

УДК 621.791.753

П.Ю. Сидоренко, Р.М. Рижов,  
А.О. Золотовський, Г.П. Болотов

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ДІЙ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПЕРЕНОСУ ЕЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛУ

### Вступ

При дуговому зварюванні плавким електродом застосовуються механічні, електричні, магнітні і комбіновані способи керування процесом переносу електродного металу.

Недоліками механічного керування переносом електродного металу є малі амплітуда і частота вібрації електрода (до 100 коливань/с) [1]. Електричні способи характеризуються відсутністю додаткових апаратних засобів для їх реалізації, що є значною перевагою. Це зумовлює їх широке застосування в технологіях автоматичного зварювання конструкційних сталей і низьколегованих сплавів. Однак при імпульсно-дуговому зварюванні їх обмежено використовують для зварювання середньо- і складнолегованих сталей і сплавів, що пояснюється характерним для даних імпульсних дій перегріванням крапель електродного металу і, як наслідок, вигоранням його легкоплавких складових. До того ж, через характерні пульсації світлового потоку дуги імпульсно-дугові технології обмежено використовуються при ручному і напівавтоматичному зварюванні. Тому в практиці дугового зварювання набувають розвитку способи керування масопереносом за допомогою електромагнітних дій (ЕМД).

Аналіз літературних джерел показав, що для розв'язання таких задач найбільш ефективним способом є застосування ЕМД на основі імпульсних керуючих магнітних полів (КМП). Він ґрунтується на створенні силової дії на краплю розплавленого металу, яка виникає при взаємодії височастотного поля індуктора з індуктованим в її об'ємі струмом. Перевагами цього способу є вилучення перегріву поверхонь крапель, зменшення витрат електродного металу на розбризкування та забезпечення точності дозування процесу нанесення покриття при наплавленні. До того ж, існує можливість керувати не тільки процесом відриву крапель із торця електрода, а й формуванням траєкторії їх переміщення в заданому напрямку.

### Постановка задачі

Зазначений спосіб керування процесом переносу крапель електродного металу застосовувався при дуговому дозованому паянні міддю і бронзою деталей малої товщини [2]. З врахуванням того, що його ефективність значною мірою залежить від електропровідності матеріалу зварювального дроту в розплавленому стані, і того, що в конструкційних і нержавіючих сталях дана властивість гірша, ніж у мідних сплавів, необхідно було проводити комплекс досліджень з метою виявлення оптимального діапазону параметрів ЕМД для різних зварювальних матеріалів. До того ж, параметри ЕМД слід узгоджувати з параметрами режиму зварювання, від яких істотно залежать як розміри крапель, так і частота їх переходу в зварювальну ванну. Зокрема, для збільшення величини вихрових струмів, генерованих в об'ємах крапель, необхідно забезпечувати вертикальний фронт імпульсів КМП. У зв'язку із складністю експериментальних досліджень у цьому напрямку більш раціональним є їх проведення за допомогою математичних моделей.

Таким чином, метою статті є розробка математичної моделі для визначення оптимальних параметрів керуючих магнітних полів для умов зварювання плавким електродом із врахуванням теплофізичних властивостей матеріалу краплі в розплавленому стані і електричних параметрів режиму зварювання.

### Методика проведення досліджень

При визначенні сили, що створюється імпульсним КМП і діє в напрямку осі  $Z$  на краплі розплавленого металу на торці плавкого електроду користувались залежністю [3]

$$\mathbf{F} = \mathbf{P}_n \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \mathbf{r}}, \quad (1)$$

де  $\mathbf{P}_n$  – магнітний момент, створений вихровими струмами в об'ємі краплі;  $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \mathbf{r}}$  – градієнт індукції магнітного поля.

Краплю розглядали як кулю радіуса  $r_k$ . У першому наближенні вважали, що в її об'ємі магнітне поле є однорідним. Виділимо в краплі кільце радіуса  $r_1 = r \sin \alpha$ , розміщене перпендикулярно вектору індукції магнітного поля (рис. 1), де  $r$  – радіус-вектор, що з'єднує центр краплі з даною точкою кільця;  $\alpha$  – полярний кут.

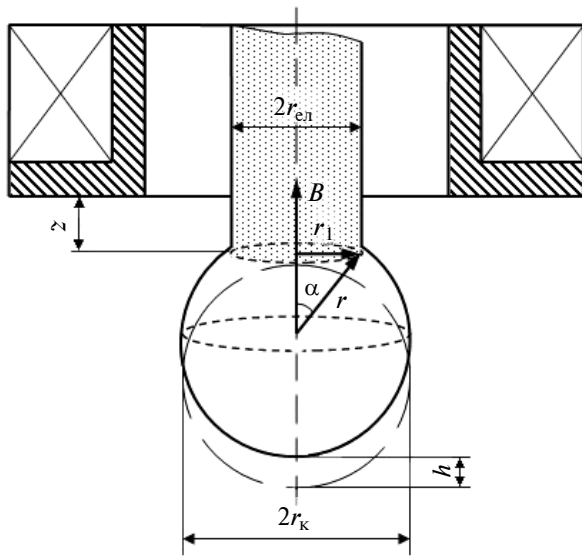


Рис. 1. Схема для розрахунку параметрів масопереносу електродного металу

Електричний опір кільця становить

$$R_i = \rho \frac{l}{dS} = \rho \frac{2\pi r \sin \alpha}{dr d\alpha},$$

де  $l$  та  $dS$  – відповідно довжина і площа перерізу кільця;  $\rho$  – питомий опір металу краплі;  $S$  – площа кільця:  $S = \pi r^2 \sin^2 \alpha$ . Із врахуванням зазначеного магнітний потік через кільце становить  $\Phi = B \pi r^2 \sin^2 \alpha$ , а вираз для знаходження ЕРС індукції в кільці має вигляд

$$\varepsilon_i = \frac{dB}{dt} \pi r^2 \sin^2 \alpha.$$

Індукований струм у кільці знаходиться із співвідношення

$$dI = \frac{\varepsilon_i}{R_i} = \frac{dB}{dt} \frac{1}{2\rho} r^2 \sin \alpha dr d\alpha.$$

Для розрахунку елемента магнітного моменту використовується вираз

$$dP_n = dIS = \frac{dB}{dt} \frac{1}{2\rho} r^2 \sin \alpha dr d\alpha \pi r^2 \sin^2 \alpha,$$

який після перетворень набуває вигляду

$$P_n = \frac{2\pi r_k^5}{15\rho} \frac{\partial B}{\partial t}.$$

Із врахуванням залежності (1) отримали формулу для визначення електромагнітної сили, що діє на краплю:

$$F_z = \frac{2\pi r_k^5}{15\rho} \frac{\partial B_z}{\partial t} \left( \frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{\partial B_z}{\partial z} \right). \quad (2)$$

Для здійснення оптимізації параметрів індукції імпульсного КМП формувались залежності, які містять теплофізичні властивості зварювального дроту і електричні параметри режиму зварювання, що впливають на процес його плавлення. Для цього розглядався баланс основних сил, що діють на краплі. При зварюванні в нижньому положенні маємо

$$P_{EMD} + P_{ED} + P_T > P_\sigma, \quad (3)$$

де  $P_{ED}$ ,  $P_T$  і  $P_\sigma$  – відповідно електродинамічна сила, сила тяжіння і сила поверхневого натягу. Вони знаходились із залежностей [4, 5]

$$P_{ED} = \frac{\mu I_{зв}^2}{4\pi} \ln \frac{r_{ел}}{r_k}, \quad (4)$$

$$P_T = \rho_k V_k g, \quad (5)$$

$$P_\sigma = 2\pi \sigma_{м-г} \frac{r_{ел}^2}{r_k}, \quad (6)$$

де  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $\sigma_{м-г}$  – коефіцієнт поверхневого натягу на межі метал краплі–захисний газ (його величину вибирали за викладеним у праці [4]);  $I_{зв}$  – зварювальний струм;  $\mu$  і  $\rho_k$  – відповідно магнітна проникність і густина розплаву краплі;  $V_k$  – її об'єм:  $V_k = \frac{\pi}{6}(8r_k^3 - 12hr_{ел}^2 - h^2)$ ;  $h$  – відстань, на яку необхідно перемістити краплю для її відриву з торця електрода (рис. 1):  $h = r_k - \sqrt{r_k^2 - r_{ел}^2}$ ;  $r_{ел}$  – радіус електродного дроту ( $r_{ел} \leq r_k$ ).

Підставивши (2) в (3), отримуємо залежність для розрахунку оптимального градієнта індукції  $\frac{\partial B_z}{\partial z}$ :

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} > \frac{(P_\sigma - P_{ED} - P_T)}{\frac{2\pi r_k^5}{15\rho} \frac{\partial B_z}{\partial t}}. \quad (7)$$

Ця нерівність відповідає фізичним закономірностям. Із зменшенням радіуса  $r_k$  і збільшенням питомого опору розплаву крапель зменшу-

ється індукований в їх об'ємах струм, що призводить до зниження ефективності керування процесом масопереносу. Компенсація негативних змін досягається збільшенням індукції або крутизни переднього фронту імпульсів КМП. До того ж, частоту повторення імпульсів КМП слід узгоджувати з часом утворення крапель електродного металу заданого діаметра, який залежить від зварювального струму і теплофізичних властивостей дроту.

### Експериментальне визначення параметрів масопереносу електродного металу при зварюванні з імпульсними ЕМД

Зміни параметрів масопереносу електродного металу при зварюванні з імпульсними ЕМД досліджували за методикою, що ґрунтується на наплавленні на мідний диск, що обертається із заданою кутовою швидкістю, яка в умовах експерименту дорівнювала 0,185 об/с. Наплавлення здійснювали на режимі:  $I_{зв} = 150$  А;  $U_0 = 22$  В; швидкість подавання електродного дроту діаметром  $d_{др} = 1,2$  мм дорівнювала 85 мм/с; виліт електрода становив 30 мм. Високочастотні імпульси КМП у зоні зварювання генерувались почерговим розрядом високовольтних конденсаторів ємністю 100 мкФ на котушку індуктора, яка містила 24 витки мідного дроту, намотаних у чотири шари. Разом із системою водяного охолодження її було розміщено на зовнішній поверхні феромагнітного сопла. Конденсатори заряджались до напруги 600 В.

Частота розряду конденсаторів ( $f_{імп}$ ) змінювалась з кроком 10 Гц за допомогою ввімкнених у коло живлення індуктора тиристорних контакторів, керованих від спеціалізованого генератора.

Періодично верхня поверхня диска діаметром 500 мм змашувалась протипригарною рідиною. Для забезпечення однакового часу горіння дуги, який у кожному експерименті становив 15 с, зварювальне джерело живлення, генератор імпульсів КМП і привід переміщення спеціалізованого пальника в напрямку до центра диска вмикали за допомогою пристрою керування з високоточним таймером. Обробка експериментальних даних починалася з вимірювання відстаней між сусідніми краплями, що необхідно для визначення частоти переносу. Після цього краплі розділялись на фракції за допомогою каліброваних ситечок і в такий спосіб оцінювались зміни їх діаметрів.

Було виявлено, що при зварюванні у звичайних умовах (на рис. 2  $f_{імп} = 0$  Гц) більшість крапель має діаметр 3–3,5 мм. Застосування високочастотних імпульсних ЕМД одночасно із збільшенням у 2–2,5 рази загальної кількості крапель призводило до істотного зменшення їх діаметрів. Підвищення частоти одинарних імпульсів КМП спричинювало посилення зазначеного позитивного ефекту. Найбільш помітно збільшувалась кількість крапель діаметром 1,5 мм (порівняно із звичайними умовами в 6–8 разів).

### Перевірка адекватності математичної моделі

Процедура перевірки адекватності розробленої математичної моделі реальним умовам зварювання полягала в порівнянні розрахункових і експериментальних даних. Встановлено, що при зварюванні без ЕМД  $f_{імп} = 0$  Гц (див. рис. 2) більшість крапель має діаметр 3–3,5 мм, що досить точно відповідає розрахунковим даним. Функції  $(P_T + P_{ЕД} + P_{ЕМД})(d_{кр})$  і  $P_{\sigma}(d_{кр})$  перетинаються вже при  $d_{кр} = 1,7$  мм, що також відповідає експериментальним даним.

Проведений комплекс досліджень показав, що розрахункова схема відповідає фундаментальним законам фізики. Розрахункові і экс-

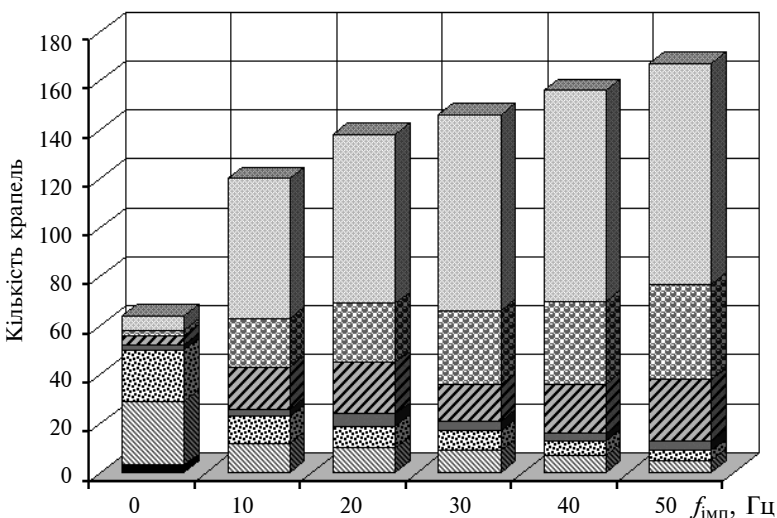


Рис. 2. Зміни при зварюванні з імпульсними ЕМД кількості крапель різних діаметрів  $d_{кр}$  (в мм): ■ – 5; ▨ – 3,5; ▩ – 3; ▪ – 2,8; ▫ – 2,5; ▬ – 2; ▭ – 1,5

периментальні дані відрізняються не більше ніж на 10 відсотків. Це свідчить про адекватність розробленої розрахункової схеми і можливість її використання в даних дослідженнях.

### Результати досліджень

Із збільшенням радіуса  $r_k$  зростає вага крапель і зменшується відстань, на яку їх треба перемістити для відриву краплі з торця електродного дроту. При цьому для керування процесом масопереносу необхідні менш інтенсивні ЕМД. Слід зазначити, що із збільшенням діаметра електродного дроту для відриву крапель однакового діаметра необхідні більші градієнти індукції  $\frac{\partial B_z}{\partial z}$  і, відповідно, індукції на торці електрода  $B_{zm}$  (рис. 3, а, б). Це пояснюється від-

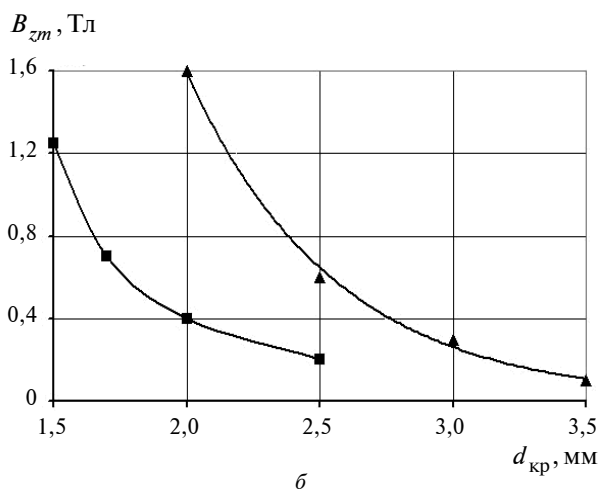
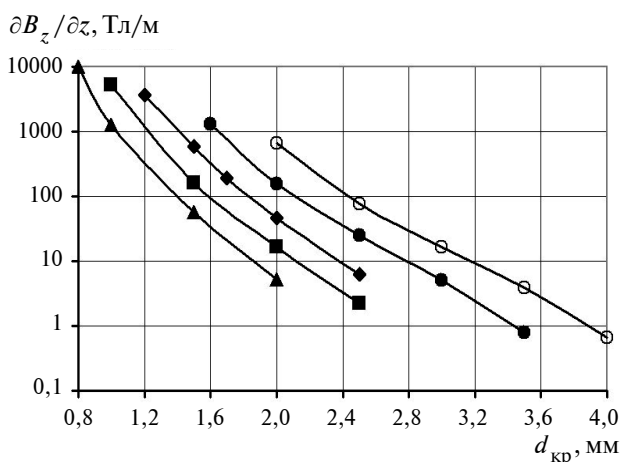


Рис. 3. Залежність параметра  $\partial B_z/\partial z$  (а) і  $B_{zm}$  (б) від діаметра крапель: ▲, ■, ◆, ●, ○ – діаметр електродного дроту дорівнює відповідно 0,8, 1, 1,2, 1,6 і 2 мм

повідними змінами сили поверхневого натягу. Індукції  $B_{zm}$  знаходили за методикою, наведеною в працях [6, 7].

Баланс сил, що діють на краплі, аналізували з використанням системи кривих, побудованих за залежностями (2)–(6) (рис. 4). Виявлено, що в умовах експериментів електродна сила порівняно з іншими найменше впливає на процеси масопереносу електродного металу. У вихідних умовах діаметр крапель не може бути меншим за той, що визначається перетином функцій  $(P_T + P_{ED})(d_{кр})$  і  $P_\sigma(d_{кр})$  на рис. 4.

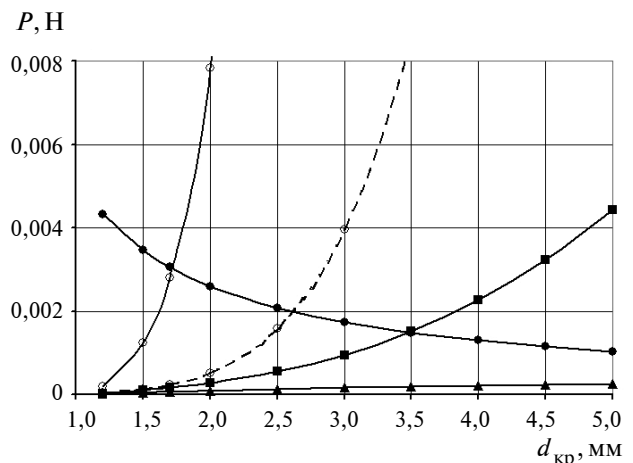


Рис. 4. Баланс сил, що діють на краплі електродного металу при зварюванні з імпульсними ЕМД: ▲ –  $P_{ED}$ ; ■ –  $P_T$ ; ● –  $P_\sigma$ ; ○ –  $P_{EMD}$ ; —, - - - - відповідно зварювання в нижньому і стельовому положенні

Розрахунки показали, що відрив крапель у звичайних умовах повинен відбуватись при  $d_{кр} = 3,5$  мм. Застосування імпульсних ЕМД призводить до зміни балансу сил, що діють на краплі. Функції  $(P_T + P_{ED} + P_{EMD})(d_{кр})$  і  $P_\sigma(d_{кр})$  перетинаються вже при  $d_{кр} = 1,7$  мм. При зварюванні в стельовому положенні сила тяжіння протидіє відриву крапель. При незмінних параметрах імпульсних ЕМД це призвело до збільшення їх діаметра до 2,6 мм.

### Висновки

Для максимально ефективного керування за допомогою ЕМД процесом масопереносу електродного металу оптимальну індукцію імпульсного магнітного поля слід вибирати із врахуванням його хімічної композиції і заданого діаметра крапель.

Частота імпульсів КМП має відповідати частоті утворення крапель на торці електрода, яка у свою чергу залежить від параметрів режиму зварювання. До того ж, із збільшенням діаметра електродного дроту для відриву крапель однакового діаметра необхідні більші градієнти індукції, що пояснюється відповідними змінами сили поверхневого натягу.

Для подальшого розвитку досліджених імпульсних дій з метою комплексного керування процесами масопереносу електродного металу і кристалізації ванни необхідне застосування модульованих аксіальних магнітних полів, які отримують одночасним генеруванням у зоні зварювання КМП різної частоти.

П.Ю. Сидоренко, Р.Н. Рыжов, А.А. Золотовский,  
Г.П. Болотов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА

Разработана математическая модель для определения оптимальных параметров управляющих магнитных полей для условий сварки плавящимся электродом с учетом теплофизических свойств материала капли в расплавленном состоянии и электрических параметров режима сварки. Определены оптимальные градиенты и амплитуды индукции для эффективного управления процессом переноса электродного металла. Исследованы изменения параметров массопереноса при сварке с импульсными электромагнитными воздействиями.

P.Yu. Sidorenko, R.M. Ryzhov, A.O. Zolotovskiy,  
G.P. Bolotov

PARAMETERS DETERMINATION OF IMPULSIVE ELECTROMAGNETIC ACTIONS FOR THE PROCESS CONTROL OF ELECTRODE METAL TRANSFER

In this paper, we develop the mathematical model, which allows calculating the optimum parameters of the control magnetic field for welding by a consumable electrode, taking into account the thermo-physical material properties of drop in the molten state and electric parameters of welding conditions. Specifically, we determine the optimum gradients and amplitudes of induction for the effective control of electrodes metal transfer. We study the change of metal transfer parameters at welding with the pulsive electromagnetic operations.

1. *Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н.* Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
2. *Тарасов М.М., Капустин С.С.* Применение высокочастотного электромагнитного поля для дозированного переноса капель электродного металла // Автомат. сварка. – 1982. – № 8. – С. 10–12.
3. *Нейман Л.Р., Демирчан К.С.* Теоретические основы электротехники. Т. 1. – М.; Л.: Энергия, 1966. – 408 с.
4. *Пацкевич И.Р., Деев Г.Ф.* Поверхностные явления в сварочных процессах. – М.: Металлургия, 1974. – 120 с.
5. *Заруба И.И., Дименко В.В.* Эффект действия электромагнитной силы в расплавленном металле применительно к массопереносу в дуге // Автомат. сварка. – 1995. – № 2. – С. 22–32.
6. *Рыжов Р.М., Сидоренко П.Ю., Золотовский А.О.* Принципы конструирования специализованных пальников для дугового зварювання з електромагнітними діями // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2006. – № 1. – С. 54–59.
7. *Рыжов Р.Н., Сидоренко П.Ю., Золотовский А.А.* Зависимость параметров внешних электромагнитных воздействий от технологических особенностей дуговых способов сварки // Вестн. НТУУ “КПИ”. – 2005. – № 46. – С. 114–116.

Рекомендована Радою  
зварювального факультету  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
2 липня 2008 року