

УДК 621.791.927.5

Д-р техн. наук В. А. Лебедев

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЁМА ПЕРЕНОСИМОЙ КАПЛИ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ КОЛЕБАНИЙ ВАННЫ И ЭЛЕКТРОДА ПРИ ДУГОВОЙ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКЕ

Определены зависимости роста объёма капли жидкого металла при наплавке от частотных характеристик колебания сварочной ванны. Рассмотрены возможности реализации наплавки в данных условиях как с короткими замыканиями дугового промежутка, так и без них, а также с применением порошковой проволоки. Получены соответствующие зависимости для объёма капли и частоты переноса капель в сварочную ванну.

Ключевые слова: объём капли, колебания сварочной ванны, частотные характеристики переноса, наплавка.

Одной из основных проблем наплавки электродной проволокой является разбрызгивание металла, что обусловлено электрическим взрывом [1, 2] металлической перемычки. Для уменьшения этих потерь в последнее время применяют наплавку с импульсной подачей электродной проволоки [3], аддитивные импульсно-дуговые методы сварки и наплавки, что позволяет снизить потери на разбрызгивание до 10-15% [4] по сравнению с режимами сварки и наплавки на стационарных режимах, а в случае многопроходной сварки применяют импульсную или шаго-импульсную технологию [5]. Вместе с тем, применение импульсной подачи проволоки в сочетании с механическими колебаниями сварочного инструмента или сварочной ванны позволит формировать не только желаемую структуру наплавляемого или свариваемого металла, но и существенно снизить потери на разбрызгивание.

В работе [6] показано, что в случае равенства скоростей плавления металла и подачи электродной проволоки процесс наплавки будет идти без замыканий, что характерно для сварки длинной дугой. Значит можно таким образом изменять значение междугового промежутка, чтобы выполнялось равенство скоростей подачи и плавления проволоки, реализация чего возможна при механизме саморегулирования дуги. Именно в период саморегулирования будут протекать процессы в дуге, обуславливающие интенсивное плавление металла сварочной проволоки и, соответственно, интенсифицирующие рост капли. Для описания этого процесса необходимо получить зависимость объёма капли от величины дугового промежутка.

В ИЭС им. Патона НАНУ была разработана установка (рис. 1), где механические колебания ванны осуществляются в 2-х плоскостях (рис. 2).

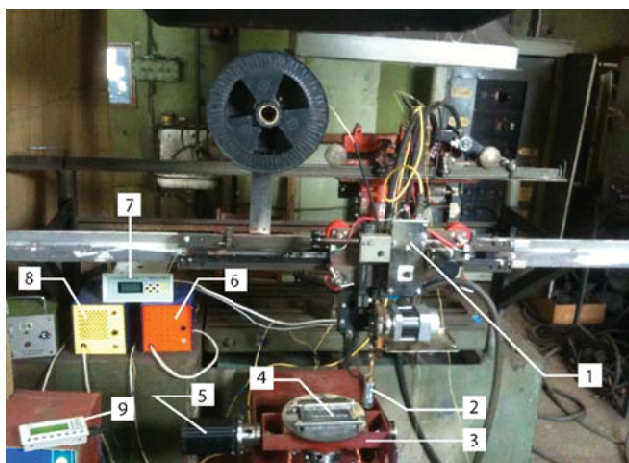


Рис. 1. Схема установки для наплавки с подвижной станиной:

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

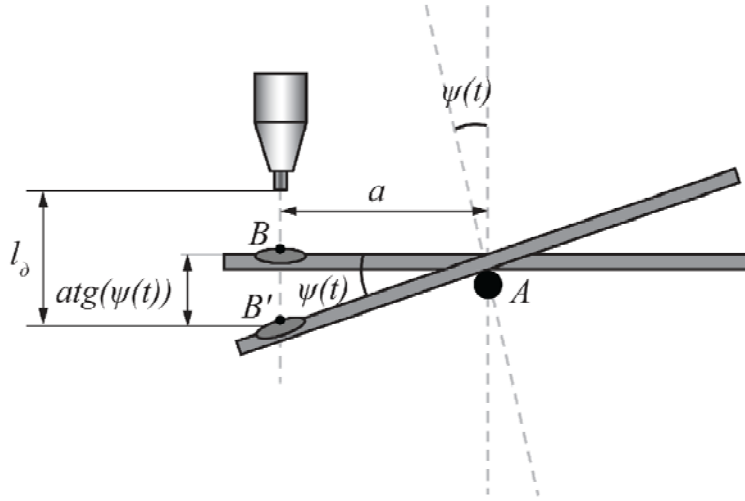


Рис. 2. Схема колебаний сварочной ванны

В работе [7] приведена зависимость скорости изменения междугового промежутка с применением колебаний сварочной ванны:

$$\frac{dl_{\delta}}{dt} = V_{nl} - V_{nэ} - V_{рк} \pm V_B, \quad (1)$$

где V_{nl} – скорость плавления проволоки, $V_{nэ}$ – скорость подачи электродной проволоки, $V_{рк}$ – скорость роста капли, V_B – скорость точки B (рис. 2) – точки пересечения оси электрода с поверхностью ванны.

Для случая равенства скоростей подачи электродной проволоки и её плавления уравнение (1) примет вид:

$$\frac{dl_{\delta}}{dt} = -V_{рк} \pm V_B. \quad (2)$$

Скоростью точки B можно пренебречь, т. к. за полупериод сварочная ванна вместе со станиной опускается и металл в точке B , занимая положение B' , начинает стекать в сварочную ванну. Величину $\frac{dl_{\delta}}{dt}$ определяет величина отрезка BB' (рис. 2) [8]:

$$\begin{aligned} V_{рк} &= -\frac{dl_{\delta}}{dt} = -\frac{d\left(BB'e^{-\frac{t_{\delta}}{\theta}}\right)}{dt} = \\ &= -\frac{\left(atg(\Psi(t))e^{-\frac{t_{\delta}}{\theta}}\right)}{\partial t} = \\ &= a\left(\frac{1}{\theta}tg(\Psi(t)) - \frac{\partial\Psi(t)}{\partial t}\frac{1}{\cos^2\Psi(t)}\right), \quad (3) \end{aligned}$$

где t_{δ} [с] – время горения дуги в процессе саморегулирования, θ [с] – постоянная саморегулирования дуги.

Знак минус обусловлен движением в противоположную сторону от скорости плавления электрода и, соответственно, от направления течения тока при обратной полярности. Таким образом, можно подобрать частотные характеристики колебания станины, что будет обеспечиваться не только равенство скоростей плавления и подачи электродной проволоки, но и непосредственно определяться скоростью роста капли.

В работе [9] показано, что скорость роста капли определяется 2 механизмами:

1. За счёт тепловой мощности дуги, которая увеличивает среднюю температуру капле со скоростью:

$$\frac{dT_{\kappa}}{dt} = \frac{U_e I_{\delta} - \lambda \frac{\pi d_{\delta}^2}{D} (T_{\kappa} - T_{nl})}{c\rho\Omega}, \quad (4)$$

где U_e [В] – падение напряжения в анодной области дуги, I_{δ} [А] – ток дуги, λ [Вт/м·К] – коэффициент теплопроводности металла электрода, $c\rho$ [Дж/м³·К] – объёмная теплоёмкость, d_{δ} [м] – диаметр электродной проволоки, T_{κ} [К] – текущая средняя температура капли, T_{nl} [К] – температура плавления металла проволоки, Ω [м³] – объём капли.

Значение T_{κ} следует выбирать в зависимости от силы тока сварки [10]. Приблизительно для обратной полярности можно принять её значение, лежащее в пределах $T_{\kappa} = 2300 \div 3400$ К.

Изменение объёма капли, вызванное изменением температуры, можно определить через коэффициент объёмного теплового расширения. Считая, что давление в капле не изменяется с ростом её объёма, можно выразить приращение объёма через приращение температуры:

$$dT = \frac{d\Omega}{\beta\Omega}, \quad (5)$$

где β [K⁻¹] – коэффициент объёмного теплового расширения. Тогда скорость изменения объёма, вызванная соответствующей скоростью температуры, будет равна:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{\beta \left(U_e I_\delta - \lambda \frac{\pi d_\delta^2}{D} (T_k - T_{nl}) \right)}{c\rho}$$

2. За счёт теплового потока в контактной зоне «капля – проволока», который вызывает дополнительное плавление электродной проволоки, что увеличивает текущий объём капли:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{\pi d_\delta^2 \frac{2\lambda}{D} (T_k - T_{nl})}{c\rho(T_k - T_{nl}) + H_L}, \quad (6)$$

где H_L [Дж/м³] – удельная теплота плавления.

Суммарная скорость роста капли $\left. \frac{d\Omega}{dt} \right|_\Sigma$ определится выражением:

$$V_{pk} = \left. \frac{d\Omega}{dt} \right|_\Sigma = \frac{\beta \left(U_e I_\delta - \lambda \frac{\pi d_\delta^2}{D} (T_k - T_{nl}) \right)}{c\rho} + \frac{\pi d_\delta^2 \frac{2\lambda}{D} (T_k - T_{nl})}{c\rho(T_k - T_{nl}) + H_L}. \quad (7)$$

Подставляя выражение (3) в (7) получим общее выражение вида:

$$\begin{aligned} a \left(\frac{1}{\theta} \operatorname{tg}(\Psi(t)) - \frac{\partial \Psi(t)}{\partial t} \frac{1}{\cos^2 \Psi(t)} \right) &= \\ &= \frac{\beta \left(U_e I_\delta - \lambda \frac{\pi d_\delta^2}{D} (T_k - T_{nl}) \right)}{c\rho} + \\ &+ \frac{\pi d_\delta^2 \frac{2\lambda}{D} (T_k - T_{nl})}{c\rho(T_k - T_{nl}) + H_L}. \end{aligned} \quad (8)$$

Откуда диаметр капли определится следующим образом:

$$D = \left| \frac{\lambda \pi d_\delta^2 (T_k - T_{nl})}{\left((T_k - T_{nl}) + \frac{H_L}{c\rho} \right)} \right| \times \frac{\left(2 - \beta \left((T_k - T_{nl}) + \frac{H_L}{c\rho} \right) \right)}{\left(a c \rho \left(\frac{1}{\theta} \operatorname{tg}(\Psi(t)) - \frac{\partial \Psi(t)}{\partial t} \frac{1}{\cos^2 \Psi(t)} \right) + \beta U_e I_\delta \right)}. \quad (9)$$

Знак модуля определяет значение диаметра капли как положительную величину. Принимая форму капли сферической, её объём будет выражаться следующей зависимостью:

$$\begin{aligned} \Omega &= \left| \frac{\pi}{6} \left(\frac{\lambda \pi d_\delta^2 (T_k - T_{nl})}{\left((T_k - T_{nl}) + \frac{H_L}{c\rho} \right)} \right)^3 \right| \times \\ &\times \left| \frac{\pi}{6} \left(\frac{\left(2 - \beta \left((T_k - T_{nl}) + \frac{H_L}{c\rho} \right) \right)}{\left(a c \rho \left(\frac{1}{\theta} \operatorname{tg}(\Psi(t)) - \frac{\partial \Psi(t)}{\partial t} \frac{1}{\cos^2 \Psi(t)} \right) + \beta U_e I_\delta \right)} \right)^3 \right|. \end{aligned} \quad (10)$$

Согласно экспериментальным данным работы [11], для диаметра проволоки 1,6÷2,0 мм процесс наплавки будет осуществляться с крупнокапельным переносом в диапазоне токов 190÷550 А при использовании источника питания с пологопадающей ВАХ и 160÷600 А – с комбинированной. Авторы, так же, отмечают важную роль сил действия плазменных потоков и реакции испарения, которые приподнимают каплю над ванной, оттесняя её с оси электрода, и приводят её в беспорядочное колебательное движение. Тогда, если капля окажется ниже взрывающейся шейки, она попадёт в сварочную ванну, если выше – каплю выбросит за пределы ванны.

Таким образом, данный подход осуществления наплавки без короткого замыкания является сложным в реализации и имеет сомнительные выгоды в плане снижения потерь на разбрызгивание.

С другой стороны, в работе [12] показано, что капля на конце электрода будет увеличиваться до тех пор, пока не замкнёт междуговой промежуток, т. е. причина возникновения коротких замыканий – рост капель, который ограничен только длиной междугового промежутка. Это обусловлено тем фактом, что, в случае промышленных режимов наплавки (сварки), плотность тока во время горения дуги небольшая, а это даёт возможность рассматривать только 2 силы: силу тяжести и поверхностного натяжения. Однако сила поверхностного натяжения может удерживать каплю диаметром, превышающим диаметр электрода в 3÷5 раз и более.

Таким образом, избежать короткого замыкания невозможно, однако, можно контролировать размер капли и, соответственно, размер перемишки, а значит и величину разбрызгивания. Диаметр капли будет равен текущей длине междугового промежутка и, в случае подвижной станины, определится из выражения:

$$l_\delta = l_{\delta n} + a \operatorname{tg}(\Psi(t)) e^{-\frac{t_\delta}{\theta}}, \quad (11)$$

где $l_{\text{дн}}$ [м] – начальная длина дуги при горизонтальном положении станины. При наплавке в CO_2 $l_{\text{н0}} \leq 4$ мм.

Тогда объём капли будет равен:

$$\Omega = \frac{\pi}{6} \left(l_{\text{дн}} + a \operatorname{tg}(\Psi(t)) e^{-\frac{t_{\text{д}}}{\theta}} \right)^3. \quad (12)$$

Частота переноса капель ν [Гц] будет определяться по выражению:

$$\nu = \frac{1}{2t_{\text{д}} + t_{\text{кз}}}. \quad (13)$$

Двойка определяет время возврата станины в горизонтальное положение, а $t_{\text{кз}}$ – время короткого замыкания.

Пример. Дано: $a = 40$ мм, $\omega = 30$ Гц, $\psi(t) = \omega t_{\text{д}}$. Тогда уравнение (12) для значений $t_{\text{д}} \approx 6 \cdot 10^{-4}$ с и $\theta \approx 4 \cdot 10^{-3}$ примет вид:

$$\Omega = \frac{3,14}{6} \left(0,003 + 0,04 \operatorname{tg} \left(2 \cdot 3,14 \cdot 30 \cdot 6 \cdot 10^{-4} \right) e^{\frac{6 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-3}}} \right)^3 \approx 17,97 \text{ мм}^3.$$

Диаметр капли будет равен: $d_{\text{к}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 17,97}{\pi}} = 3,25$ мм.

При диаметре проволоки в 2 мм и заданных частотных параметрах и начальной длине дуги, перенос будет крупнокапельным.

На кинокадрах, представленных на рис. 3, показаны основные моменты плавления и переноса электродной проволоки, при этом анализируя ряд таких кинокадров с параметрами процесса, показанном в примере, можно чётко зафиксировать, что средний диаметр капель с учётом отклонений от допущенной сферической формы достаточно близок к расчётному.

Применение колебания сварочной ванны с применением данной установки дают возможность регулировать напряжение дуги при сварке порошковой проволокой. Как отмечено в работе [13], при увеличении тока длина дуги увеличивается до 4–6 мм, что обуславливает рост напряжения и, соответственно, скорость плавления сердечника, а это определяет формирование конической формы торца сварочной проволоки, что ведёт к неравномерному формированию по форме и месту на торце капли расплавленного металла. Данный недостаток ведёт к увеличению разбрызгивания и неравномерному формированию валика. Применяя колебания сварочной ванны с помощью вышеописанной установки, можно отработать сварочный режим, при котором плавление проволоки будет происходить равномерно при повышенных токах, что требует проведения серии экспериментов.

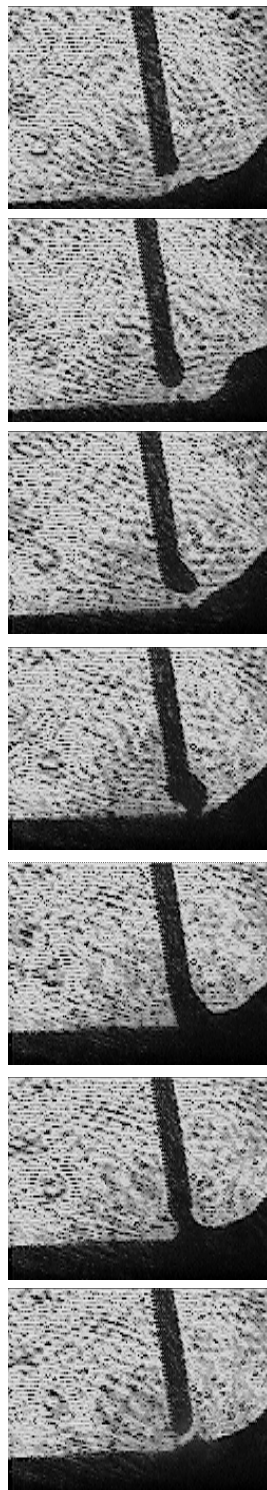


Рис. 3. Характерные моменты формирования и переноса капли электродного металла при сварке с короткими замыканиями

Выводы

1. Рассмотрены различные варианты определения зависимости объёма капли жидкого металла от частотных характеристик колебания сварочной ванны. Показано, что определение данной зависимости с условием

переноса металла в сварочную ванну без замыкания, исходя из концепции равенства скоростей подачи электродной проволоки и её плавления при наплавке в углекислом газе, является труднореализуемой на практике задачей и не приводит к существенному снижению степени разбрызгивания по причине колебания капли на торце электрода, что обусловлено силами действия плазменных потоков и реакции испарения.

2. Получена зависимость объёма капли от частотных характеристик колебания сварочной ванны при коротких замыканиях. Показано, что диаметр капли определяется размером междугового промежутка, который тем больше, чем выше частотные характеристики колебания ванны. Получено выражение для определения частоты переноса капель в сварочную ванну. Приведен пример расчёта.

3. Отмечена перспективность применения данной технологии для наплавки порошковой проволокой, что обусловлено возможностью влиять на напряжение дуги в зависимости от характера плавления торца.

Список литературы

1. Дюргеров Н. Г. О разрыве перемычки между электродом и сварочной ванной / Дюргеров Н. Г. // Сварочное производство – № 3. – 1972. – С. 4–6.
2. Заруба И. И. Электрический взрыв как причина разбрызгивания металла / Заруба И. И. // Автоматическая сварка – № 3. – 1970. – С. 14–18.
3. Особенности формирования структуры сварных соединений при дуговой наплавке с импульсной подачей электродной проволоки / Лебедев В. А., Лендел И. В., Яровицын А. В. и др. // Автоматическая сварка. – 2016. – № 3. – С. 25–30.
4. 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 / Сараев Ю. Н., Безбородов В. П., Григорьева А. А. // Сварка и диагностика. – 2013. – № 5. – С. 44–47.
5. Управление структурой сварных соединений при орбитальной TIG-сварке технологических трубопроводов компрессорных станций / [Шипилов А. В., Коновалов А. В., Бровко В. В., Полосков С. И.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 6. – С. 44–52.
6. Ищенко Ю. Л. Плавление электрода и саморегулирование дуги при сварке с периодическими замыканиями дугового промежутка / Ищенко Ю. Л., Дюргеров Н. Г. // Сварочное производство. – № 6. – 1961. – С. 9–12.
7. Дюргеров Н. Г. Причины периодических замыканий дугового промежутка при сварке короткой дугой / Дюргеров Н. Г. // Сварочное производство. – № 9. – 1974. – С. 1–3.
8. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга / Лесков Г. И. – М. : Машиностроение, 1970. – 178 с.
9. Физико-математическая модель системы «источник питания – дуга» для сварки плавящимся электродом в защитных газах / [Гецкин О. Б., Полосков С. И., Ерофеев В. А., Витько О. П.] // Тяжёлое машиностроение. – № 6. – 2008. – С. 18–20.
10. Походня И. К. Теплосодержание капель электродного металла при дуговой сварке в защитных газах / Походня И. К., Суптель А. М. // Автоматическая сварка. – № 2. – 1967. – С. 13–18.
11. Потапьевский А. Г. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: монография / Потапьевский А. Г., Сараев Ю. Н., Чинахов Д. А. – Томск : Из – во Томского политехнического ун-та, 2012. – С. 56–59.
12. Заруба И. И. Природа коротких замыканий дуги при сварке в углекислом газе / Заруба И. И. // Автоматическая сварка. – № 5. – 1973. – С. 14–17.
13. Походня И. К. Сварка порошковой проволокой / Походня И. К., Суптель А. М., Шлепаков В. Н. – К. : Наукова думка, 1972. – 31 с.

Одержано 22.12.017

Лебедев В.О. Визначення обсягу краплі електродного металу в умовах коливань ванни і електрода при дуговому механізованому зварюванні

Визначені залежності зростання об'єма краплі рідкого металу при наплавленні від частотних характеристик коливання зварювальної ванни. Розглянуті можливості реалізації наплавлення у заданих умовах як з короткими замкненнями дугового проміжку, так і без них, а також із використанням порошкового дроту. Отримані відповідні залежності для об'єма краплі й частоти переносу крапель у зварювальну ванну.

Ключові слова: об'єм краплі, коливання зварювальної ванни, частотні характеристики переносу, наплавлення.

Lebedev V. Determination of the volume of the different drop of electrode metal in the conditions of vibrations of the bath and electrode with arc mechanized welding

The dependences of growth of volume of liquid metal drops during surfacing from the frequency characteristics of the oscillation of the weld pool had been identified. The possibilities of surfacing realization under these conditions both with a short circuits the arc gap and without them, and using the cored wire had been considered. The corresponding dependences for drops volume and frequency of droplet transfer to the weld pool had been received.

Key words: drop volume, oscillations of welding pool, frequency characteristics of transfer, surfacing.