

УДК 621.791.927.5

DOI: 10.12737/article_5a5a44e7e76648.65231570

В.А. Лебедев, д.т.н.,
Г.В. Жук, директор ГП ОКТБ,
С.В. Новиков, ведущий инженер
(ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев)
E-mail: valpaton@ukr.net

Научно обоснованное совершенствование элементов дуговой механизированной сварки и наплавки

Рассмотрены вопросы, связанные с определением времён цикла формирования капли электродного металла при дуговой механизированной сварке и наплавке. Рассмотрены основные стадии переноса расплавленной капли с математическим описанием времён каждой из стадий с учётом характеристик дугового процесса. Приведен пример определения времён цикла, а также пример наплавки, выполненной при импульсной подаче с параметрами в соответствии с предложенным математическим описанием.

Ключевые слова: дуговая сварка; перенос электродного металла; времена цикла переноса; определение параметров; управление.

V.A. Lebedev, D. Eng.,
G.V. Zhuk, Director of SD DO,
S.V. Novikov, Principle Engineer
(Paton IEW of NAS of the Ukraine, Kiev)

Scientifically substantiated updating of arc mechanical welding and surfacing

In the paper there is considered a process of electrode metal drops transfer at arc welding-surfacing with the emphasis of characteristic stages of their formation and motion in a molten bath for the realization of a welding method with the dosed electrode wire feeding. The analytical expressions are obtained defining terms of the existence of drop formation stages according to which it is possible to assess a level of inverse connections on arc process parameters introduced into a regulator of an electrical drive of the mechanism of electrode wire feeding. There are shown examples of carrying out a welding method with the dosed feeding the parameters of which are designed according to the procedure mentioned.

Keywords: arc welding; electrode metal transfer; terms of transfer cycle; parameter definition; management.

В силу современной мировой тенденции снижения затрат, обуславливающих экономию ресурсов и энергии, актуальной задачей машиностроения является создание новых или доработка старых технологий в соответствии с новыми требованиями ресурсосбережения. В частности в технологиях дуговой сварки и наплавки механизированными способами по-прежнему являются актуальными задачи улучшения формирования сварного соединения или наплавленного валика наряду со снижением потерь электродного металла, затрат на последующую обработку шва или валика, облегчение формирования сварных соединений в положениях отличных от нижнего и др.

В ГП ОКТБ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разработано несколько новых, до настоящего времени неизвестных в технике сварочного оборудования и технологии, вариан-

тов систем управления переносом электродного металла с использованием импульсных алгоритмов воздействия на систему подачи электродной проволоки при механизированной дуговой сварке. Основные из них [1]:

1) система с управляемой подачей электродной проволоки, использующая информационную обратную связь по току сварки;

2) система с управляемой подачей электродной проволоки, использующая информационную обратную связь по току сварки и дополнительно низкочастотную модуляцию скорости подачи;

3) система с управляемой подачей электродной проволоки, использующая информационную обратную связь по напряжению сварки.

Эти способы подачи и равно управляемая импульсная подача в отсутствие методик ана-

литического расчёта и выбора параметров движения электродной проволоки для эффективного воздействия на перенос электродного металла требуют большого числа опытных сварок – наплавов для выбора лучшего варианта и получения планируемого результата. Для значительного сокращения этой процедуры необходима аналитическая оценка характеристик сварочного процесса для выбора параметров импульсной или дозированной подачи.

Целью настоящей работы является выделение и аналитическое определение характерных времён как одного из основных параметров цикла переноса электродного металла в зависимости от условий и характеристик сварочного процесса для оценки и выбора вида и опций регулирования и управляемой импульсной и дозированной подачи электродной проволоки.

Геометрические соотношения в положении электродной капли при её переносе представлены на рис. 1.

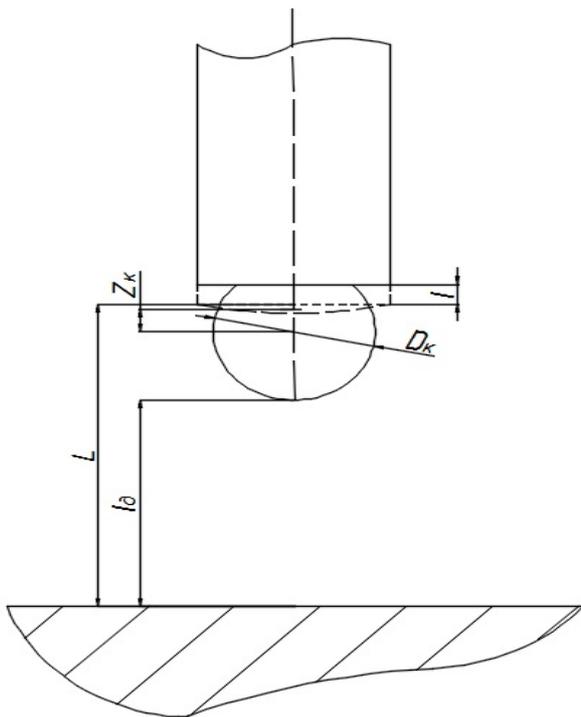


Рис. 1. Положение капли электродного металла в начальной стадии формирования

Управление переносом металла осуществляется в три стадии, продолжительность которых может быть определена аналитически.

1. На этой стадии горения дуги происходит формирование капли, что характеризуется неравенством скоростей плавления и подачи

электродной проволоки $v_{пл} > v_{пэ}$. При этом длина междугового промежутка максимальна. Время этой стадии t_{11} определяется соотношением [2]:

$$t_{11} = T \ln \frac{v_{max} - v_{пл}}{v_{пэ} - v_{пл}}, \quad (1)$$

где T – эквивалентная постоянная времени сварочной цепи, с; v_{max} – максимальная скорость плавления, м/с.

Рост капли характеризуется соотношением $v_{пл} \approx v_{пэ}$, а длина междугового промежутка практически не меняется [3]. Продолжительность t_{12} этой стадии можно определить, принимая в выражении для длины дуги l , м, при сварке в CO_2 с короткими замыканиями [2]:

$$l = T(v_{max} - v_{пл}) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) - t(v_{пэ} - v_{пл}). \quad (2)$$

При равенстве скоростей подачи и плавления электродной проволоки $v_{пл} \approx v_{пэ}$, дифференцируя выражение (2) и приравнявая его к производной от диаметра капли D_k , можно получить следующую формулу:

$$\frac{dD_k}{dt} = (v_{max} - v_{пл}) e^{-\frac{t}{T}}. \quad (3)$$

Так как процесс роста капли обусловлен плавлением участка сварочной проволоки длиной L , то, пренебрегая потерями на испарение, можно записать выражение:

$$\rho_{рм} \frac{\pi D_k^3}{6} = \rho \frac{\pi d_э^2}{4} L, \quad (4)$$

где $\rho_{рм}$ – плотность расплавленного металла, кг/м³; ρ – плотность металла проволоки; $d_э$ – диаметр электродной проволоки, м. Откуда:

$$\frac{dD_k}{dt} = \frac{\rho d_э^2}{2 D_k^2 \rho_{рм}} \frac{dL}{dt} = \frac{\rho d_э^2}{2 D_k^2 \rho_{рм}} V_{пл}. \quad (5)$$

Приравнявая выражения (3) и (5), можно определить продолжительность роста капли t_{12} :

$$t_{12} = T \ln \frac{2 \rho_{рм} D_k^2 (v_{max} - v_{пл})}{\rho d_э^2 v_{пл}}. \quad (6)$$

Существует гипотеза, подтверждённая экспериментально, согласно которой снижения степени разбрызгивания и улучшения формирования шва, даже при сварке в вертикальном или потолочном положении, можно добиться при отключении скорости подачи электродной проволоки в период t_{12} . Тогда рост капли будет описываться уравнением:

$$\frac{dD_k}{dt} = (v_{max} - v_{пл}) e^{-\frac{t}{T}} + v_{пл}. \quad (7)$$

Откуда:

$$t_{12} = T \ln \frac{2\rho_{\text{рм}} D_{\text{к}}^2 (v_{\text{max}} - v_{\text{пл}})}{(\rho d_{\text{э}}^2 - 2\rho_{\text{рм}} D_{\text{к}}^2) v_{\text{пл}}} \quad (6.1)$$

2. Подача проволоки должна включаться в период t_2 образования «шейки» между каплей и торцом электрода, продолжительность которого можно определить по выражению:

$$t_2 = T \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{пл}}}{v_{\text{пэ}} - v_{\text{пл}}} - T \ln \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{пл}}}{v_{\text{пэ}} - v_{\text{пл}}} - T \ln \frac{2\rho_{\text{рм}} D_{\text{к}}^2 (v_{\text{max}} - v_{\text{пл}})}{(\rho d_{\text{э}}^2 - 2\rho_{\text{рм}} D_{\text{к}}^2) v_{\text{пл}}} \quad (8)$$

где первое слагаемое является временем горения дуги до короткого замыкания [1].

3. В течение стадии t_3 протекает короткое замыкание междугового промежутка до момента взрыва, а скорость подачи электродной

проволоки равна 0. t_3 можно определить по выражению [4]:

$$t_3 = \frac{\pi Q \rho_{\text{рм}} d_{\text{э}}}{2\theta I_{\text{кз}} j} \quad (9)$$

где Q – атомная теплота испарения металла, Дж/кг; θ – удельное сопротивление жидкого металла, Ом·м; $I_{\text{кз}}$ – сила тока короткого замыкания, А; j – плотность тока текущего через перемычку, А/м².

ПРИМЕР

$d_{\text{э}} = 2,0$ мм; $\rho = 7,87$ г/см³; $\rho_{\text{рм}} = 7,02$ г/см³; $v_{\text{max}} = 10,5$ м/мин; $v_{\text{пл}} = 0,45$ м/мин; $v_{\text{пэ}} = 2,2$ м/мин (для $I_{\text{д}} = 250$ А); $T = 0,01$ с; $D_{\text{к}} = 1,0$ мм.

$$t_{11} = T \ln \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{пл}}}{v_{\text{пэ}} - v_{\text{пл}}} = 0,01 \ln \frac{10,5 - 0,45}{2,2 - 0,45} \approx 17,5 \text{ мс};$$

$$t_{12} = T \ln \frac{2\rho_{\text{рм}} D_{\text{к}}^2 (v_{\text{max}} - v_{\text{пл}})}{\rho d_{\text{э}}^2 v_{\text{пл}}} = 0,01 \ln \frac{2 \cdot 7,02 \cdot 1(10,5 - 0,45)}{7,87 \cdot 4 \cdot 0,45} \approx 22 \text{ мс (при } v_{\text{э}} \approx v_{\text{пл}});$$

$$t_{12} = T \ln \frac{2\rho_{\text{рм}} D_{\text{к}}^2 (v_{\text{max}} - v_{\text{пл}})}{(\rho d_{\text{э}}^2 - 2\rho_{\text{рм}} D_{\text{к}}^2) v_{\text{пл}}} = 0,01 \ln \frac{2 \cdot 7,02 \cdot 1(10,5 - 0,45)}{(7,87 \cdot 4 - 2 \cdot 7,02 \cdot 1) \cdot 0,45} \approx 29 \text{ мс (при } v_{\text{пэ}} = 0)$$

(при $v_{\text{пэ}} \approx v_{\text{пл}}$);

$$t_2 = T \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{пл}}}{v_{\text{пэ}} - v_{\text{пл}}} - T \ln \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{пл}}}{v_{\text{пэ}} - v_{\text{пл}}} - T \ln \frac{2\rho_{\text{рм}} D_{\text{к}}^2 (v_{\text{max}} - v_{\text{пл}})}{\rho d_{\text{э}}^2 v_{\text{пл}}} =$$

$$= 0,01 \frac{10,5 - 0,45}{2,2 - 0,45} - 0,01 \ln \frac{10,5 - 0,45}{2,2 - 0,45} - 0,01 \ln \frac{2 \cdot 7,02 \cdot 1(10,5 - 0,45)}{7,87 \cdot 4 \cdot 0,45} =$$

$$= 57 - 17,5 - 22 \approx 17,5 \text{ мс}$$

(при $v_{\text{пэ}} = 0$);

$$t_2 = T \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{пл}}}{v_{\text{пэ}} - v_{\text{пл}}} - T \ln \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{пл}}}{v_{\text{пэ}} - v_{\text{пл}}} - T \ln \frac{2\rho_{\text{рм}} D_{\text{к}}^2 (v_{\text{max}} - v_{\text{пл}})}{(\rho d_{\text{э}}^2 - 2\rho_{\text{рм}} D_{\text{к}}^2) v_{\text{пл}}} =$$

$$= 0,01 \frac{10,5 - 0,45}{2,2 - 0,45} - 0,01 \ln \frac{10,5 - 0,45}{2,2 - 0,45} - 0,01 \ln \frac{2 \cdot 7,02 \cdot 1(10,5 - 0,45)}{(7,87 \cdot 4 - 2 \cdot 7,02 \cdot 1) \cdot 0,45} = 57 - 17,5 - 29 \approx 10,5 \text{ мс}$$

Практическое использование полученных результатов апробировано в процессе наплавки порошковой электродной проволокой диаметром 1,6 мм с обратной связью по току дуги при установлении параметров импульсного движения этой проволоки: скорость в импульсе, моменты при которых включается подача

и когда она прекращается.

Процесс реализовывался безредукторным подающим механизмом подачи на основе компьютеризованного вентильного электропривода [5] при введении обратных связей по току дугового процесса. Результаты такой наплавки горизонтального шва на токах

200...220 А на вертикальной плоскости в сравнительных испытаниях представлены в

виде осциллограмм тока и напряжения на рис. 2, а результаты сравнительной наплавки на рис. 3.

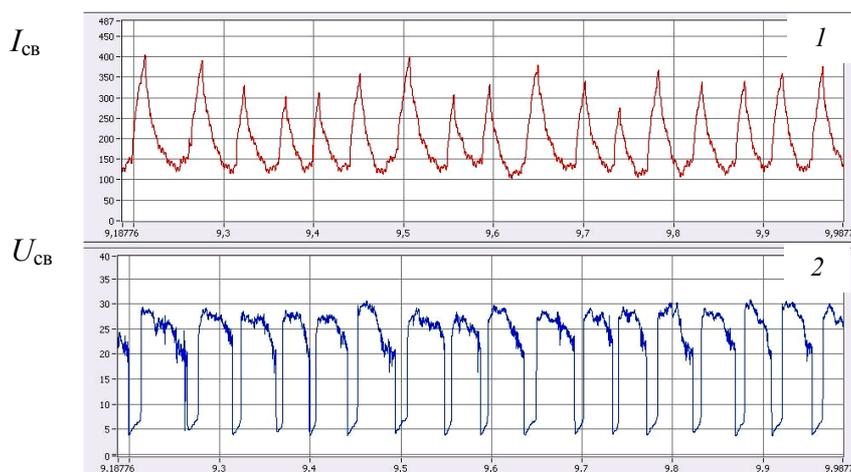


Рис. 2. Осциллограммы тока (1) и напряжения (2) при наплавке с дозированной подачей электродной проволоки

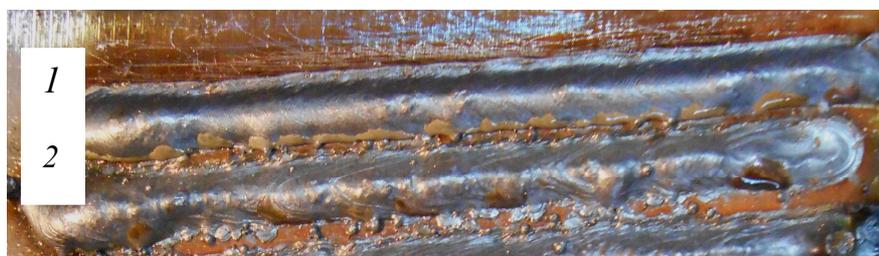


Рис. 3. Наплавленные валики с подачи электродной проволоки: 1 – дозированная; 2 – обычная

Анализ полученных результатов показывает достаточно близкую сходимость (отличия в 12...17 %) полученных результатов (оценка частот коротких замыканий) с расчётными значениями, что свидетельствует об адекватности использованного метода математического описания стадий переноса электродного металла. Кроме этого, частичное подтверждение полученных результатов описано в работе [6].

ВЫВОДЫ

1. Аналитическое определение характеристик импульсного движения электродной проволоки для нового способа сварки-наплавки с дозированной её подачей может быть основано на рассмотрении отдельных этапов формирования и переноса электродного металла с математическим определением времён существования этих этапов, выполненных на основе известных представлений о кинетике и динамике образования капель и их движения в дуговом процессе.

2. Учёт всех основных факторов, влияющих на длительность той или иной стадии формирования и переноса капель, позволяет с достаточной степенью точности установить величины обратных связей, параметры которых вводятся в регулятор электропривода механизма подачи электродной проволоки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедев, В.А., Жук, Г.В. Управление переносом электродного металла на основе импульсных алгоритмов функционирования систем с дозированием подачи электродной проволоки при механизированной дуговой сварке // Тяжёлое машиностроение. – №6. – 2017. – С. 27–32.
2. Ленивкин, В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. М.: ООО "БПМ-ПР", 2011. 369 с.
3. Потальевский, А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Часть 1. Сварка в активных газах / А.Г.Потальевский. Издание 2-е. недоработанное. – К.: ЭкоТехнолоя, 2007. – 192 с.
4. Гулаков, С.В., Бурлака, В.В., Харланов, О.В. Исследование причин разбрызгивания металла при сварке в

среде CO₂. / ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії. № 1 (32), 2014. С. 188 - 192

5. Лебедев, В.А., Гулый, МВ. Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2014. – №6. – С.47–51.

6. Лебедев, В.А., Лендел, И.В. Исследование технологических возможностей дуговой сварки и наплавки с импульсной подачей электродной проволоки // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2015. №9(51). С.20-27

REFERENCES

1. Lebedev, V.A., Zhuk, G.V. Electrode metal transfer control based on pulse algorithms of system functioning with dosed electrode wire supply at mechanical arc welding // *Heavy Engineering*. – No.6. – 2017. – pp. 27-32.

2. Lenivkin, V.A., Dyurgerov, N.G., Sagirov, H.N. *Tech-*

nological Properties of Welding Arc in Protective Gases. М.: РС “BPM-PM”, 2011, pp. 369.

3. Potapievsky, A.G. *Welding with Consumable Electrodes in Protective Gases. Part 1. Welding in Active Gases* / A.G. Potapievsky. 2-d Edition unfinished. – К.: Ecotechnology, 2007. – pp. 192.

4. Gulakov, S.P., Burlaka, V.V., Kharlanov, O.V. Analysis of metal spatter reasons at welding in CO₂. / *Bulletin of Donbass State Machine Engineering Academy*. No.1 (32), 2014. pp. 188-192.

5. Lebedev, V.A., Guly, M.V. Fast-acting valve electrodrive for equipment of mechanical arc welding // *Mechatronics. Automation. Management*. – 2014. – No.6. – pp. 47-51.

6. Lebedev, V.A., Lendel, I.V. Analysis of technological capabilities of arc welding and surfacing with pulse supply of electrode wire // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2015. No.9(51). pp. 20-27.

Рецензент д.т.н. В.В. Овчинников

Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Наукоёмкие технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru