

УДК 621.729.75

В.М. Павшук, І.О. Скачков,
М.В. Шевченко**ВИЗНАЧЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ШВИДКОСТІ ПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДНОГО ДРОТУ І ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ У ЗАХИСНИХ ГАЗАХ МОДУЛЬОВАНИМ СТРУМОМ****Вступ**

Нагальні проблеми в енергозберігаючих технологіях і при використанні нових матеріалів потребують розробки теоретичних засад для створення технологій дугового зварювання плавким електродом із дозованим тепловнесенням. Застосування такої технології забезпечує якісне формування зварювального шва при зварюванні без підкладки, знижує імовірність пропалів при зварюванні тонколистового металу, зменшує розбризкування, забезпечує стабільне перенесення електродного металу тощо. Особливістю цього процесу є велика кількість параметрів режиму. Оптимізувати параметри модуляції струму з метою мінімізації тепловнесення у зварювальний шов і заощадження електроенергії, а також забезпечити стабільність процесу зварювання можливо за допомогою використання математичної моделі системи електрод–дуга–зварювальний виріб. Однією із складових такої оптимізації є визначення параметрів імпульсів, для яких забезпечується стабільне плавлення електродного дроту, а також умова перенесення електродного металу “одна крапля за імпульс”. Існуючі методи розрахунку мають ряд недоліків: не враховують залежність теплофізичних параметрів матеріалу електрода від температури [1], не дають змоги обчислити параметри імпульсів [2–4]. Є публікації з розрахунку розподілу температури у вильоті електрода при зварюванні модульованим струмом [5], однак цього не достатньо для вибору параметрів модульованого струму. Тому актуальним є створення математичної моделі для аналізу процесу плавлення електрода в системі електрод–дуга при імпульсно-дуговому зварюванні для обчислення діапазону змін параметрів модуляції при стабільному плавленні електродного дроту.

Постановка задачі

Метою даної статті є створення математичної моделі процесу плавлення електрода в системі електрод–дуга при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом в аргоні чи суміші газів на основі аргону, що пов'язує між собою швидкість плавлення електродного дроту та параметри модульованого струму при вибраному режимі зварювання.

Методика досліджень

У зоні плавлення має місце баланс енергій [1]. Енергія надходить із приелектродної області і витрачається на плавлення електрода:

$$U_{\text{екв}} i(t) = c(T) \frac{dm}{dt} (T_{\text{кр}} - T_{\text{кін}}) + \lambda \frac{dm}{dt},$$

де $i(t)$ – струм, що протікає через електрод; $U_{\text{екв}}$ – еквівалентна напруга; $c(T)$ – питома теплоємність матеріалу електрода; dm – приріст маси розплавленого металу електрода; λ – питома теплота, яка визначається як сума питомих теплот перетворень у точках фазових переходів; $T_{\text{кін}}$ – температура кінця електрода (на межі твердої і рідкої фаз); $T_{\text{кр}}$ – середня температура краплі розплавленого металу. Еквівалентна напруга визначається як [6]

$$U_{\text{екв}} = U_{\text{а}} - U_{\text{вих}} - \frac{3kT_{\text{д}}}{2e},$$

де $U_{\text{а}}$ – анодне падіння напруги; $U_{\text{вих}}$ – робота виходу електронів; $T_{\text{д}}$ – температура дуги зварювання. Температуру краплі розплавленого металу вибирали в діапазоні 2000–2800 К залежно від режиму зварювання [6]. Більшому зварювальному струму відповідає більша температура краплі.

Відомо, що теплофізичні характеристики матеріалу електрода залежать від температури. До того ж, ці залежності нелінійні. Зважаючи на це, для розв'язання даної задачі використували числові методи розрахунків.

Враховуючи, що $dm = \gamma S v_{\text{пл}}$, маємо

$$U_{\text{а}} i(t) = \gamma S v_{\text{пл}} [c(T)(T_{\text{кр}} - T_{\text{кін}}) + \lambda], \quad (1)$$

де γ – густина матеріалу електрода; S – площа поперечного перерізу електрода; $v_{\text{пл}}$ – швидкість плавлення електрода.

З рівняння (1) знаходимо швидкість плавлення електродного дроту:

$$v_{\text{пл}} = \frac{U_a i(t)}{\gamma S [c(T)(T_{\text{кр}} - T_{\text{кін}}) + \lambda]}.$$

Температура межі твердої і рідкої фаз торця електрода залежить від нагрівання вильоту електрода зварювальним струмом та енергією дуги. Нагрівання енергією дуги враховано в рівнянні (1), а нагрівання вильоту електрода струмом, що протікає в ньому, визначається формулою [2]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\rho(T)i(t)^2}{\gamma c(T)S^2}.$$

Враховуючи, що $dm = \gamma S v$, отримуємо

$$\frac{dT}{dl} = \frac{\rho(T)i(t)^2}{\gamma c(T)S^2 v_e}, \quad (2)$$

де v_e – швидкість подачі електродного дроту; $\rho(T)$ – питомий електричний опір. Відомо [6], що за рахунок контактного опору в струмовідводі електродний дріт нагрівається і на виході з мундштука має температуру, близьку до 300 °С.

Однією з умов стабільності процесу горіння дуги при зварюванні плавким електродом у захисних газах є рівність значень середньої швидкості подачі електродного дроту і швидкості його плавлення. Ця умова

взята нами для розв'язання системи рівнянь (1) і (2) за допомогою числових методів. Як відомо, розплавлений метал електрода переходить у зварювальну ванну краплями. Крапля на торці електрода з деякими припущеннями набирає форму сфери. Об'єм такої сфери визначається як

$$V_k = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_e}{2} \right)^3. \quad (3)$$

Як правило, з технологічного завдання відомі переріз зварного з'єднання і форма зварного шва, звідки можна визначити об'єм наплавленого металу на одиницю довжини шва. Тоді кількість крапель, необхідних для заповнення такого шва, становитиме

$$n_k = \frac{V_H}{V_k},$$

де V_H – об'єм наплавленого металу.

Далі розраховуватимемо час зварювання одиниці шва і період модульованого струму, виходячи з того, що за один імпульс струму переноситься одна крапля:

$$t_{\text{пер}} = \frac{t_{\text{зв}}}{n_k} = \frac{L V_k}{v_{\text{зв}} V_H}, \quad (4)$$



Рис. 1. Алгоритм роботи розрахункової моделі

де $v_{зв}$ – швидкість зварювання; L – довжина шва.

За формулами (1)–(4) побудовано розрахункову модель для виконання обчислень на комп'ютері. Алгоритм роботи моделі наведено на рис. 1.

Якщо виліт електрода перевищує 8 мм, а частота модульованого струму більша 50 Гц, то можна знехтувати коливаннями температури вильоту електрода за рахунок пульсацій струму [5]. Тому розрахунок нагрівання вильоту електрода проводився за ефективним значенням струму.

Приклади роботи розрахункової моделі

Візьмемо таку форму струму при імпульсно-дуговому зварюванні, як показано на рис. 2.

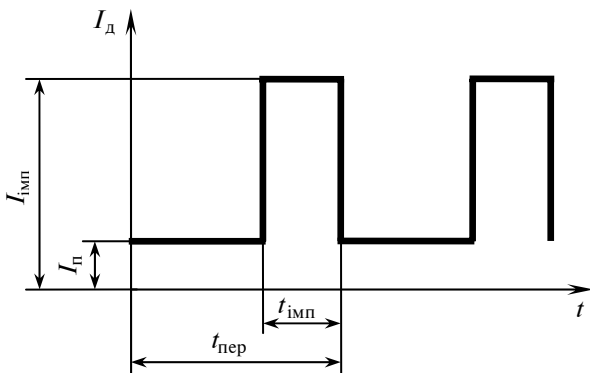


Рис. 2. Зміна зварювального струму при імпульсно-дуговому зварюванні

Розрахунки проводились для одностороннього зварювання без розробки кромки металу товщиною 2,2 мм. Об'єм наплавленого металу визначався з геометричних розмірів зварного шва (рис. 3) [7]: $V_H = F_H L = 0,73 g l L$.

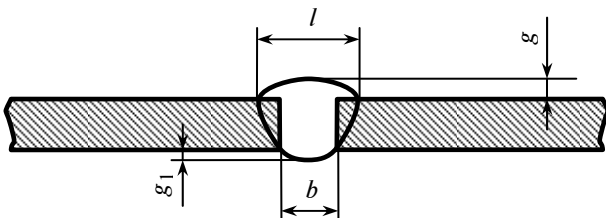


Рис. 3. Форма зварного шва

Розрахунок проводився за таких умов:

$d_e = 1 \text{ мм}, L = 1 \text{ м}, v_{зв} = 25 \text{ м/год};$

$d_e = 1 \text{ мм}, L = 1 \text{ м}, v_{зв} = 35 \text{ м/год};$

$d_e = 1,6 \text{ мм}, L = 1 \text{ м}, v_{зв} = 25 \text{ м/год};$

$d_e = 1,6 \text{ мм}, L = 1 \text{ м}, v_{зв} = 35 \text{ м/год}.$

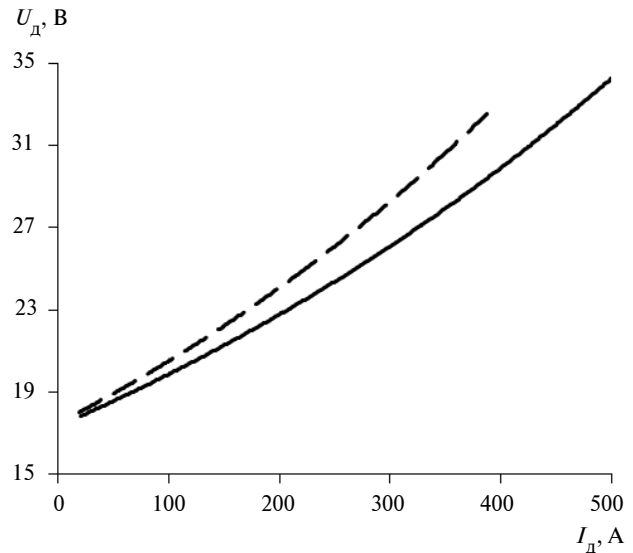


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики дуги

Діапазони значень струму бази I_6 і струму імпульсу $I_{імп}$ вибиралися при використанні умов нормального горіння дуги та можливостей джерел живлення: $I_6 = 20–120 \text{ А}, I_{імп} = 300–500 \text{ А}$. Довжина вильоту електрода при цьому дорівнювала десяти діаметрам електродного дроту.

Напруга на дузі під час імпульсу і паузи знаходилась за вольт-амперними характеристиками дуги, визначеними на основі проведених нами експериментів (рис. 4). Як захисний газ використовувалась суміш $\text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$, яка є найбільш вживаною при зварюванні модульованим струмом низьколегованих сталей.

Апроксимацію вольт-амперних характеристик здійснювали експоненціальною функцією методом найменших квадратів:

- для дроту діаметром 1 мм: $U(I) = 17,87 \times e^{0,001533 I}$;

- для дроту діаметром 1,6 мм: $U(I) = 17,47 \times e^{0,001346 I}$.

В результаті розрахунку отримали область параметрів імпульсів, в якій виконується умова $v_{пл} = v_e$, тобто умова стабільного плавлення електродного дроту (рис. 5, а–г).

Періоди імпульсів для зазначених вище умов становлять 15, 11, 39 і 28 мс, а швидкість плавлення електродного дроту – 4,6, 6,5, 2,8 і 4 м/хв, відповідно.

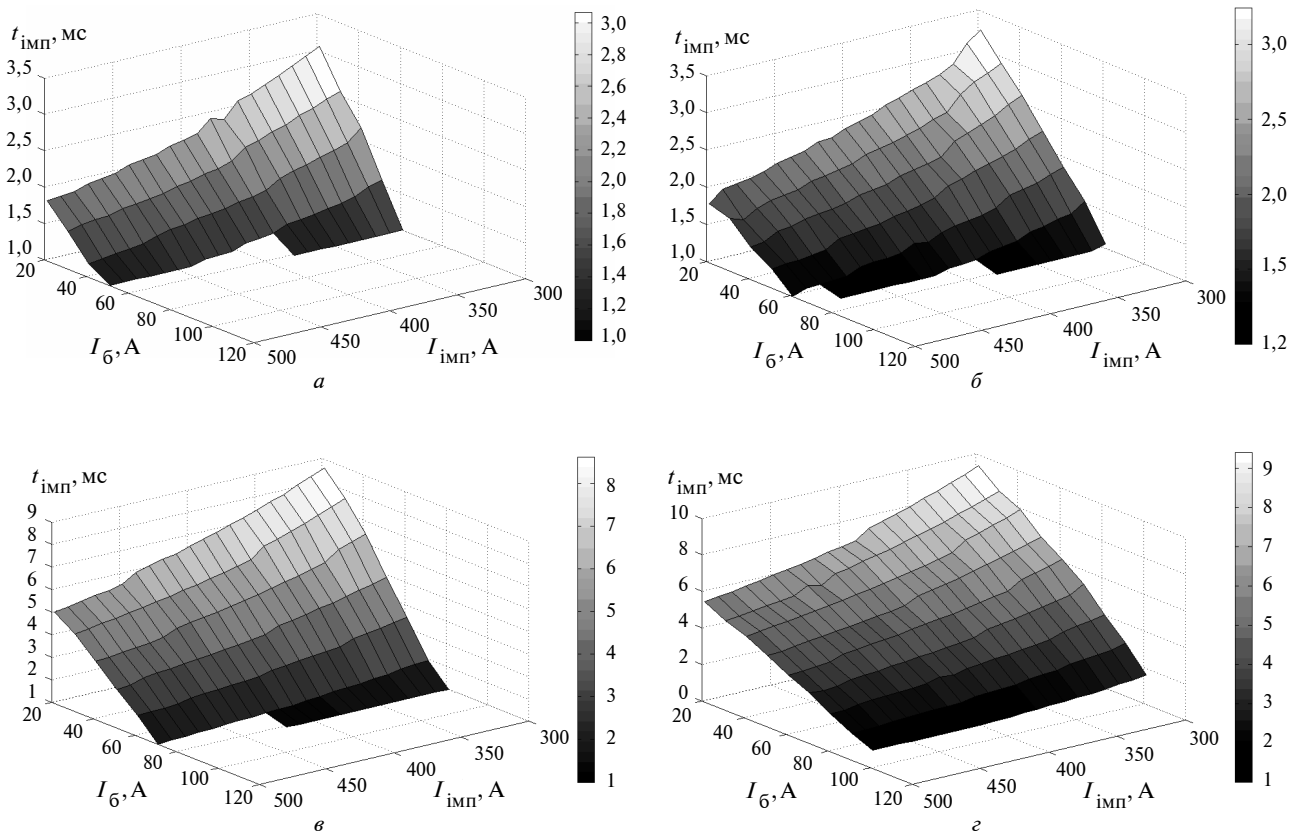


Рис. 5. Результат розрахунку параметрів імпульсів: *a* – $d_e = 1$ мм, $v_{зв} = 25$ м/год; *б* – $d_e = 1$ мм, $v_{зв} = 35$ м/год; *в* – $d_e = 1,6$ мм, $v_{зв} = 25$ м/год; *г* – $d_e = 1,6$ мм, $v_{зв} = 35$ м/год

Висновки

Розроблена математична модель дає можливість розрахувати область параметрів імпульсів при зварюванні модульованим струмом в аргоні і його сумішах, для якої виконується умова рівності швидкостей подавання і плавлення електродного дроту, а також умова “одна крапля за імпульс”.

Розраховані за допомогою розробленої моделі параметри імпульсного струму, при яких виконується умова рівності швидкостей плавлення і подавання електродного дроту, для

прийнятого розміру краплі добре узгоджуються з уже відомими експериментальними даними.

Величина базового струму має істотний вплив на швидкість плавлення електродного дроту. Від точності підтримання базового струму залежить стабільність процесу зварювання.

Звужити область можливих значень параметрів імпульсів можливо при подальших дослідженнях (завдяки накладанню додаткових) із врахуванням умов із забезпечення певних глибин проплавлення зварюваного металу та розміру зварувальної ванни.

В.М. Павшук, І.О. Скачков, Н.В. Шевченко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ СКОРОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ И ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСОВ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ МОДУЛИРОВАННЫМ ТОКОМ

Создана математическая модель для численного решения многопараметрической нелинейной за-

V.M. Pavshuk, I.O. Skachkov, M.V. Shevchenko

ON DETERMINING THE RELATION BETWEEN ELECTRODE MELTING SPEED AND IMPULSE PARAMETERS BY MIG WELDING WITH MODULATED CURRENT

The paper proposes the mathematical model for numerical solving of multi-parameter non-linear computational problem for analysis of the electrode

дачи анализа процесса плавления электрода в системе электрод–дуга при импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом в аргоне или смеси газов на основе аргона для определения параметров импульсов. Рассчитаны параметры импульсов для импульсно-дуговой сварки в защитных газах. Получена область параметров импульсов, при которых выполняется условие равенства скорости подачи и скорости плавления электродной проволоки.

melting process in the "electrode–arc" system. This model can be utilized under the conditions of pulsed metal arc welding by using argon or argon-based mixtures as a shielding gas. In addition, impulse parameters are calculated for the pulsed MIG welding. As a result, we obtain an area of impulse parameters which ensures the equality of electrode feed speed to its melting speed.

1. *Сидорец В.Н., Жерносеков А.М.* Численное моделирование системы источник питания–дуга с плавящимся электродом // Автомат. сварка. – 2004. – № 12. – С. 10–16.
2. *Пентегов И.В., Петриенко О.И.* Метод расчета падения напряжения по длине вылета электрода с учетом нелинейности теплофизических параметров // Там же. – 2002. – № 4. – С. 30–33.
3. *Пентегов И.В., Сидорец В.Н.* Сравнительный анализ моделей динамической сварочной дуги // Там же. – 1989. – № 2. – С. 33–36.
4. *Пентегов И.В., Сидорец В.Н., Генис И.А.* Моделирование сварочной цепи как элемента электрической цепи и построение схем замещения // Там же. – 1984. – № 12. – С. 26–30.
5. *Кархин В.А., Федотов Б.В., Бабкин И.Н., Субраманиам С.* Распределение температуры и падения напряжения в вылете плавящегося электрода при сварке постоянным и пульсирующим током // Сварочное производство. – 2004. – № 8. – С. 10–20.
6. *Пентегов И.В., Петриенко О.И.* К аналитическому определению основных параметров режимов механизированной сварки в среде защитных газов // 36. наук. пр. НУК. – Николаїв: НУК, 2006. – № 1. – С. 68–79.
7. *Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П.* Технология и оборудование сварки плавлением: Учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.

Рекомендована Радою
зварювального факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
30 грудня 2008 року