
- [7] Leskov G. I. *Elektricheskaya svarochnaya duga* [Electric welding arc]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ, 1970. 335 p.
- [8] Morozov V. P. *Analiz usloviy formirovaniya izmelchennoy struktury pri kristallizatsii metalla svarochnoy vannы s nalozeniyem vneshnikh periodicheskikh vozmushcheniy* [Analysis of the conditions for the formation of the ground structure at crystallization of the weld pool metal under external periodic disturbances]. Proceedings of the universities magazine, 2006, issue 8, pp 41–54.
- [9] Morozov V. P. *Vliyaniye vneshnego pulsiruyushchego istochnika tepla na rasplavlennyy metall svarnogo shva v protsesse yego kristallizatsii s tselyu effektivnogo upravleniya strukturoobrazovaniyem* [Influence of an external pulsing heat source on the molten weld metal during its crystallization with the purpose of effective control of the structure formation]. Science and Education Electronic Journal, 2010, issue 10. Mode of access: <http://technomag.edu.ru>.
- [10] Potapyevskiy A. G. *Svarka v zashchitnykh gazakh plavyashchimsya elektrodom. Chast 1. Svarka v aktivnykh gazakh. Izdaniye 2-ye, pererabotannoye*. [Welding in shielding gases with a consumable electrode. Part 1. Welding in active gases]. Kyiv, Ekotechnology Publ., 2007. 192 p.
- [11] Ryabtsev I. A. *Naplavka detaley mashin i mekhanizmov* [Surfacing of machine parts and mechanisms]. Kyiv, Ekotechnology Publ., 2004. 160 p.
- [12] Tikhonov A. N., Samarskiy A. A. *Urvneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, Scince Publ., 1977. 735 p.
- [13] Tewari S. P. Effects of Oscillation on Impact Property of Weldments. ISIJ International. 1999, vol. 39 (8), pp. 809–812.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Процессы дуговой сварки и наплавки по-прежнему являются одними из ведущих технологий при создании различных металлоконструкций, придании им 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 числу которых относятся способы с механическими колебаниями ванны жидкого металла. Из множества известных способов периодического влияния можно выделить контактные способы ввода возмущения в ванну, которые предусматривают использование ультразвуковых высокочастотных колебаний сварочной ванны, изделия или электрода, либо механических низкочастотных колебаний изделия или электрода [8, 13].

Для изучения действия характеристик механических колебаний ванны на свойства наплавленных валиков в ИЭС им. Патона НАН Украины разработана установка (рис. 1), позволяющая создавать механические колебания сварочной ванны в двух плоскостях. Приведенная на рис. 2 схема поясняет принцип колебания ванны расплавленного металла путем колебания изделия.

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.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Вследствие изменения длины дугового промежутка при механических колебаниях обрабатываемой детали, и, следовательно, сварочной ванны или сварочного инструмента меняются сила и плотность тока в дуговом промежутке, определяющие тепловложение в сварочную ванну, что влечет за собой модификацию структуры металла, размеров шва, остаточных деформаций и напряжений в зоне сварки или наплавки [2, 9, 15]. Однако в литературе отсутствуют сведения о зависимостях, позволяющих установить связь между силой тока и длиной дугового промежутка, и плотностью тока и длиной дуговой перемычки при воздействии внешних механических колебаний.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — разработка математической модели процесса дуговой наплавки с внешними низкочастотными механическими колебаниями с управляемыми параметрами, прикладываемыми к сварочному инструменту или обрабатываемой детали, для установления зависимости силы тока дугового процесса от длины дугового промежутка и плотности тока от длины дуговой перемычки.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Как известно [10, 11], процесс наплавки представляет собой перенос металла сварочной проволоки посредством периодических замыканий между электродом и сварочной ванной. Параметры процесса наплавки — скорость и устойчивость — определяют

ся скоростью формирования и плавления перемычки между электродом и сварочной ванны. Величину этой скорости можно найти, исходя из зависимости силы тока от длины дуги.

В случае колебаний сварочной ванны по схеме на рис. 2 формированием капли можно управлять при увеличении длины дуги выше некоторого предельного значения (например, для наплавки в CO_2 это значение равно 4 мм), когда запускается механизм саморегулирования длины дуги, т. е. увеличиваются скоростной и энергетический режимы подачи и плавления электродной проволоки.

Рассмотрим процесс наплавки с изменяющейся длиной дугового промежутка. Пусть сварочная ванна движется по дуге вокруг точки A (рис. 3) по некоторому периодическому, наперед заданному закону — $\psi(t)$. Расстояние от центра сварочной ванны до точки A также известно и равно a . Тогда изменение длины дугового промежутка Δl_d рассчитывается выражением [7]:

$$\Delta l_d = \delta e^{\frac{t_d}{\theta}}, \quad (1)$$

где δ — величина превышения предельной длины дуги, равной 4 мм; t_d — время горения дуги в процессе саморегулирования; θ — постоянная саморегулирования дуги.

Величина $\delta = a \cdot \text{tg} \psi(t)$ задаётся через частотные характеристики колебания ванны, а θ — определяется вольт-амперной характеристикой источника питания и интенсивностью плавления электродной проволоки. Чем меньше величина θ , тем быстрее дуга восстанавливает свою первоначальную длину.

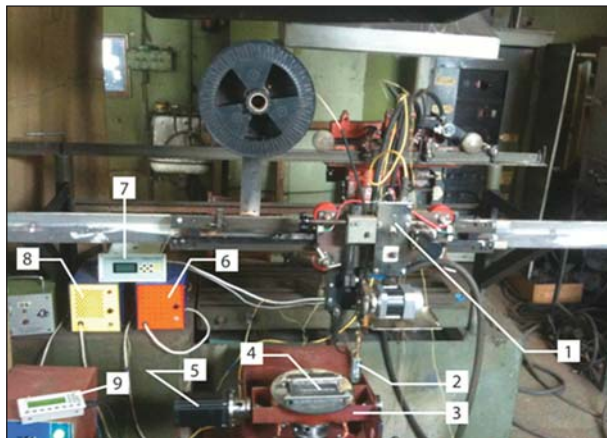


Рис. 1. Схема установки для наплавки с подвижной станиной:

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

Закон распределения тока по длине дуги до образования перемычки можно охарактеризовать, принимая модель дуги в виде цилиндра радиусом r , а изменение напряженности — происходящим только вдоль дуги. Тогда, значение напряженности электрического поля дуги определится из известного уравнения Гаусса, записанного в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial E}{\partial l_d} = \frac{1}{\pi r^2 l_d \epsilon_0} \int_0^{l_d} I_d dt, \quad (2)$$

где t_d — время горения дуги, с; $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ — электрическая постоянная, Кл / В·м. Производная по времени от обеих частей равенства (2) преобразует его к виду:

$$\frac{\pi r^2 l_d \epsilon_0 \partial \left(\frac{\partial E}{\partial l_d} \right)}{\partial t} = I_d. \quad (3)$$

Считая, что дуга горит при атмосферном давлении, напряженность поля можно рассчитать по формуле [7]:

$$E = 2,05 \cdot 10^8 \frac{U_i^{29} g_e^{12} \chi^{\frac{1}{3}}}{I_d^{\frac{1}{3}} \chi^{\frac{1}{3}}}, \quad (4)$$

где U_i — потенциал ионизации атомов газа, эВ; χ — отношение статистических весов ионов и атомов; g_e — сечение столкновения частиц с электронами (рамзауэровское сечение), м². Тогда, учитывая, что сила тока является функцией времени и длины дуги, можно составить систему уравнений:

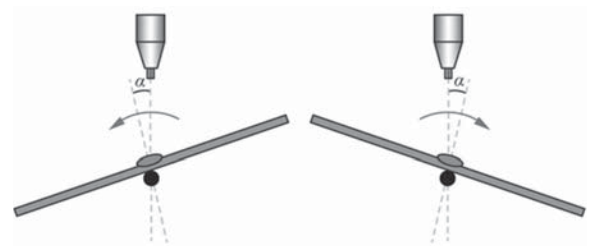


Рис. 2. Принципиальная схема перемещения станины (поз. 3 на рис. 1) в процессе колебаний

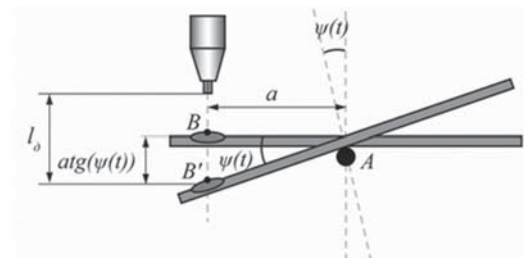


Рис. 3. К определению изменения длины дуги по уравнению (1)

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\pi r^2 l_d \varepsilon_0 \partial \left(\frac{\partial E}{\partial l_d} \right)}{\partial t} &= I_d; \\ E &= 2,05 \cdot 10^8 \frac{U_i^{12} g_e^{\frac{1}{3}}}{I_d^{\frac{1}{3}} \chi^{\frac{1}{3}}}; \\ \frac{\partial I_d}{\partial t} &= \frac{\partial I_d}{\partial l_d} \frac{\partial l_d}{\partial t}. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Принимая характеристики данной дуговой плазмы U_i , χ , g_e величинами постоянными, введем некоторую константу $G = 2,05 \cdot 10^8 \frac{U_i^{12} g_e^{\frac{1}{3}}}{\chi^{\frac{1}{3}}}$. Ее значение

при наплавке стальной проволокой в CO_2 составляет $G \approx 148,95$. (Здесь принято: $U_i = 14,3$ эВ; $g_e = 25 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ [7]; $\chi_{Fe} = 1,55$). Тогда система уравнений (5) преобразуется в следующее дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{I_d}{\pi r^2 \varepsilon_0} &= \frac{4}{9} \frac{G l_d}{I_d^{\frac{7}{3}}} \left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right) \left(\frac{\partial I_d}{\partial t} \right) - \\ &- \frac{1}{3} \frac{G l_d}{I_d^{\frac{4}{3}}} \frac{\partial \left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right)}{\partial t} - \frac{G}{3 I_d^{\frac{4}{3}}} \left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right) \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{I_d}{\pi r^2 \varepsilon_0} &= \frac{4}{9} \frac{G l_d}{I_d^{\frac{7}{3}}} \left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right)^2 \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right) - \\ &- \frac{1}{3} \frac{G l_d}{I_d^{\frac{4}{3}}} \frac{\partial \left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right)}{\partial t} - \frac{G}{3 I_d^{\frac{4}{3}}} \left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right) \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

В приведенном виде уравнение (7) запишем так:

$$\left\{ \begin{aligned} &\frac{\partial \left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right)}{\partial t} - \frac{4}{3} \frac{\left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right)^2 \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right)}{I_d} + \\ &+ \frac{1}{l_d} \left(\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \right) \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right) = - \frac{3 I_d^{\frac{7}{3}}}{G l_d \pi r^2 \varepsilon_0}, \end{aligned} \right. \quad (8)$$

$0 < t < t_d$.

Решение этого уравнения, определяющим зависимость $\frac{\partial I_d}{\partial l_d} \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right)$, найдем в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_d}{\partial l_d} &= \sqrt{\left(\frac{3}{8} \frac{I_d}{\Delta l_d} \right)^2 + \frac{9}{4} \frac{I_d^{\frac{10}{3}}}{G \pi r^2 l_d \varepsilon_0 \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right)}} \times \\ &\times \frac{1 + e^{\left(\frac{8 \frac{\partial l_d}{\partial t} t_d}{3 \frac{\partial I_d}{\partial l_d} I_d} \sqrt{\left(\frac{3}{8} \frac{I_d}{\Delta l_d} \right)^2 + \frac{9}{4} \frac{I_d^{\frac{10}{3}}}{G \pi r^2 l_d \varepsilon_0 \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right)}} \right)}}{1 - e^{\left(\frac{8 \frac{\partial l_d}{\partial t} t_d}{3 \frac{\partial I_d}{\partial l_d} I_d} \sqrt{\left(\frac{3}{8} \frac{I_d}{\Delta l_d} \right)^2 + \frac{9}{4} \frac{I_d^{\frac{10}{3}}}{G \pi r^2 l_d \varepsilon_0 \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right)}} \right)}}, \end{aligned} \quad (9)$$

или, выражая его через функцию гиперболического котангенса,

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_d}{\partial l_d} &= - \sqrt{\left(\frac{3}{8} \frac{I_d}{\Delta l_d} \right)^2 + \frac{9}{4} \frac{I_d^{\frac{10}{3}}}{G \pi r^2 l_d \varepsilon_0 \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right)}} \times \\ &\times \text{cth} \left(\frac{4 \frac{\partial l_d}{\partial t} t_d}{3 \frac{\partial I_d}{\partial l_d} I_d} \sqrt{\left(\frac{3}{8} \frac{I_d}{\Delta l_d} \right)^2 + \frac{9}{4} \frac{I_d^{\frac{10}{3}}}{G \pi r^2 l_d \varepsilon_0 \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right)}} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Учитывая, что значения функции гиперболического котангенса при значениях аргумента в пределах $1 \dots 2$ стремятся к 1, а в промежутке $2 \dots \infty$ — всегда равны 1 (в промежутке $2 \dots \infty$ равны — 1), выражение (10) преобразуем к виду:

$$\frac{\partial I_d}{\partial l_d} = - \sqrt{\left(\frac{3}{8} \frac{I_d}{\Delta l_d} \right)^2 + \frac{9}{4} \frac{I_d^{\frac{10}{3}}}{G \pi r^2 l_d \varepsilon_0 \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right)}}. \quad (12)$$

В полученной формуле первое слагаемое под радикалом характеризует изменение тока в зависимости от длины дугового промежутка за время роста капли. На этом основании зависимость силы тока от длины дугового промежутка определим из следующего уравнения:

$$\frac{\partial I_d}{\partial l_d} = \left(\frac{3}{8} \frac{I_d}{\Delta l_d} \right). \quad (13)$$

Отсюда

$$I_d = I_{кз} - D \Delta l_d^{\frac{3}{8}}, \quad (14)$$

где $I_{кз}$ — ток короткого замыкания, А; Δl_d — изменение длины дугового промежутка, м (см. уравнение (1)); D — коэффициент пропорциональности, А/м, полученный экспериментально в зависимости от силы тока сварки.

Второе слагаемое в (12), представляющее собой величину производной в момент электрического взрыва (газодинамического удара) металлической перемычки, позволяет определить соответствующую величину тока $I^{эв}$ из уравнения:

$$\frac{\partial I^{эв}}{\partial l_d} = \sqrt{\frac{9}{4} \frac{(I^{эв})^{\frac{10}{3}}}{G \pi r^2 l_d \varepsilon_0 \left(\frac{\partial l_d}{\partial t} \right)}}. \quad (15)$$

Отсюда

$$I^{эв} = H \sqrt[4]{\left(\frac{G \pi r^2 \varepsilon_0}{t_{раз} |\ln l_{раз}|} \right)^3}. \quad (16)$$

где $t_{раз}$ — момент разрыва перемычки (электрического взрыва), $l_{раз}$ — длина дугового промежутка в момент электрического взрыва перемычки, H — поправочный коэффициент, учитывающий размерность.

Анализ выражения (16) показывает, что в момент взрыва ток будет равен 0, хотя по данным работы [5] в момент времени, предшествующий взрыву, плотность тока через перемычку достигает значения $(1...5) \cdot 10^7$ А/см².

Следует отметить, что при этом максимальное значение скорости изменения тока $\left(\frac{\partial I_d}{\partial t} \right)$ описывается уравнением [4]:

$$\left(\frac{\partial I_d}{\partial t} \right)^{\max} = \frac{k_d V_c}{R}, \quad (17)$$

где k_d — градиент потенциала в столбе дуги, В/м; $V_c = \left(V_{пз} + \frac{\partial l_d}{\partial e} \right) (1 - k_{фк})$ — скорость сокращения дугового промежутка, м/с; $k_{фк} = (0,2...0,4)$ — коэффициент формы капли, R — эквивалентное сопротивление системы, В/А; Δl_d — изменение длины дуги, определяемое уравнением (1), м.

Формула (17) служит для расчета сопротивления системы в зависимости от частотных характеристик процесса.

Зависимость между силой тока, протекающего через жидкую стальную перемычку, и ее длиной выявили при следующих допущениях [3]: 1) форма

перемычки — цилиндр; 2) электрод и сварочная ванна неподвижны; 3) физические свойства нагреваемого металла неизменны.

В отсутствии дуги нагрев перемычки как стержня цилиндрической формы осуществляется за счет Джоулева тепла. Тогда уравнение теплового баланса для единицы длины перемычки записывается в виде [1]:

$$c \rho F \left(\frac{dT}{dt} \right) = \varphi \cdot j^2 F, \quad (18)$$

где $c \rho$ — объёмная теплоёмкость стали, Дж/м³·К; F — площадь поперечного сечения перемычки, м²; φ — удельное электросопротивление, Ом·м; $\frac{dT}{dt}$ — скорость изменения температуры, К/с; j — плотность тока, А/м².

Так как удельное сопротивление проводника является функцией температуры, выразим его посредством закона Видемана — Франца и, принимая материал перемычки изотропным, уравнение (18) преобразуем к:

$$c \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right)^2 \frac{T}{\lambda} j^2, \quad (19)$$

где k — постоянная Больцмана, Дж/К; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); e — заряд электрона, Кл.

Температуру и её производную по времени находим из уравнения теплопроводности для стержня [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\lambda}{c \rho} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial l^2} \right) - b(T - T_c), \quad (20)$$

где b — коэффициент эффективной теплоотдачи, Вт/м²·К.

Принимая во внимание, что время существования перемычки составляет $(0,5...2,75) \cdot 10^{-3}$ с [3], потерями на теплоотдачу в окружающую среду можно пренебречь. С учетом предельного условия, уравнение (20) примет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\lambda}{c \rho} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial l^2} \right), \quad (21)$$

где $(0 < t \leq t_{кз})$, $t_{кз}$ — время короткого замыкания, с; $(0 < l < l_n)$, l_n — длина перемычки, определяемая выражением:

$$l_n = l_d + \delta e^{-\frac{t_{кз}}{\theta}}. \quad (22)$$

Решением уравнения (21) будет формула [12]:

$$T = C_n e^{-\left(\frac{\pi n}{l_n} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{c \rho} \right) t} \sin \frac{\pi n}{l_n} l, \quad (23)$$

а производная будет иметь вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left| -C_n \left(\frac{\pi n}{l_n} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{c\rho} \right) e^{-\left(\frac{\pi n}{l_n} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{c\rho} \right) t} \sin \frac{\pi n}{l_n} l \right|, \quad (24)$$

где n — любое натуральное число, C_n — константа.

Подставляя (23) и (24) в (19), после преобразования получим зависимость плотности тока j , протекающего через перемычку, от её длины l_n , рассчитываемой уравнением (22):

$$j = \sqrt{3} \frac{ne\lambda}{l_n k}, \quad (25)$$

Величина n вообще является функцией времени и будет увеличиваться по мере роста j , т. е. по степени утонения перемычки в процессе ее плавления.

Покажем на примере использование разработанной математической модели для расчета силы тока по уравнению (14) и плотности тока по выражению (25).

Пример. Дано: $a = 20$ мм, $\omega = 50$ Гц, $\psi(t) = \omega t_d$.

Уравнение (1) для значений $t_d \approx 7,78 \cdot 10^{-4}$ с и $\theta \approx 2 \cdot 10^{-3}$ с принимает вид: $\Delta l_d = 0,02 \text{ tg} \times \frac{7,78 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-3}}$, откуда $\Delta l_d \approx 3,4$ мм. Тогда при $I_{кз} = 500$ А, $D = 168$ А/м. По уравнению (14):

$$I_d = 500 - 168 \cdot 0,0034^{\frac{3}{8}} \approx 480 \text{ А.}$$

При длине дуги $l_d = 4$ мм и $t_{кз} \approx 2 \cdot 10^{-3}$ с длина перемычки составит $l_n = l_d + 0,02 \text{ tg}(100 \pi \cdot 2 \cdot 10^{-3}) \times$

$\times e^{\frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}}} \approx 9$ мм. Таким образом, по выражению (25), плотность тока через перемычку в начальный момент (при $n = 1$, $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж / К, $\lambda \approx 50$ Вт / м · К) $j = \sqrt{3} \frac{1,6022 \cdot 10^{-19} \cdot 50}{0,009 \cdot 1,3807 \cdot 10^{-23}} \approx 1,12 \cdot 10^7$ А / м².

ВЫВОДЫ. 1. Процесс наплавки с наложением внешних механических колебаний может быть эффективно управляемым на стадии формирования капли посредством изменения силы тока при регулировании длины дугового промежутка с помощью частотных параметров процесса колебания сварочной ванны. Указанная возможность реализуется при удлинении дуги, обеспечивающего действие механизма саморегулирования дуги.

2. Разработана математическая модель процесса электродуговой наплавки с введением внешних низкочастотных механических колебаний в сварочную ванну. С помощью модели показано, что сила тока дуги пропорциональна изменению длины дугового промежутка, а плотность тока, протекающего через металлическую перемычку, обратно пропорциональна длине перемычки.

3. Полученные аналитические зависимости могут быть положены в основу 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Волченко В. Н. Теория сварочных процессов [Текст] / В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров и др. ; под ред. В. В. Фролова. — М. : Высшая школа. — 1988. — 559 с.
- [2] Драган С. В. Влияние высокочастотных колебаний электрода на геометрию проплавления при автоматической наплавке под флюсом [Текст] / С. В. Драган, И. В. Симутенков, Ю. А. Ярослав, В. Я. Трембич // Судостроение и морская инфраструктура. — 2015. — № 1 (3). — С. 76–86.
- [3] Дюргеров Н. Г. О разрыве перемычки между электродом и сварочной ванной [Текст] / Н. Г. Дюргеров // Сварочное производство. — 1972. — № 3. — С. 4–6.
- [4] Дюргеров Н. Г. Причины периодических замыканий дугового промежутка при сварке короткой дугой [Текст] / Н. Г. Дюргеров // Сварочное производство. — 1974. — № 9. — С. 1–3.
- [5] Заруба И. И. Электрический взрыв как причина разбрызгивания металла [Текст] / И. И. Заруба // Автоматическая сварка. — 1970. — № 3. — С. 14–18.
- [6] Лебедев В. А. Влияние высокочастотных колебаний электродной проволоки при автоматической наплавке под флюсом на свойства наплавленного слоя [Текст] / В. А. Лебедев, С. В. Драган, И. В. Симутенков // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2016. — № 5. — С. 17–21.
- [7] Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга [Текст] / Г. И. Лесков. — М. : Машиностроение. — 1970. — 335 с.
- [8] Морозов В. П. Анализ условий формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений [Текст] / В. П. Морозов // Известие ВУЗов. — 2006. — № 8. — С. 41–54.
- [9] Морозов В. П. Влияние внешнего пульсирующего источника тепла на расплавленный металл сварного шва в процессе его кристаллизации с целью эффективного управления структурообразованием / В. П. Морозов // Наука и Образование. Электронный журнал. — 2010. — № 10. — Режим доступа: <http://technomag.edu.ru>.

- [10] **Потапьевский А. Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Часть 1. Сварка в активных газах. Издание 2-е, переработанное. [Текст] / А. Г. Потапьевский. — К. : Екотехнологія. — 2007. — 192 с.
- [11] **Рябцев И. А.** Наплавка деталей машин и механизмов [Текст] / И. А. Рябцев. — К. : Екотехнологія. — 2004. — 160 с.
- [12] **Тихонов А.Н.** Уравнения математической физики [Текст] / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. — М. : Наука. — 1977. — 735 с.
- [13] **Tewari S. P.** Effects of Oscillation on Impact Property of Weldments. ISIJ International. — 1999. — Vol. 39 (8). — Pp. 809–812.

© В. О. Лебедєв, С. В. Новіков, С. В. Драган, І. В. Сімутєнков

Надійшла до редколегії 26.01.2017

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *О. М. Дубовий*