

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. наук²¹*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 proplavleniya 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 mezhdru 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 promezhtuka 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 vannoy s nalozheniyem 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 rasplavlenny 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. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, Scince Publ., 1977. 735 p.
- [13] Tewari S. P. *Effekts 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 CO₂ 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]:

$$\Delta l_d = \delta e^{-\frac{t_d}{\theta}}, \tag{1}$$

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.

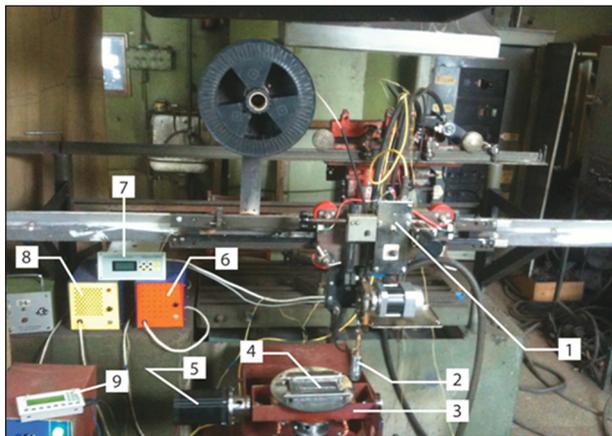


Рис. 1. Схема установки для наплавки с подвижной станиной:

1 — пульт управления перемещением горелки; 2 — горелка; 3 — станина; 4 — наплавляемая деталь; 5 — двигатель, 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 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 напряжённости — происходящим только вдоль дуги. Тогда, значение напряжённости электрического поля дуги определится из известного уравнения Гаусса, записанного в цилиндрической системе координат:

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

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:

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

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

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

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:

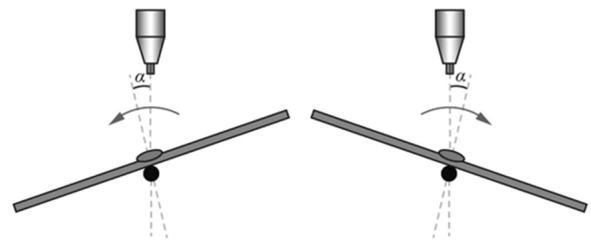


Рис. 2. Принципиальная схема перемещения станины (поз. 3 на рис. 1) в процессе колебаний

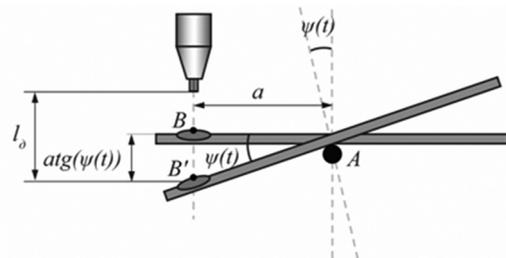


Рис. 3. К определению изменения длины дуги по уравнению (1)

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

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:

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

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

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

В приведенном виде уравнение (7) запишем так:

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

$0 < t < t_d.$

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

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

или, выражая его через функцию гиперболического котангенса,

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

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:

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

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:

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

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

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

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 отсутствие 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 $l_n = l_d + 0,02 \text{ tg}(100 \pi 2 \cdot 10^{-3}) \times$

$\times e^{\frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}}} \approx 9$ 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. Ярос, 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 Общественное 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.** Effekts of Oscillation on Impact Property of Weldments. ISIJ International. — 1999. — Vol. 39 (8). — Pp. 809–812.

© В. О. Лебедев, С. В. Новіков, С. В. Драган, І. В. Сімутенков

Надійшла до редколегії 26.01.2017

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