

УДК 621.791.037

Драган С. В., Трунін К. К., Сімутенков І. В.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ РЕЖИМУ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО ЗВАРЮВАННЯ ПІД ФЛЮСОМ ПУЛЬСУЮЧИМ СТРУМОМ

Ідея застосування імпульсного струму для зварювання не є новою. Широко відома технологія імпульсно-дугового зварювання, розроблена у ІСЗ ім. Є. О. Патона. Основною перевагою цього процесу та йому подібних, порівняно із використанням механічних коливань електрода, є вища стабільність системи «Джерело живлення – Дуга – Зварювальна ванна» [1]. Область застосування електричних та механічних імпульсних впливів на процес напівавтоматичного зварювання у середовищі захисних газів є достатньо вивченою [2, 3] на відміну від автоматичного зварювання під флюсом. Теоретично розглядалася можливість впливу зварювання пульсуючим струмом на процеси біля електрода, в зварювальній ванні та колошовній зоні [4], але можливості зварювального обладнання до винаходу IGBT транзисторів були обмеженими. Із застосуванням IGBT транзисторів можливо досягти частот близько 10 кГц з використанням струмів до 1400 А.

Метою даної роботи є розроблення методики розрахунку режиму для автоматичного зварювання під флюсом пульсуючим струмом.

Відмінністю запропонованого у даній роботі способу зварювання, порівняно із імпульсно-дуговим зварюванням, є відсутність базового струму. Визначимо основні параметри зварювання пульсуючим струмом: силу струму імпульсу I_i та частота імпульсів ν_i .

При цьому, по-перше, будемо виходити із того, що для надійного з'єднання елементів конструкцій необхідно забезпечити таке саме підведення енергії, як і при інших дугових способах зварювання. По-друге, будемо враховувати, що суттєвою умовою зварювання пульсуючим струмом (ЗПС) є відсутність базового струму, тому для протікання стабільного процесу час паузи повинен бути меншим або дорівнювати постійній дуги за струмом [5].

Отже виконанню першої умови графічно відповідає співвідношення параметрів діаграм процесів (рис. 1) рівняння:

$$I_i = I \frac{t_n}{t_{nep} - t_n}, \quad (1)$$

де I_i – струм в імпульсі; I – ефективний струм зварювання; t – час протікання процесу зварювання; t_i – час імпульсу; t_n – час паузи; t_{nep} – час періоду.

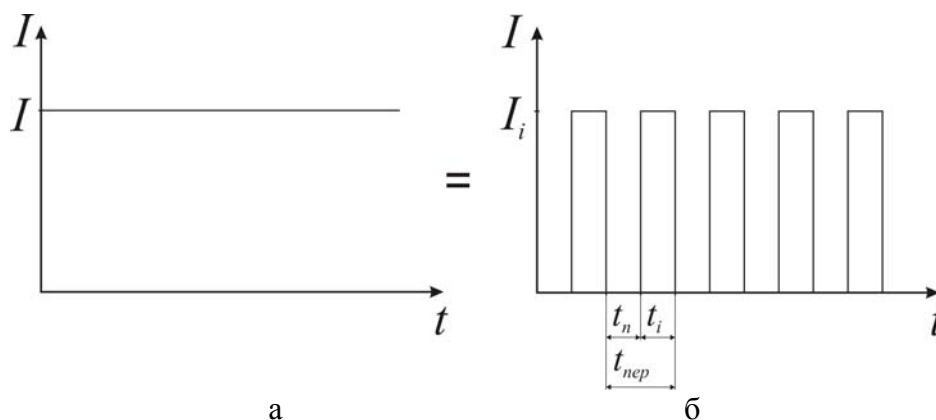


Рис. 1. Діаграми процесів дугового зварювання постійним струмом (а) та ЗПС (б):

I – ефективний струм зварювання; I_i – струм в імпульсі; t – час протікання процесу зварювання; t_i – час імпульсу; t_n – час паузи; t_{nep} – час періоду

Визначити силу струму I можна використавши рівняння миттєвого теплового балансу на торці електрода [6]:

$$q_e - q_{\text{вип}} - q_{\text{пер}} - q_{\text{т.обм}} + q_n + q_{\text{хім}} = q_2, \quad (2)$$

де q_e – потужність, що отримує електрод від джерела (дуги); $q_{\text{вип}}$ – витрати потужності на випаровування; $q_{\text{пер}}$ – те ж, на перегрівання металу краплі; $q_{\text{т.обм}}$ – те ж, на теплообмін з авколишнім середовищем; q_n – те ж, на нагрівання краплі струмом; $q_{\text{хім}}$ – те ж, за рахунок хімічних реакцій; q_2 – те ж, на плавлення металу.

Доповнимо рівняння (2) формулою для розрахунку навантажувальної прямої джерела живлення згідно ГОСТ 7012-77:

$$U = m + k \cdot I. \quad (3)$$

Отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} q_e - q_{\text{вип}} - q_{\text{пер}} - q_{\text{т.обм}} + q_n + q_{\text{хім}} = q_2; \\ U = m + k \cdot I. \end{cases} \quad (4)$$

Величини $q_{\text{т.обм}}$, q_n , $q_{\text{хім}}$, як показав оцінний розрахунок малі [6]. Нехтуючи ними запишемо систему (4) таким чином:

$$\begin{cases} q_e - q_{\text{вип}} - q_{\text{пер}} = q_2; \\ U = m + k \cdot I. \end{cases} \quad (5)$$

Система рівнянь (5) дозволяє визначити струм I та напругу U на дузі, при яких можливе існування дуги та плавлення електродного дроту. Підставивши в рівняння теплового балансу системи (5) формули для q_e , $q_{\text{вип}}$, $q_{\text{пер}}$, q_2 та виразивши $g_e = v \cdot s \cdot \rho$ знайдемо квадратне рівняння:

$$\begin{aligned} & (k \cdot \eta_e - k \cdot \alpha_e \cdot \eta_e) \cdot I^2 + (m \cdot \eta_e - m \cdot \alpha_e \cdot \eta_e) \cdot I - \\ & - (c \cdot (T_k - T_{\text{пл}}) \cdot v \cdot s \cdot \rho + [c \cdot (T_{\text{пл}} - T_c) + \lambda_{\text{пл}}] \cdot v \cdot s \cdot \rho) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

де k та m – емпіричні коефіцієнти; η_e – ефективний ККД нагріву електрода; I – сила струму на дузі; α_e – коефіцієнт, що залежить від густини струму у точці нагрівання дугою, теплофізичних властивостей металу електрода и т. д.; c – питома теплоємність; T_k , $T_{\text{пл}}$ та T_c – температура рідкого металу, температура плавлення металу та навколишнього середовища відповідно; v – лінійна швидкість подачі електроду; s – площа перерізу електродного дроту; ρ – щільність металу; $\lambda_{\text{пл}}$ – питома теплота плавлення.

Для виконання другої умови використаємо рівняння:

$$t_n = \tau, \quad (7)$$

де τ – постійна дуги за часом, тобто, динамічна характеристика дуги, що дорівнює часу, за який енергія всіх частин дуги при середній потужності втрає розсіюється.

Постійна дуги за часом, виходячи з визначення, є величиною, що позитивно впливає на стабільність процесу, – це час існування енергії дуги та теплового балансу системи незалежно від зовнішніх збурень по довжині дуги аж до розриву дуги або замикання на ванну. Вираз постійної дуги за часом запишемо таким чином [5]:

$$\tau = 1,75 \cdot 10^{-2} \frac{I^{2/3}}{U_{ef}^{67/12}}, \quad (8)$$

де I – сила струму при зварюванні постійним струмом; U_{ef} – ефективний потенціал іонізації дугового газу, що розраховується відповідно до [5]:

$$U_{ef} = -\frac{T}{5800} \ln \sum_{n=1}^n \left[\left(\frac{c_n}{c} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-5800 \cdot \frac{U_n}{T}\right) \right]. \quad (9)$$

Тут T – температура стовпа дуги; c_n – концентрація n -го елемента; c – сумарна концентрація елементів; U_n – потенціал іонізації n -го елемента.

Визначення U_{ef} для автоматичного зварювання під флюсом є досить складною задачею, тому прийємо ряд припущень, що спростять дослідження системи флюс-дуга-зварювальний метал. Припустимо, що температура стовпа дуги по всій його довжині є постійною, окисно-відновні реакції йдуть незалежно та не впливають одна на одну, масові відношення між вихідними речовинами з часом не змінюються [7]. За для врахування впливу основного металу на потенціал іонізації потрібно ввести коефіцієнт z , що відповідає відношенню маси флюсу до маси основного металу, що іонізувалися. Тоді концентрація всіх елементів, що входять до складу флюсу, буде розраховуватися за формулою:

$$c_{n1} = z \cdot c_{\phi}, \quad (10)$$

де c_{n1} – концентрація n -го елемента, що входить до складу флюсу; z – відношення маси флюсу до маси основного металу, що іонізувалися; c_{ϕ} – концентрація елемента у флюсі.

Тоді, відповідно, концентрація елементів в стовпі дуги, що входять до складу основного металу буде дорівнювати:

$$c_{n2} = (1 - z) \cdot c_{o.m.}, \quad (11)$$

де c_{n2} – концентрація n -го елемента, що входить до складу основного металу; c_{ϕ} – концентрація елемента в основному металі.

Для знаходження концентрації c_n необхідно скласти c_{n1} та c_{n2} , якщо елемент входить до складу флюсу та основного металу або прирівняти c_n до c_{n1} чи c_{n2} , якщо елемент входить тільки до складу флюсу чи основного металу.

Для визначити концентрації кожного елемента в дуговому газі необхідно спочатку розрахувати масові частки елемента та окиснювача у хімічних сполуках. Так, для сполуки $A_q B_w$ масові частки будуть дорівнювати [8]:

$$n_A = \frac{q \cdot am.m.A}{q \cdot am.m.A + w \cdot am.m.B}; \quad n_B = \frac{w \cdot am.m.B}{q \cdot am.m.A + w \cdot am.m.B}, \quad (12)$$

де n_A та n_B – масові частки елемента A та B у сполуці відповідно, $am.m.X$ – атомна маса елемента X .

Щоб знайти концентрацію елементів у стовпі дуги помножимо масову частку елементів в сполуці на концентрацію сполуки у флюсі. За виразом (9) розраховано ефективні потенціали іонізації для наступних флюсів: АН-348-А – $U_{ef} = 6,618$ В; ОСЦ-45 – $U_{ef} = 6,596$ В; АН-348-АМ – $U_{ef} = 6,623$ В; ОСЦ-45М – $U_{ef} = 6,618$ В; АН-60 – $U_{ef} = 6,601$ В; АН-8 – $U_{ef} = 6,434$ В; АН-20С – $U_{ef} = 5,696$ В; АН-22 – $U_{ef} = 5,8$ В; АН-26СП – $U_{ef} = 6,357$ В; ФЦ-9 – $U_{ef} = 6,541$ В.

Проведена оцінка вплив коефіцієнту z на ефективний потенціал іонізації флюсу показала (рис. 2), що при зміні z від 0,2 до 0,8 $U_{\text{эф}}$ змінюється в межах 5% похибки, тому для подальших розрахунків приймемо $z = 0,5$.

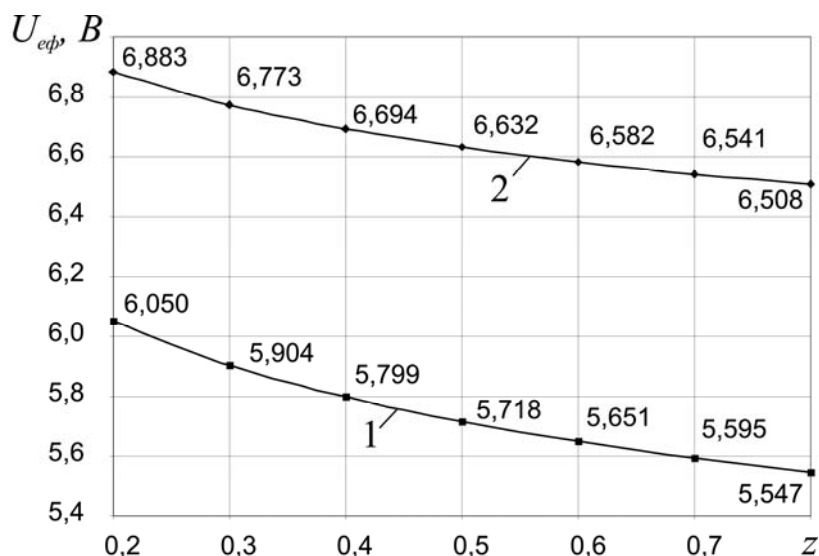


Рис. 2. Вплив коефіцієнту z на ефективний потенціал іонізації флюсів АН-20С (1) та АН-348-А (2)

За запропонованою методикою було розраховано силу струму в імпульсі для зварювання пульсуючим струмом конструкційних сталей та отримані залежності струму імпульсу від частоти імпульсів для флюсів АН-20С та АН-348-А (рис. 3) та для дротів діаметром 2–5 мм (рис. 4). Ці два флюси були обрані для порівняння через те, що вони мають найменший та найбільший ефективний потенціал іонізації з розглянутих. При цьому при виконанні розрахунків теплофізичні характеристики матеріалів та інші параметри, що входять до рівняння (6) були прийняті згідно з [6, 9, 10]. За рис. 3 можна сказати, що при одному й тому самому ефективному струмі I , імпульсний струм I_i зростає швидше із використанням флюсу АН-20С. При порівнянні швидкостей зростання імпульсного струму I_i при використанні різних діаметрів електродного дроту d_e (див. рис. 4) першість належить дроту з діаметром електроду $d_e = 5$ мм.

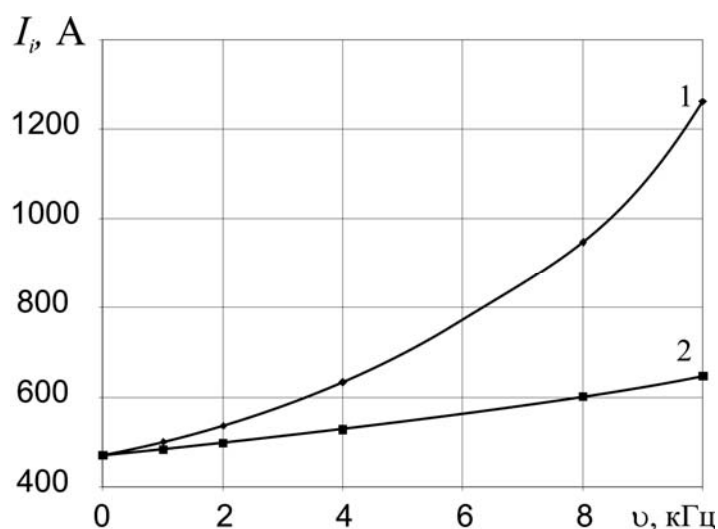


Рис. 3. Вплив частоти імпульсів на силу струму імпульсу при зварюванні під флюсами: 1 – АН-20С; 2 – АН-348-А

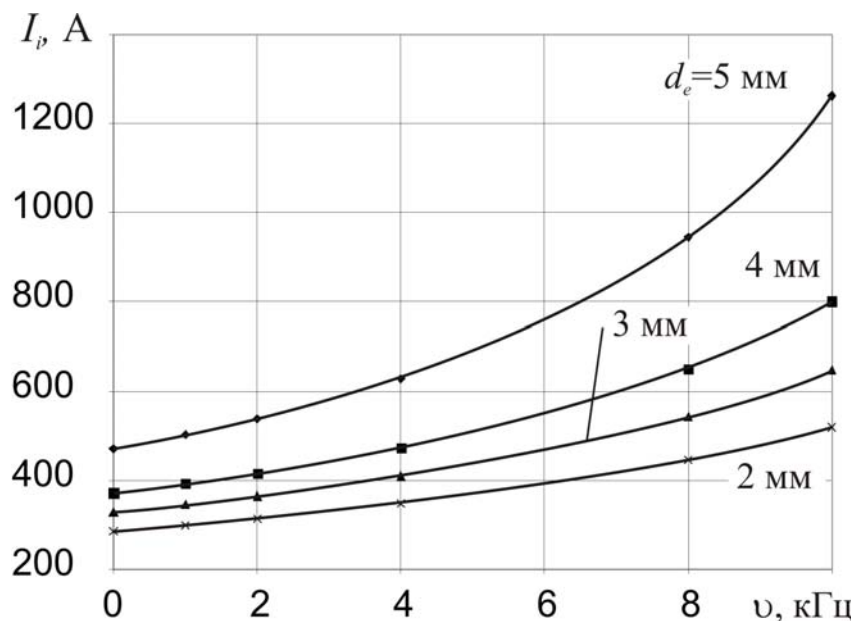


Рис. 4. Залежність струму імпульсу I_i від частоти імпульсів для електродного дроту діаметром $d_e = 2-5$ мм; флюс АН-20С

ВИСНОВКИ

Розроблена методика розрахунку ефективної сили струму та струму імпульсу при зварюванні пульсуючим струмом, яка враховує вплив хімічного складу флюсу та діаметр зварювального дроту. Найбільший ефект від застосування імпульсного струму досягається при зварюванні діаметром 5 мм та флюсами, що мають потенціал іонізації 6 В та менше.

При зміні частоти з 4 кГц до 10 кГц переважний діапазон пульсуючого струму при зварюванні дротом 5 мм під флюсом АН-348-А становить 530–650 А та 630–1260 А при зварюванні під флюсом АН-20С.

ЛІТЕРАТУРА

1. Устойчивость процессов дуговой сварки и наплавки с импульсной подачей электродной проволоки / Д. А. Дудко, В. А. Лебедев, В. Ф. Мошкин, В. Г. Пичак // Сварочное производство. – 2000. – № 1. – С. 54–59.
2. Лебедев В. А. Использование обратных связей в дуговом механизированном оборудовании (обзор) / В. А. Лебедев // Сварочное производство. – 2001. – № 6. – С. 125–128.
3. Сараев Ю. Н. Адаптивные импульсно-дуговые методы механизированной сварки при строительстве магистральных трубопроводов / Ю. Н. Сараев // Сварочное производство. – 2002. – № 1. – С. 220–225.
4. Дюргеров Н. Г. Определение свойств дуги при импульсных процессах сварки / Н. Г. Дюргеров, Д. Х. Сатиров // Сварочное производство. – 2004. – № 4. – С. 25–30.
5. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 335 с.
6. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности / А. А. Ерохин. – М. : Машиностроение, 1973. – 448 с.
7. Теория сварочных процессов / Волченко В. Н., Ямпольский В. М., Винокуров В. А. и др.; под ред. В. В. Фролова. – М. : Высшая школа, 1988. – 559 с.
8. Квасницкий В. Ф. Расчеты на ЭВМ физико-металлургических процессов сварки / В. Ф. Квасницкий, М. Н. Дорошенко, А. М. Костин. – Николаев : НКИ, 1991. – 44 с.
9. Таблицы физических величин. Справочник / Аверин В. Г., Аронзон Б. А., Бабаев Н. С. и др.; под ред. акад. И. К. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – 1008 с.
10. Багрянский К. В. Теория сварочных процессов / К. В. Багрянский, З. А. Добротина, К. К. Хренов. – К. : Вища школа, 1976. – 424 с.