

Аналитическое определение частоты коротких замыканий дуги при наплавке в углекислом газе с механическими колебаниями сварочной ванны

В. А. Лебедев¹⁾, С. В. Новиков¹⁾, С. А. Лой¹⁾

¹⁾ Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ул. Боженко, 11, 03680, г. Киев, Украина

Article info:

Paper received: 13 March 2017
The final version of the paper received: 29 May 2017
Paper accepted online: 30 May 2017

Correspondent Author's Address:

novykov76@ukr.net

Выдвинута гипотеза возможности снижения степени разбрызгивания при наплавке в углекислом газе посредством задания частотных характеристик колебания сварочной ванны. Представлены уравнения, являющиеся результатом теоретических исследований, на основе которых определено выражение для частоты коротких замыканий междуугового промежутка в процессе наплавки на постоянном токе.

На основе краткого литературного анализа трудов прошлых лет показано, что частота, накладываемая на ванну, должна определяться собственной частотой кристаллизации вблизи фронта кристаллизации расплава, которая определяется скоростью наплавки и кристаллизационными характеристиками металла сварочной ванны. В связи с тем что до сих пор не создана строгая теория кристаллизации в условиях внешних колебаний, представлены зависимости по определению амплитудно-частотных характеристик, полученные различными исследователями.

Приведен пример расчета времени горения дуги и короткого замыкания в процессе наплавки, на основании чего определена частота коротких замыканий.

Ключевые слова: периодическое воздействие, разбрызгивание металла, наплавка, короткое замыкание, длина дугового промежутка.

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Анализ последних исследований и литературы

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 их числу относятся способы с механическими колебаниями ванны жидкого металла.

Для изучения влияния механических колебаний ванны, их характеристик на свойства наплавленных валков в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ была разработана установка, позволяющая осуществлять механические колебания ванны, как показано на рисунке 1 [1].

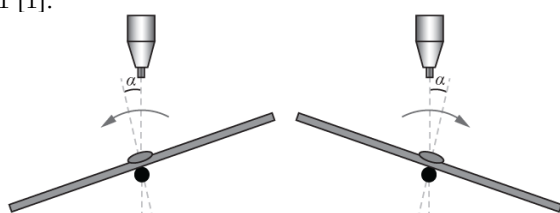


Рисунок 1 – Схема перемещения станины в процессе колебаний

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

Как известно, одной из основных проблем наплавки электродной проволокой в углекислом газе является разбрызгивание металла, что обусловлено электрическим взрывом металлической перемычки [2, 3]. Для решения данной проблемы в последнее время используют импульсные режимы подачи электродной проволоки с применением программируемых шаговых или вентильных электродвигателей [4], аддитивные импульсно-дуговые методы сварки и наплавки, что позволяет снизить потери на разбрызгивание до 10–15 % [5]. В случае многопроходной сварки – шовную TIG-сварку в импульсном режиме [6]. Вместе с тем применение импульсной подачи проволоки в сочетании с колебаниями сварочного инструмента или расплава сварочной ванны позволит не только снизить степень разбрызгивания, но и сформировать желаемую структуру наплавленного или свариваемого металла.

В настоящее время широко применяется воздействие на расплав сварочной ванны электромагнитных полей с частотой, не превышающей 30,0 Гц, что ограничивает возможности данной технологии и делает невозможным её применение для металлов с малым коэффициентом температуропроводности [7]. Однако применение импульсных режимов электро-

магнитного воздействия даёт возможность получать частоту до 260,0 Гц, что обеспечивает формирование желаемой структуры в любом металле [8].

Современная промышленность также широко применяет импульсно-лазерные технологии, позволяющие получать структуру заданной степени дисперсности [9]. Широкое применение сегодня находит комбинированный лазерно-дуговой метод как наиболее эффективный с точки зрения соотношения «цена – качество». Однако его основными недостатками являются дефекты структуры, обусловленные автоколебаниями пароголового канала и сварочной ванны [10, 11]. Для устранения данного недостатка было предложено стабилизировать сварочную ванну посредством введения сканирующего лазерного луча с амплитудой до 0,5 мм и частотой сканирования больше 300,0 Гц [12].

1.2. Постановка проблемы

Таким образом, контроль над формированием структуры на данный момент чаще всего обеспечивается применением электромагнитного поля и гибридной лазерно-дуговой технологии, что обусловлено эффективностью и малым временем получения необходимого результата. Однако стоимость и сложность оборудования существенно ограничивают их использование. Кроме того, в последнее время всё актуальней становится проблема сбережения энергоресурсов, что повышает технические требования и, соответственно, цену к разрабатываемому новому оборудованию. Исходя из этого, очевидными становятся разработка более дешёвых и менее энергоёмких новых и совершенствование старых технологий, позволяющих контролировать структуру наплавленного металла. Одной из таких технологий является механическое импульсное или периодическое влияние на расплав сварочной ванны. Определив амплитудно-частотный режим колебаний, можно не только формировать желаемую структуру, но и осуществлять контролируемый перенос металла в сварочную ванну, формируя размер капли в процессе наплавки таким образом, чтобы разбрызгивание металла было минимальным.

Целью работы является аналитическое определение зависимости частоты замыканий дугового промежутка в процессе наплавки в среде углекислого газа от заданных амплитудно-частотных характеристик колебания сварочной ванны.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Поиск оптимальной частоты, накладываемой на сварочную ванну, осуществлялся многими исследователями, и наилучшие результаты были достигнуты при частоте f_0 , равной или близкой частоте температурных колебаний вблизи фронта кристаллизации, лежащей в пределах 0,5–100 Гц. Так как на данный момент строгая теория формирования структуры металла шва с колебательным воздействием отсутствует, её аналитическое определение зависит от условий проведения эксперимента и допускаемых гипотез. Исходя из анализа литературных источников, для механических колебаний данная величина является функцией скорости сварки и чаще всего аналитически определяется по формуле [13]:

$$f_0 = \frac{0,5kV_{св}^2 \lg e}{D}, \quad (1)$$

где $V_{св}$ – скорость сварки; k – безразмерный коэффициент распределения примеси между твёрдой и жидкой фазами; e – основание натурального логарифма, D [м²/с] – коэффициент диффузии примеси в жидкой фазе.

Так же применима формула [14]:

$$f_0 = \frac{V_{св}}{n\Delta x_{max}}, \quad (2)$$

где n – коэффициент, учитывающий количество периодов кристаллизации при переходе от дезориентированной структуры металла ванны к направленной; Δx_{max} – значение максимальной протяжённости зоны концентрационного переохлаждения в хвосте сварочной ванны по оси шва.

Для выбора амплитуды колебания A предложена зависимость [15]:

$$A = \frac{V_{кр}}{2\pi f_e}, \quad (3)$$

где $V_{кр}$ – критическая скорость движения расплава.

Поскольку процесс наплавки в углекислом газе плавящимся электродом является периодическим процессом, обусловленным характером переноса металла, выдвинуто предположение возможности контроля степени разбрызгивания на основе контроля длины дуги и соответственно тока короткого замыкания путём определения частоты коротких замыканий, определяемой заданными частотными характеристиками колебания сварочной ванны.

В результате теоретических исследований получены зависимости величины силы тока от длины дуги $I_0(l_0)$ за время формирования капли и величины плотности тока от длины перемычки – $j(l_n)$ за время её существования [16], где длина дуги l_0 и длина перемычки l_n представляют собой функции от частотных характеристик колебания ванны, которые задаются и определяются по выражению $l_0 = \delta e^{-\frac{t_{ср}}{\theta}}$; δ – величина превышения длины дуги за счёт колебания; $t_{ср}$ – время саморегулирования дуги; θ [с] – постоянная саморегулирования дуги, а $\delta = atg(2\pi f_e \tau)$ – амплитуда колебания сварочной дуги.

Тогда частота коротких замыканий $f_{кз}$ задаётся совокупностью уравнений:

$$\left[\begin{array}{l} f_{кз} = \frac{1}{t_0 + t_{кз}}, \\ I_0 = I_{кз} - A \left(atg(2\pi f_e t_0) e^{-\frac{t_{ср}}{\theta}} \right)^{\frac{3}{8}}, \\ j = \sqrt{3} \frac{ne_{эл} \lambda}{atg(2\pi f_e t_{кз}) e^{-\frac{t_{ср}}{\theta}} K} \end{array} \right. \quad (4)$$

где t_{δ} – время горения дуги до короткого замыкания; $t_{кз}$ – время короткого замыкания; I_{δ} – ток дуги, $I_{кз}$ – ток короткого замыкания; A [А/м^{3/8}] – экспериментально определяемый коэффициент пропорциональности; a – расстояние смещения сварочной горелки от оси колебания станины (рис. 2); j – плотность тока короткого замыкания; n – любое натуральное число, увеличивающееся по мере роста j ; $e_{эл}$ – заряд электрона; λ – коэффициент теплопроводности; K – постоянная Больцмана.

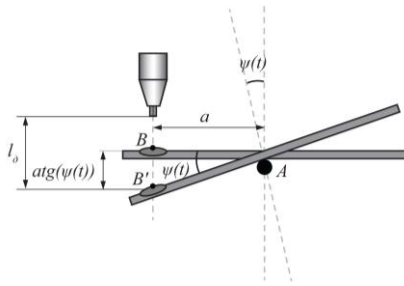


Рисунок 2 – Схема к пояснению зависимости длины дуги от частотных характеристик колебания сварочной ванны:
 $\psi(t) = 2\pi f_{\delta} t$

Например, для заданных параметров: $a = 40$ мм; $f_{\delta} = 27$ Гц; $I_{\delta} = 250$ А; $I_{кз} = 400$ А; $t_{cp} \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$ с; $\theta \approx 2 \cdot 10^{-4}$ с; $A = 170$ А/м^{3/8}; $n = 2000$ (в момент короткого замыкания); $e_{эл} = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл; $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; $\lambda \approx 50$ Вт/(м·К); $j = 2 \cdot 10^{11}$ А/м² (в момент короткого замыкания). Времена, рассчитываемые по системе (4), будут равны:

$$t_{\delta} = \frac{1}{2\pi f_{\delta}} \arctg \left(\frac{e^{-\theta}}{a} \left(\frac{I_{кз} - I_{\delta}}{A} \right)^{\frac{8}{3}} \right) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 27} \arctg \left(\frac{e^{-\frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}}}}{0,04} \left(\frac{400 - 250}{170} \right)^{\frac{8}{3}} \right) \approx 6 \cdot 10^{-3} \arctg(53 \cdot 0,72) \approx 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,55 \approx 9,23 \cdot 10^{-3} \text{ с} \approx 9 \text{ мс.}$$

$$t_{кз} = \frac{1}{2\pi f_{\delta}} \arctg \left(\frac{\sqrt{3} \cdot n \cdot e_{эл} \cdot \lambda \cdot e^{-\frac{t_{cp}}{\theta}}}{j \cdot K \cdot a} \right) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 27} \arctg \left(\frac{\sqrt{3} \cdot 2000 \cdot 1,60217662 \cdot 10^{-19} \cdot 50 \cdot e^{-\frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}}}}{2 \cdot 10^{11} \cdot 1,38064852(79) \cdot 10^{-23} \cdot 0,04} \right) \approx 6 \cdot 10^{-3} \arctg(0,533) \approx 6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,49 \approx 2,94 \cdot 10^{-3} \text{ с} \approx 3 \text{ мс.}$$

Отсюда

$$f_{кз} = \frac{1}{t_{\delta} + t_{кз}} \approx \frac{1}{12 \cdot 10^{-3}} \approx 83 \text{ Гц.}$$

3. ВЫВОДЫ

1. В целях снижения степени разбрызгивания при наплавке на постоянном токе представлена система уравнений, определяющая зависимость частоты коротких замыканий от заданных частотных характеристик колебания сварочной ванны, что должно являться одним из критериев при выборе режима наплавки, осуществляемой с внешними колебаниями сварочной ванны.

2. Данная совокупность уравнений получена теоретически и требует верификации с опытными данными, что обуславливает необходимость проведения дальнейших экспериментальных исследований.

Analytical determination of the frequency of short circuits of the arc at surfacing in gas dioxide with welding pool mechanical oscillations

V. A. Lebedev¹⁾, S. V. Novikov¹⁾, S. A. Loy¹⁾

¹⁾ Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 11 Bozhenko St., 03680, Kyiv, Ukraine

A hypothesis has been put forward that it is possible to reduce the degree of splashing when surfacing into carbon dioxide due to the setting of the frequency characteristics of the oscillation of the weld pool. Equations are presented that are the result of theoretical research, on the basis of which an expression for the short-circuits frequency of the inter-arc gap in the process of surfacing by on a direct current is determined.

On the basis of brief literature analysis of the works past years old its is showed that the frequency imposed on the welding pool has to detected by crystallization frequency near the crystallization front melt which is detected by a surfacing velocity and crystallization characteristics of weld pool metal. Due to the fact that for present day the strict theory of crystallization in the conditions outer oscillations haven't created, the dependencies for an amplitude-frequency characteristic's determining which were got by different researchers have been presented.

The example of calculation of an arc burning time and time of short circuit in period of surfacing process have been presented. On the basis of that, frequency of short circuits has been determined.

Keywords: periodic action, splashing of metal, surfacing, short-circuit, length of arc gap.

Аналитичне визначення частоти коротких замикань дуги при наплавленні у вуглекислому газі з механічними коливаннями зварювальної ванни

В. О. Лебедев¹⁾, С. В. Новіков¹⁾, С. О. Лой¹⁾

¹⁾ Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, вул. Боженка, 11, 03680, м. Київ, Україна

Висунуто гіпотезу можливості зниження ступеня розбризкування при наплавленні у вуглекислому газі за допомогою задання частотних характеристик коливання зварювальної ванни. Подані рівняння, що є результатом теоретичних досліджень, на основі яких визначено вираз для частоти коротких замикань міждугового проміжку в процесі наплавлення при постійному струмі.

На підставі стислого літературного аналізу праць минулих років показано, що частота, яка накладається на ванну, повинна визначатися власною частотою кристалізації поблизу фронту кристалізації розплаву, яка визначається швидкістю наплавлення і кристалізаційними характеристиками металу зварювальної ванни. У зв'язку з тим що до цього часу не створена строга теорія кристалізації в умовах зовнішніх коливань, наведені залежності з визначення амплітудно-частотних характеристик, одержаних різними дослідниками.

Подано приклад розрахунку часу горіння дуги і короткого замикання в процесі наплавлення, на підставі чого визначено частоту коротких замикань.

Ключові слова: періодичний вплив, розбризкування металу, наплавлення, коротке замикання, довжина дугового проміжку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пат. на корисну модель № 80823. Універсальний маніпулятор з можливістю низькочастотної вібраційної обробки зварювальної ванни / В. О. Лебедев, С. Ю. Максимов, І. В. Лендел. Публікація відомостей 10.06.2013, Бюл. № 11.
2. Дюргеров Н. Г. О разрыве перемычки между электродом и сварочной ванной / Н. Г. Дюргеров // Сварочное производство. – 1972. – № 3. – С. 4–6.
3. Заруба И. И. Электрический взрыв как причина разбрызгивания металла / И. И. Заруба // Автоматическая сварка. 1970. – № 3. – С. 14–18.
4. Лебедев В. А. Особенности формирования структуры сварных соединений при дуговой наплавке с импульсной подачей электродной проволоки / / В. А. Лебедев, И. В. Лендел, А. В. Яровицын, Е. И. Лось, С. В. Драган // Автоматическая сварка. – 2016. – № 3. – С. 25–30.
5. Сараев Ю. Н. Совершенствование технологических процессов сварки и наплавки на основе методов адаптивного импульсного высокоэнергетического воздействия на характеристики переноса электродного металла и кристаллизации сварочной ванны / Ю. Н. Сараев, В. П. Безбородов, А. А. Григорьева // Сварка и диагностика. – 2013. – № 5. – С. 44–47.
6. Шипилов А. В. Управление структурой сварных соединений при орбитальной ТIG-сварке технологических трубопроводов компрессорных станций / А. В. Шипилов, А. В. Коновалов, В. В. Бровко, С. И. Полосков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 6 – С.44–52.
7. 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. – 2010. – № 10. – С. 1–22.
8. Рыжов Р. Н. Влияние импульсных электромагнитных воздействий на формирование и кристаллизацию швов / Р. Н. Рыжов // Автоматическая сварка. – 2007. – № 2. – С. 56–58.
9. Басов Н. Г. Физико-технологические особенности лазерной сварки в непрерывном и импульсно – периодическом режимах / Н. Г. Басов, В. В. Башенко, С. Г. Горный // Сварочное производство. – 1985. – № 8. – С. 2–4.
10. Лопота В. А. Модель лазерной сварки с глубоким проплавлением для применения в технологии / В. А. Лопота, Ю. Т. Сухов, Г. А. Туричин // Известия академии наук. – 1997. – Т. 61, № 8. – С. 1613–1618.
11. Forsman T. Process instability in laser welding of aluminum alloys at the boundary of complete penetration / T. Forsman, J. Powell, C. Magnusson // Journal of Laser Applications. – 2001. – Vol. 13, Issue 5. – P. 193–198.
12. Туричин Г. А. Перспективы внедрения лазерно-дугового процесса для сварки металлов больших толщин / Г. А. Туричин, И. А. Цибульский, М. В. Кузнецов, В. В. Сомов // Ритм. – 2010. – Вып. 10. – С. 28–31.
13. Болдырев А. М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну / А. М. Болдырев // Сварочное производство. – 1976. – № 2. – С. 52–55.
14. Славин Г. А. Формирование дезориентированной структуры металла шва при наложении низкочастотных возмущений на сварочную ванну / Г. А. Славин // Сварочное производство. – 1980. – № 6. – С. 3–5.
15. Аристов С. В. Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава / С. В. Аристов, В. Л. Руссо // Сварочное производство. – 1982. – № 11. – С. 42–44.
16. Лебедев В. А. Математическая модель процессов сварки и наплавки с управляемыми изменениями вылета электродной проволоки / В. А. Лебедев, С. В. Новіков, С. В. Драган, И. В. Симутенков // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв, 2017. – № 1. – С. 48–54.

REFERENCES

1. Lebedev V. O., Maksymov S. Yu., Lendyel I. V. Universal'nyy manipulyator z mozhlyvisty nyz'kochastotnoyi vibratsiynoyi obrobky zvaryval'noyi vannoy. Patent na korysnu model' № 80823. Publikatsiya vidomostey 10.06.2013, Byul. № 11 [in Ukrainian].
2. Dyurgerov N. G. O razrive peremichki mejdu elektrodom i svarochnoi vannoi // Svarochnoe proizvodstvo – № 3. – 1972. – pp. 4–6 [in Russian].
3. Zaruba I. I. Elektricheskii vzriv kak prichina razbrizgivaniya metalla // Avtomaticheskaya svarka – № 3. – 1970. – pp. 14–18 [in Russian].
4. Lebedev V. A., Lendel I. V., Yarovicin A. V., Los E. I., Dragan S. V. Osobennosti formirovaniya strukturi svarnih soedinenii pri dugovoi naplavke s impulsnoi podachei elektrodnoi provoloki // Avtomaticheskaya svarka. – 2016. – № 3. – pp. 25–30 [in Russian].
5. Saraev Yu. N., Bezborodov V. P., Grigoreva A. A. Sovershenstvovanie tehnologicheskikh processov svarki i naplavki na osnove metodov adaptivnogo impulsnogo visokoenergeticheskogo vozdeistviya na karakteristiki perenosa elektrodnogo metalla i kristallizacii svarochnoi vannoi // Svarka i diagnostika. – 2013. – No. 5. – pp. 44–47 [in Russian].
6. Shipilov A. V., Konovalov A. V., Brovko V. V., Poloskov S. I. Upravlenie strukturoi svarnih soedinenii pri orbitalnoi TIG_svarke tehnologicheskikh truboprovodov kompressornih stancii // Izvestiya visshih uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie. – 2011. – № 6 – pp. 44–52 [in Russian].
7. Morozov V. P. Vliyanie vneshnego pulsiruyushchego istochnika tepla na rasplavlenii metall svarnogo shva v processe ego kristallizacii s celyu effektivnogo upravleniya strukturoobrazovaniem // Nauka i obrazovanie. – 2010. – № 10. – pp. 1–22 [in Russian].
8. Rijov R. N. Vliyanie impulsnykh elektromagnitnykh vozdeistvii na formirovanie i kristallizaciyu shvov // Avtomaticheskaya svarka. – 2007. – № 2. – pp. 56–58 [in Russian].
9. Basov N. G., Bashenko V. V., Gornii S. G. Fiziko_tehnologicheskije osobennosti lazernoi svarki v neprerivnom i impulsno – periodicheskom rejimakh // Svarochnoe proizvodstvo. – 1985. – № 8. – pp. 2–4 [in Russian].
10. Lopota V. A., Suhov Yu. T., Turichin G. A. Model lazernoi svarki s glubokim proplavlaniem dlya primeneniya v tehnologii // Izvestiya akademii nauk. – 1997. – Vol. 61. – № 8. – pp. 1613–1618 [in Russian].
11. Forsman T., Powell J., Magnusson C. Process instability in laser welding of aluminum alloys at the boundary of complete penetration // Journal of Laser Applications. – 2001. – Vol. 13, Issue 5. – pp. 193–198.
12. Turichin G. A., Cibulskii I. A., Kuznecov M. V., Somov V. V. Perspektivi vnedreniya lazerno_dugovogo processa dlya svarki metallov bolshih tolschin // Ritm. – 2010. – Issue 10. – pp. 28–31 [in Russian].
13. Boldirev A. M. O mehanizme formirovaniya strukturi metalla shva pri vvedenii nizkochastotnykh kolebanii v svarochnuyu vannu // Svarochnoe proizvodstvo. – 1976. – No 2. – pp. 52–55 [in Russian].
14. Slavin G. A. Formirovanie dezorientirovannoi strukturi metalla shva pri nalozhenii nizkochastotnykh vozmuschenii na svarochnuyu vannu // Svarochnoe proizvodstvo. – 1980. – No. 6. – pp. 3–5 [in Russian].
15. Aristov S. V., Russo V. L. Kristallizaciya metalla shva pri nizkochastotnykh kolebaniyah rasplava // Svarochnoe proizvodstvo. – 1982. – No. 11. – pp. 42–44 [in Russian].
16. Lebedev V. A., Novikov S. V., Dragan S. V., Simutenkov I. V. Matematicheskaya model processov svarki i naplavki s upravlyaemimi izmeneniyami vileta elektrodnoi provoloki // Zbirknik naukovih prac NUK. – Mkolaiv, 2017. – No. 1. – pp. 48–54 [in Russian].