

ПРОЦЕСИ ЗВАРЮВАННЯ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ З МОДУЛЯЦІЄЮ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ (Огляд)

Частина III. Моделювання процесів TIG зварювання модульованим струмом

У. Бої¹, І.В. Кривцун²

¹Гуандунський інститут зварювання (Китайсько-український інститут зварювання ім. С.О. Патона).
510650, м. Гуанчжоу, Тіаньхе, вул. Чансін, 363. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

²ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Виконано огляд робіт, присвячених процесам зварювання неплавким електродом у інертному газі з модуляцією зварювального струму. Третя частина огляду присвячена аналізу робіт, що стосуються теоретичного дослідження та математичного моделювання процесів тепло-, масо- і електропереносу в дуговій плазмі та зварюваному металі при TIG зварюванні модульованим струмом. Описано різні підходи до теоретичного дослідження зазначених процесів, а також відповідні математичні моделі, з урахуванням умов зварювання неплавким електродом з низькочастотною (до 10 Гц) та високочастотною (вище 10 кГц) імпульсною модуляцією зварювального струму. Наведено результати чисельного аналізу розподілених та інтегральних характеристик аргонної дуги з тугоплавким катодом при імпульсній зміні струму, виконаного на основі моделей нестационарної дуги з розподіленими та зосередженими параметрами. Проаналізовано результати комп'ютерного моделювання теплових, гідродинамічних та електромагнітних процесів у зварюваному металі (в тому числі при самоузгодженому врахуванні процесів, що протікають в дуговій плазмі) для випадку точкового TIG зварювання з низькочастотною імпульсною модуляцією струму. Представлено аналітичні залежності, що описують вплив форми та параметрів імпульсів зварювального струму на характеристики динамічної дії дуги з тугоплавким катодом на метал зварювальної ванни. Бібліогр. 21, табл. 4, рис. 19.

Ключові слова: дуга з тугоплавким катодом, TIG зварювання, дугова плазма, зварюваний метал, проплавлення, модуляція зварювального струму, імпульс, частота, коефіцієнт заповнення, амплітуда, математичне моделювання

Розглянуті у першій [1] та другій [2] частинах даного огляду особливості горіння дуги, проплавлення металу та формування швів при зварюванні неплавким електродом з модуляцією зварювального струму, встановлені експериментально, вимагали проведення теоретичних досліджень, розробки математичних моделей та чисельного моделювання зазначених процесів з метою пояснення і прогнозування характеру їх проходження при практичній реалізації різних технологій TIG зварювання модульованим струмом.

У роботі [3] передбачається, що ефект контракції дуги при ВЧІ модуляції струму, який спостерігається експериментально, і підвищення її тиску на поверхню зварювальної ванни у порівнянні з дугою постійного струму, рівного середньому значенню модульованого, пов'язаний зі збільшенням ефективного значення модульованого струму у порівнянні з його середнім значенням. Це припущення записується у вигляді співвідношення

$$P_{PC} = P_{DC} \frac{I_{eff}^2}{I_{av}^2}, \quad (1)$$

де P_{PC} – тиск дуги модульованого струму; P_{DC} – тиск дуги постійного струму; I_{eff} , I_{av} – ефективне і середнє значення струму.

За даними роботи [3], розрахований таким чином тиск дуги при ВЧІ модуляції струму добре збігається з експериментальними даними.

При модуляції струму дуги прямокутними і трикутними імпульсами квадрат ефективного значення струму може бути наближено обчислений у такий спосіб:

$$I_{eff}^2 \approx I_p I_{av} \quad (2)$$

для прямокутних імпульсів і

$$I_{eff}^2 \approx \frac{2}{3} I_p I_{av} \quad (3)$$

для трикутних, де I_p – пікове значення струму (при запису (2), (3) передбачалося, що базове значення струму I_b набагато менше I_p).

Оскільки в діапазоні частот $f = 10...20$ кГц форма імпульсів близька до трикутної, піковий струм при фіксованій потужності джерела живлення (по постійному струму) може бути оцінений за допомогою співвідношення

$$I_p \sim \sqrt{\frac{I_{av}}{fL}}, \quad (4)$$

де L – індуктивність зварювального контуру.

У цьому випадку, використовуючи (1), (3), (4), відношення тиску дуги з ВЧІ модуляцією струму до тиску дуги постійного струму (що характеризує ступінь стиснення дуги) може бути представлено у вигляді

$$\frac{P_{PC}}{P_{DC}} \sim \sqrt{\frac{1}{I_{av} f L}} \quad (5)$$

Таким чином, ефект стиснення дуги при ВЧ модуляції струму найбільш сильно проявляється у випадку малих значень середнього струму.

Робота [4] присвячена порівняльному аналізу тиску на поверхню зварювальної ванни, що чиниться дугою з неплавким електродом при імпульсній модуляції зварювального струму і дугою постійного струму, значення якого визначається з умови рівності потужностей розглянутих дуг. При оцінці тиску дуги автори використовують припущення про те, що струмовий канал має форму усіченого конуса з висотою, що дорівнює довжині дуги, що розширюється від катода, де радіус каналу вибирається рівним r_0 , до анода, де радіус дорівнює R ($R > r_0$). Передбачається, що щільність струму однорідно розподілена по перетину струмового каналу. Це дозволяє записати тиск дуги постійного струму I_c на поверхню анода у вигляді

$$P_C = \frac{\mu I_c^2}{4\pi^2 R^2} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right), \quad (6)$$

де μ – універсальна магнітна стала.

Потужність дуги постійного струму визначається як добуток струму I_c на напругу $U(I_c)$, що обчислюється за допомогою апроксимації вимірної експериментально статичної вольт-амперної характеристики (ВАХ) дуги:

$$U(I) = B_1 I + B_2 + B_3 / I, \quad (7)$$

де B_1, B_2, B_3 – постійні коефіцієнти, які залежать від умов горіння дуги.

З огляду на (7), потужність дуги постійного струму I_c можна записати наступним чином:

$$W_C = B_1 I_c^2 + B_2 I_c + B_3. \quad (8)$$

У випадку дуги модульованого струму, припускаючи, що модуляція здійснюється прямокутними імпульсами з коефіцієнтом заповнення δ , середнє та ефективне значення струму можна обчислити за допомогою виразів:

$$I_{av} = \delta I_p + (1 - \delta) I_b; \quad I_{eff} = \left[\delta I_p^2 + (1 - \delta) I_b^2 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

де I_p, I_b – пікове та базове значення струму.

Середнє значення потужності такої дуги

$W_P \equiv \frac{1}{T} \int_0^T I(t)U(t)dt$ в роботі [4] визначається за умови, що зміна в часі напруги на дузі при зміні струму відбувається уздовж статичної ВАХ (7), що дає

$$W_P = B_1 I_{eff}^2 + B_2 I_{av} + B_3. \quad (10)$$

Слід зазначити, що останнє припущення істотно обмежує частоту модуляції, зі зростанням якої зміна напруги при зміні струму дуги, що відбувається відповідно до динамічної ВАХ дуги, все більш значно відрізняється від залежності (7) [5].

Прирівнюючи вирази (8) і (10), автори знаходять коефіцієнт заповнення δ , який при заданих значеннях I_c, I_p, I_b забезпечує умову рівності потужностей дуги постійного та модульованого струму:

$$\delta = \frac{B_1 (I_c^2 - I_b^2) + B_2 (I_c - I_b)}{B_1 (I_p^2 - I_b^2) + B_2 (I_p - I_b)}. \quad (11)$$

Припускаючи далі, що розміри струмового каналу дуги з імпульсною модуляцією струму дорівнюють відповідним розмірам для дуги постійного струму та використовуючи вираз (6), автори [4] записують

$$P_P = \frac{\mu I_{eff}^2}{4\pi^2 R^2} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right), \quad (12)$$

що дозволяє їм зробити висновок, подібний зробленому в роботі [3] (див. (1)), а саме:

$$P_R \equiv P_P / P_C = I_{eff}^2 / I_c^2. \quad (13)$$

Використовуючи отримані співвідношення, в роботі [4] наводяться розрахункові залежності $P_R, W_P, I_{eff}/I_{av}$, а також I_c, I_{av}, I_{eff} від коефіцієнта заповнення при наступних параметрах режиму горіння дуги: довжина дуги 1 мм, захисний газ Ar, $I_p = 500$ А, $I_b = 5$ А. Як приклад, на рис. 1 представлена залежність $P_R(\delta)$, яка показує, що тиск на поверх-

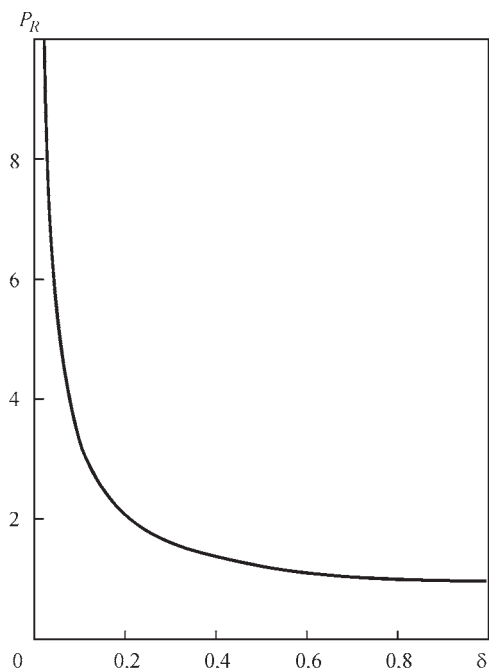


Рис. 1. Залежність відношення тиску на поверхню анода дуги модульованого струму до тиску дуги постійного струму від коефіцієнта заповнення при їх однаковій потужності ($I_b = 5$ А, $I_p = 500$ А, довжина дуги – 1 мм) [4]

ню анода дуги з імпульсною модуляцією струму при малих значеннях коефіцієнта заповнення може в десять і більше разів перевищувати відповідну величину для дуги постійного струму ($\delta = 1$).

У роботі [6] проведено комп'ютерне моделювання теплових, гідродинамічних і електромагнітних процесів у зварюваному металі при точковому аргонодуговому зварюванні (зварювання нерухою дугою) зразка з нержавіючої сталі AISI 304 завтовшки 3 мм дугою, що горить на постійному струмі та з низькочастотною модуляцією зварювального струму прямокутними імпульсами. При побудові математичної моделі використовувалися такі припущення: 1) розглянута система передбачається осесиметричною; 2) розплавлений метал є в'язкою рідиною, що не стискається, його течія у зварювальній ванні – ламінарна; 3) при аналізі гідродинамічних процесів у ванні розплаву враховуються сила Лоренца та сила Архімеда, що діють в об'ємі ванни, а також сила Марангоні, тиск і сила тертя дугової плазми на її поверхні; 4) властивості зварюваного металу передбачаються незалежними від температури, за винятком коефіцієнта поверхневого натягу, щільності, питомої теплоємності та коефіцієнта теплопровідності; 5) розподіл теплового потоку, щільності електричного струму, тиску та сили тертя дугової плазми на поверхні зварюваного металу визначалися на основі результатів моделювання дуги постійного струму [7, 8] при різних значеннях струму (квазістаціонарна дуга).

При проведенні чисельного моделювання використовувалися параметри режимів горіння дуги модульованого струму (табл. 1) та постійного струму – наведені нижче.

Параметри режиму горіння дуги постійного струму [6]

Довжина дуги, мм	2,0
Струм дуги, А	100
Напруга на дузі, В	14,0
Електрод	W+2 %Th
Діаметр електрода, мм	3,2
Кут заточки електрода, град	60
Діаметр сопла, мм	12,7
Витрата захисного газу (Ar), л/хв.	10,0

Таблиця 1. Параметри режимів горіння дуги з модуляцією струму [6]

Параметр	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Базове значення струму I_b , А	36	40	48
Тривалість паузи t_b , с	0,16	0,24	0,32
Пікове значення струму I_p , А	120	136	160
Тривалість імпульсу t_p , с	0,32	0,24	0,16
Ефективний струм I_E , А	100	100	100
Середній струм I_M , А	92	88	85
Коефіцієнт заповнення r_f	0,67	0,50	0,33
Частота F_p , Гц	2,08	2,08	2,08
Відношення t_p/t_b	2,0	1,0	0,5
Відношення I_M/I_E	0,92	0,88	0,85

На рис. 2 показані картини течії і поля швидкостей (см/с) рідкого металу зварювальної ванни при дії нерухомого джерела тепла (дуги постійного і модульованого струму) протягом 1,92 с.

Результати проведеного в роботі [6] комп'ютерного моделювання дозволили авторам зробити висновок про те, що збільшення відношення t_p/t_b або коефіцієнта заповнення призводить до підвищення глибини проплавлення при інших рівних умовах.

Робота [9] також присвячена моделюванню процесів, що протікають у зварюваному металі при ПІГ зварюванні з низькочастотною модуляцією струму дуги. Розглядалися теплові, гідродинамічні та електромагнітні процеси у зразку з нержавіючої сталі 304 завтовшки 3 мм при наступних параметрах режиму зварювання: напруга на дузі $U = 13$ В, струм зварювання модулюється прямокутними імпульсами, тривалості імпульсу t_p і паузи t_b задавалися $t_p = t_b = 1$ с, струм в імпульсі $I_p = 170$ А, базовий струм $I_b = 35$ А, швидкість зварювання $v = 1,6$ мм/с. При побудові математичної моделі використовувалися наступні припущення: 1) метал зварювальної ванни передбачається в'язкою рідиною, що не стискається, режим течії – ламінарний; 2) розподіли теплового потоку, щільності струму і тиску дуги на поверхні зразка – гаусові; 3) властивості зварюваного металу не залежать від температури, за винятком коефіцієнта поверхневого натягу розплаву (для врахування ефекту Марангоні); 4) поверхню зварювальної ванни вважається плоскою.

На рис. 3 показані розрахункові залежності глибини проплавлення та півширини шва від часу зварювання. Як випливає з представлених кривих, найбільш помітні зміни глибини та ширини шва

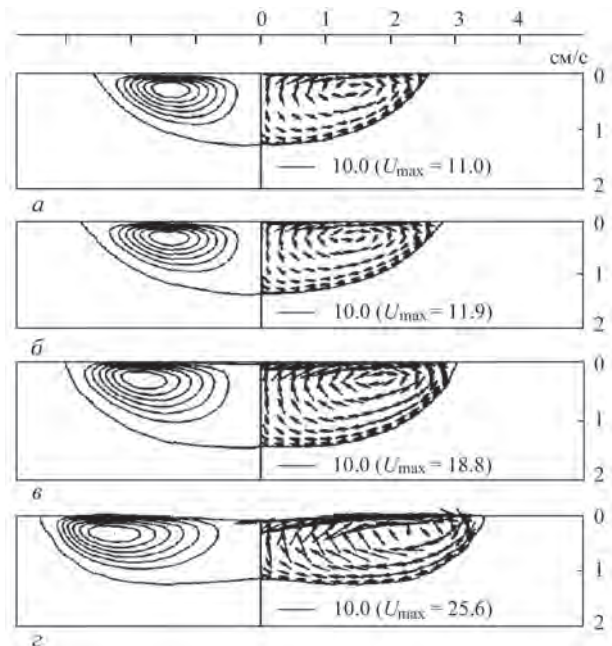


Рис. 2. Картини течії (зліва) і поля швидкостей руху (праворуч) розплаву при дії на зварюваний метал протягом 1,92 с: а – дуги постійного струму (100 А); б–г – дуги модульованого струму (варіанти 1–3 в табл. 1, відповідно) [6]

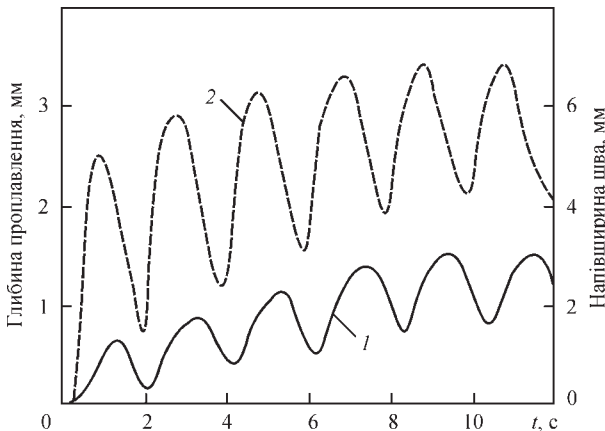


Рис. 3. Залежності глибини проплавлення (1) та напівширини шва (2) від часу [9]

зі зміною струму дуги спостерігаються на самому початку процесу зварювання ($t < 4$ с). Після чотирьох періодів зміни зварювального струму амплітуда коливань розглянутих характеристик дещо зменшується, при цьому їх максимальні та мінімальні значення стають практично незалежними від часу.

З метою верифікації розробленої моделі автори [9] провели порівняння розрахункових даних з експериментальними, отриманими шляхом відеозйомки поверхні зварювальної ванни. Оскільки під час дії імпульсу струму I_p провести таку відеозйомку було неможливо, на рис. 4 наведено дані щодо зміни ширини шва тільки під час горіння дуги на мінімальному струмі I_b . Порівняння розрахункових і експериментальних даних показало цілком задовільну їх відповідність.

Книга [10] присвячена детальному опису існуючих підходів і математичних моделей, що використовуються для моделювання теплових і гідродинамічних процесів у зварюваному металі при різних способах дугового (MIG/MAG, TIG) і плазмового зварювання. Рівняння відповідних математичних моделей записані у нестационарному вигляді, що дозволяє використовувати їх для моделювання процесів

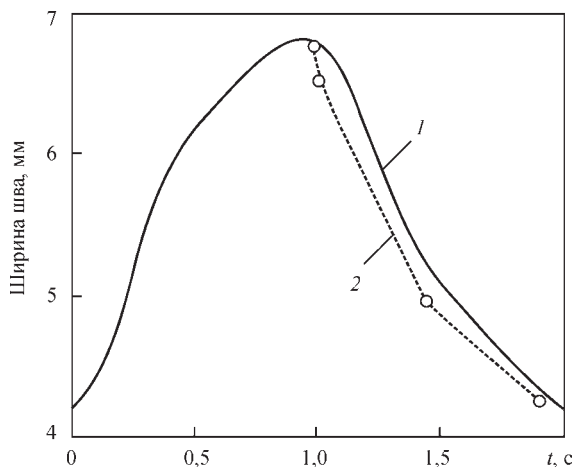


Рис. 4. Порівняння розрахункової (1) та експериментальної (2) залежності ширини шва від часу протягом одного періоду модуляції зварювального струму [9]

дугового зварювання як постійним струмом, так і з імпульсною модуляцією струму дуги.

У роботах [11, 12] проведено детальне чисельне дослідження процесів точкового TIG зварювання (зварювання нерухомим джерелом тепла) нержавіючої сталі AISI 304 при низькочастотній модуляції зварювального струму прямокутними імпульсами у формі меандру. У роботі [11] запропонована 2D модель теплових, гідродинамічних і електромагнітних процесів у зварюваному металі при його частковому (товщина зразка 10 мм) і повному (товщина зразка 4 мм) проплавленні. При побудові моделі авторами використовувалися такі припущення: 1) розглянута система має осьову симетрію; 2) розплавлений метал є в'язкою рідиною, що не стискається, режим течії – ламінарний; 3) течія металу у зварювальній ванні формується за рахунок дії сил Архімеда, Лоренца і Марангоні (сила тертя потоку плазми з поверхнею розплаву не враховується), а також тиску дугової плазми на поверхню ванни; 4) у рівнянні енергії враховується прихована теплота плавлення-кристалізації; 5) визначення характеристик електромагнітного поля у зварюваному металі здійснюється з урахуванням вихорових струмів. Необхідні для визначення граничних умов на поверхні зварюваного металу розподіли щільності електричного струму, теплового потоку і тиску дуги на зазначену поверхню задавалися на основі відповідних розподілів для дуг постійного струму в діапазоні 80...200 А, однак, автори [11] не вказали джерело, з якого взято ці дані. При проведенні розрахунків використовувалися параметри імпульсної модуляції зварювального струму, представлені нижче. Розглядалася поведінка зварювальної ванни протягом 3,5 с від початку процесу зварювання (7; 14 і 21 період модуляції на частоті 2; 4 і 6 Гц, відповідно).

Параметри модуляції струму дуги [11]

Максимальне пікове значення струму I_p , А 200
Мінімальне базове значення струму I_b , А 80
Тривалість імпульсу t_p , с 0,25; 0,125; 0,083
Тривалість паузи t_b , с 0,25; 0,125; 0,083
Частота f , Гц 2; 4; 6

На рис. 5 представлено розрахункові залежності ширини (діаметра зварної точки) і глибини проплавлення від часу зварювання зразка завтовшки 10 мм при імпульсній модуляції струму дуги у діапазоні 80...200 А (середнє значення струму 140 А), що здійснюється з частотою 2 Гц, у порівнянні з відповідними залежностями при точковому зварюванні постійним струмом 170 А.

Наведені на цьому рисунку розрахункові дані показують, що зміна в часі максимального діаметра зварювальної ванни при імпульсній модуляції струму дуги відповідає поведінці діаметра ванни при зварюванні на постійному струмі 170 А. Водночас енергія, вкладена в зразок за 3,5 с в першому випадку становить 4565 Дж, тоді як у другому

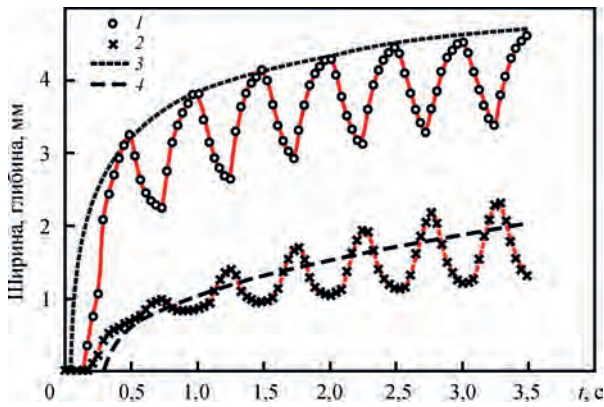


Рис. 5. Залежності від часу ширини (1) і глибини (2) проплавлення при ТІГ зварюванні модульованим струмом у порівнянні з шириною (3) та глибиною (4) проплавлення при зварюванні на постійному струмі [11]

випадку ця енергія виявляється значно більшою та складає величину 5867 Дж, що є важливою перевагою ТІГ зварювання з імпульсною модуляцією струму, тому що дозволяє знизити залишкові напруження та деформації.

Ще однією важливою особливістю ТІГ зварювання модульованим струмом є значна зміна форми поверхні зварювальної ванни у часі. Характерні форми поверхні ванни під час імпульсу та паузи струму для розглянутого вище режиму модуляції представлено на рис. 6.

На рис. 7 наведено розрахункові дані про залежність від часу розмірів зварювальної ванни при повному проплавленні зразка завтовшки 4 мм у випадку точкового зварювання з імпульсною модуляцією струму дуги в діапазоні 80...200 А на частоті 2 Гц.

Для верифікації запропонованої моделі визначені розрахунковим шляхом геометричні розміри та форма проплавлення зразка завтовшки 10 мм при дії на нього дуги модульованого струму протягом 3,5 с, порівнювалися з відповідними розмірами та формою макрошліфів зварних точок, визначеними експериментально. Результати такого порівняння наведені на рис. 8 для різних значень амплітуди модуляції струму (середнє значення струму 140 А) на частоті 2 Гц і свідчать про до-

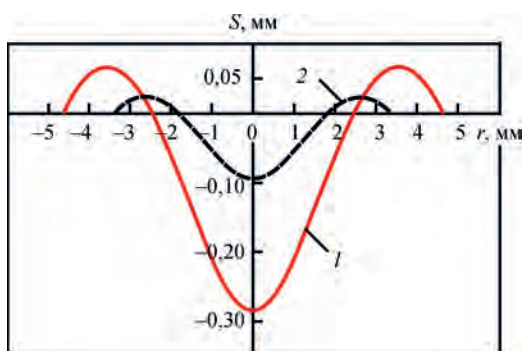


Рис. 6. Форми поверхні зварювальної ванни при піковому (1 – 200 А) і базовому (2 – 80 А) значеннях струму дуги після шести періодів модуляції з частотою 2 Гц [11]

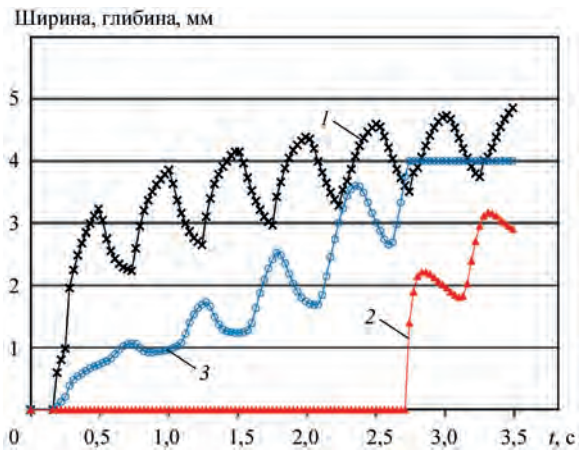


Рис. 7. Залежності від часу ширини зварювальної ванни з лицьової (1) і зворотної (2) сторони зразка, а також глибини проплавлення (3) при точковому ТІГ зварюванні модульованим струмом з повним проплавленням [11]

статно адекватність математичної моделі, запропонованої авторами [11].

У роботі [12] розглянута модель була узагальнена для самоузгодженого врахування процесів, що протікають в електроді (катоді), стовпі дуги та зварюваному металі при точковому ТІГ зварюванні з низькочастотною модуляцією струму. За допомогою такої узагальненої моделі було проведено детальне комп'ютерне моделювання перерахованих вище процесів при зварюванні зразків з тієї ж сталі (AISI 304) завтовшки 8 і 4 мм аргоною дугою довжиною 3 мм з вольфрамовим катодом діаметром 3,2 мм (кут заточування 60°) при наступних параметрах модуляції струму: прямокутні імпульси у формі меандру, частота слідування 1 Гц, струм в імпульсі $I_p = 160$ А, струм у паузі $I_b = 80$ А.

На рис. 9, а представлено результати порівняння динаміки зміни в часі напівширини зварювальної ванни, розрахованої на основі моделі [12] і визначеної експериментально шляхом відеозйомки поверхні ванни, при точковому ТІГ зварюванні зразка завтовшки 8 мм аргоною дугою модульованого струму з параметрами, зазначеними вище. На рис. 9, б показана розрахункова форма та розміри зони проплавлення металу, що зварюється, а також відповідний макрошліф зварної точки, досягнуті за 15 с дії дуги на зварюваний зразок. Як впливає з порівняння результатів моделювання та експериментальних даних, запропонована авторами [12] математична модель дозволяє з високою точністю передбачати як динаміку зміни геометричних характеристик зварювальної ванни, так і результуючу форму зони проплавлення, що досягається за певний час.

Робота [13] китайських учених присвячена вивченню електромагнітної сили, що діє на дугову плазму, при ТІГ зварюванні з високочастотною ($f = 20...80$ кГц) імпульсною модуляцією зварюваль-

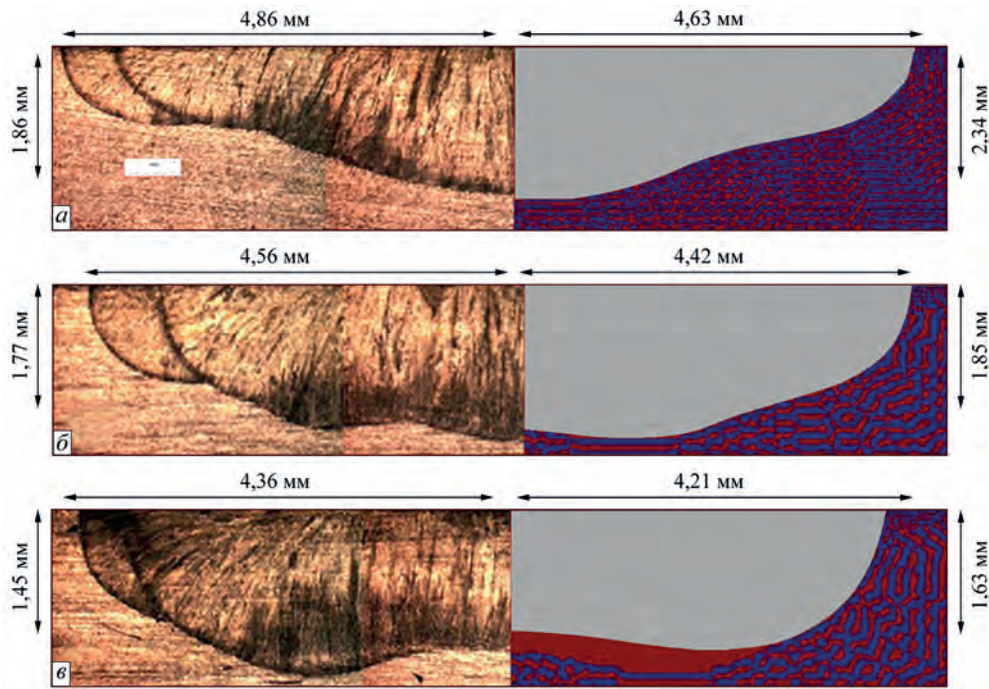


Рис. 8. Макрошліфи зварних точок (зліва) і розрахункові форми проплавлення металу (праворуч) при точковому TIG зварюванні зразків зі сталі AISI 304 з низькочастотною модуляцією струму в діапазоні: а – 80...200; б – 100...180; в – 120...160 А [11]

ного струму. Автори припускають, що щільність струму в стовпі дуги має, як показано на рис. 10, аксіальну і радіальну компоненти і розподілена по гаусовому закону:

$$\begin{cases} J_z = \frac{Id}{\pi R_r^2} \exp\left(-\frac{r^2 d}{R_r^2}\right); \\ J_r = J_z \operatorname{tg} \varphi, \end{cases} \quad (14)$$

де I – струм дуги; $d = 3$ – коефіцієнт зосередженості; R_r – радіус електропровідної ділянки стовпа

дуги, яка вважається кінчною; φ – кут нахилу лінії струму до осі дуги (див. рис. 10). Це дозволяє записати вирази для компонент електромагнітної сили, що діє на плазму, у вигляді:

$$\begin{cases} F_r = C_1 t \exp(-t) [1 - \exp(-t)]; \\ F_z = 0, (r \leq r_0); C_2 t \exp(-t) [1 - \exp(-t)], (r \geq r_0). \end{cases} \quad (15)$$

Тут $t = r^2 d / R_r^2$; $C_1 = -\mu I^2 / (2\pi^2 r^3)$;

$C_2 = \mu I^2 (r - r_0) / [2\pi^2 r^2 (h - z)]$, де μ – магнітна проникність; h – довжина дуги; координата z відраховується від поверхні виробу. Слід зазначити, що вираз для F_z (формули (4) і (6)) у роботі [13] записано неправильно.

Крім розподілених характеристик електромагнітної сили у стовпі дуги у даній роботі досліджується така інтегральна характеристика силового впливу, як тиск дуги на поверхню анода, яке записується у вигляді (див. також [4]):

$$P_{ez} = \frac{\mu I^2}{4\pi^2 R^2} \ln \frac{R}{r_0}. \quad (16)$$

При аналізі цієї залежності передбачається, що величина r_0 постійна і дорівнює половині діаметра електрода. Радіус кореня дуги R визначається експериментально шляхом фотореєстрації поперечного розміру анодної зони дуги при TIG зварюванні титанового сплаву Ti-6Al-4V завтовшки 2,5 мм з різними частотами модуляції зварювального струму. В експериментах використовували аргонovu дугу довжиною 3 мм з тугоплавким (W+2%Ce) катодом діаметром 2,4 мм, параметри режимів зварювання наведені в табл. 2.

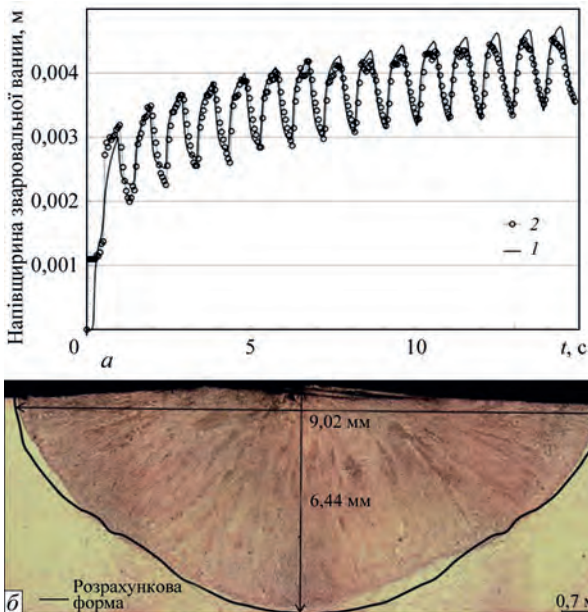


Рис. 9. Порівняння розрахункових (1) та експериментальних (2) даних за динамікою зміни напівширини зварювальної ванни (а) і результуючою формою зони проплавлення (б) при точковому TIG зварюванні модульованим струмом [12]

На рис. 11 показана залежність радіуса кореня дуги від частоти модуляції струму, яка свідчить про збільшення ступеня контракції дуги на аноді (зменшення R) зі зростанням частоти. Для апроксимації отриманих експериментальних даних була запропонована наступна поліноміальна залежність: $R(f) = -0,0014f^3 + 0,0307f^2 - 0,2755f + 6,2086$.

Переписуючи формулу (16) у вигляді $P_{ez} = \frac{\mu I^2}{4\pi^2 r_0^2 n^2} \ln n$, де $n = \frac{R}{r_0}$, і досліджуючи цей вираз, автори [13] знаходять, що при $n < 1,6$ (точніше, при $n < \exp(1/2)$) величина P_{ez} є зростаючою функцією n , а при $n > 1,6$ – спадаючою. Це означає, що тиск дуги на поверхню анода зростає зі збільшенням R при $R < R_c$ і спадає при $R > R_c$, де, для заданого значення $r_0 = 1,2$ мм критична величина радіуса кореня дуги R_c складає 1,92 мм.

Оскільки, згідно з експериментальними даними, наведеними на рис. 11, величина R виявляється більшою за R_c для всіх значень частоти модуляції та зменшується зі зростанням f , то робиться висновок про те, що зі зростанням частоти модуляції струму тиск дуги на поверхню зварювальної ванни зростає, що призводить до заглиблення джерела тепла в зва-

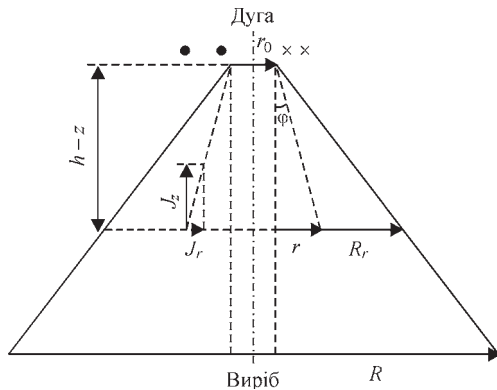


Рис. 10. Схема розподілу щільності струму у стовпі дуги [13]

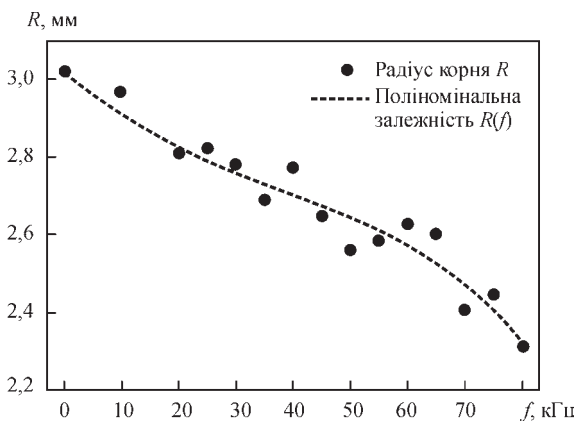


Рис. 11. Радіус кореня дуги в залежності від частоти модуляції струму [13]

руваний метал, а, отже, до збільшення проплавляючої здатності дуги.

В роботі [14] на основі самоузгодженої математичної моделі нестационарних процесів енерго-, масо- та електропереносу у стовпі та анодній області електричної дуги з тугоплавким катодом [15] проведено детальний чисельний аналіз характеристик аргонної дуги з мідним водоохолоджуванним анодом при імпульсній зміні електричного струму (рис. 12).

Встановлено, що горіння дуги при різкому збільшенні (зменшенні) струму супроводжується суттєвою перебудовою електромагнітних, теплових і газодинамічних характеристик дугової плазми, а також характеристик її дії на поверхню анода. При цьому динамічна поведінка зазначених характеристик залежить не тільки від швидкості зміни струму дуги, а й від того збільшується він чи зменшується. При високій швидкості зміни струму ($\left| \frac{dI}{dt} \right| > 5 \cdot 10^6$ А/с) змі-

на характеристик стовпа та анодній області дуги відбувається у дві стадії: стадія зміни разом зі струмом дуги та стадія перехідних процесів. Як впливає з розрахункових даних, наведених на рис. 13, 14, при збільшенні (зменшенні) струму дуги щільність електричного струму та теплового потоку на аноді можуть ставати в 2 рази більше (в 1,5 рази менше) відповідних значень для дуги постійного струму, рівного більшому (меншому) значенням.

На стадії перехідних процесів відбувається релаксація теплового і газодинамічного стану дугової плазми до значень, характерних для стаціонарної дуги при відповідному значенні струму. Тривалості процесів релаксації залежать від значень максимального та мінімального струму і можуть істотно відрізнятися для локальних й інтегральних характеристик плазми стовпа та анодній області дуги.

При зміні струму зі швидкістю меншою, ніж 10^6 А/с ($b > 100$ мкс), процеси, пов'язані зі збільшенням (зменшенням) струму та процеси релаксації відбуваються одночасно, внаслідок чого нестационарний процес горіння дуги реалізується у вигляді послідовної зміни станів, характерних для стаціонарної дуги при відповідних зна-

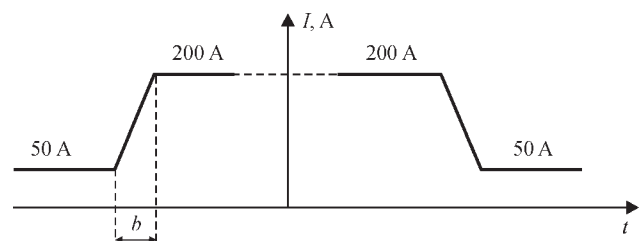


Рис. 12. Діаграма імпульсної зміни струму дуги [14]

Таблиця 2. Параметри досліджених режимів зварювання [13]

Номер експерименту	Базовий струм I_b , А	Струм в імпульсі I_p , А	Частота f , кГц	Коефіцієнт заповнення δ , %
1	75	-	-	-
2...14	40	100	20...80	50

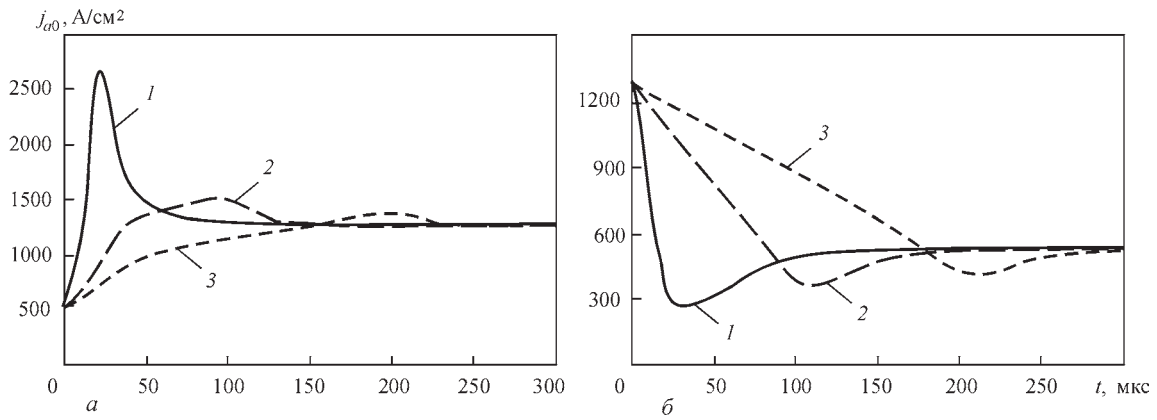


Рис. 13. Зміна осевого значення щільності електричного струму на аноді при імпульсному підвищенні (а) і зниженні (б) струму дуги (1 – $b = 20$; 2 – 100; 3 – 200 мкс) [14]

ченнях струму (див., наприклад, рис. 14), тобто зміна характеристик дуги відбувається в квазістаціонарному режимі.

Робота [16] присвячена дослідженню впливу високочастотної імпульсної модуляції струму дуги на прогин поверхні зварювальної ванни при TIG зварюванні зразків з титанового сплаву Ti-6Al-4V завтовшки 2,5 мм. Дане дослідження включає експериментальне вимірювання сили, з якою дуга діє на поверхню зразка, що зварюється, і геометричних характеристик його проплавлення (ширини шва B і глибини проплавлення H), а також математичне моделювання процесів, що протікають в зварюваному металі з урахуванням прогину вільної поверхні зварювальної ванни.

Для проведення експериментів був створений спеціальний стенд, що дозволяє вимірювати силу, яка діє на зразок, при TIG зварюванні. В експериментах використовувалася аргонна дуга довжиною 3 мм з тугоплавким (W+2 %Ce) катодом радіусом 1,2 мм, параметри режимів зварювання наведені в табл. 3, швидкість зварювання у всіх експериментах була постійною – 150 мм/хв.

Для математичного моделювання теплових, гідродинамічних і електромагнітних процесів у зварюваному металі, використовувалася 2D модель, побудована за наступних припущень: 1) розплавлений метал є в'язкою рідиною, що не

стискається, його течія у зварювальній ванні – ламінарна; 2) при аналізі гідродинамічних процесів у зварювальній ванні враховуються об'ємні сили (Лоренца та Архімеда), а також поверхневі сили (Марангоні та тиск дуги); 3) властивості зварюваного матеріалу вважаються незалежними від температури за винятком питомої теплоємності і коефіцієнта теплопровідності, а також коефіцієнта поверхневого натягу, в'язкості та щільності розплаву (наближення Буссінеска).

При оцінці ступеня викривлення вільної поверхні зварювальної ванни використовувалася її апроксимація частиною сферичної поверхні, як показано на рис. 15.

Записуючи баланс сил на даній поверхні, автори [16] отримують такий вираз:

$$\Phi(h) = F - \frac{\pi}{6} \rho g h^3 - \frac{3\pi}{2} \rho g r^2 h - 8\sigma r \arctg \frac{h}{r}, \quad (17)$$

Таблиця 3. Параметри режимів зварювання [16]

Номер експерименту	Базовий струм I_b , А	Струм в імпульсі I_p , А	Частота f , кГц	Коефіцієнт заповнення δ , %
1	80	–	–	–
2	40	100	20	50
3	40	100	40	50
4	40	100	60	50
5	40	100	80	50

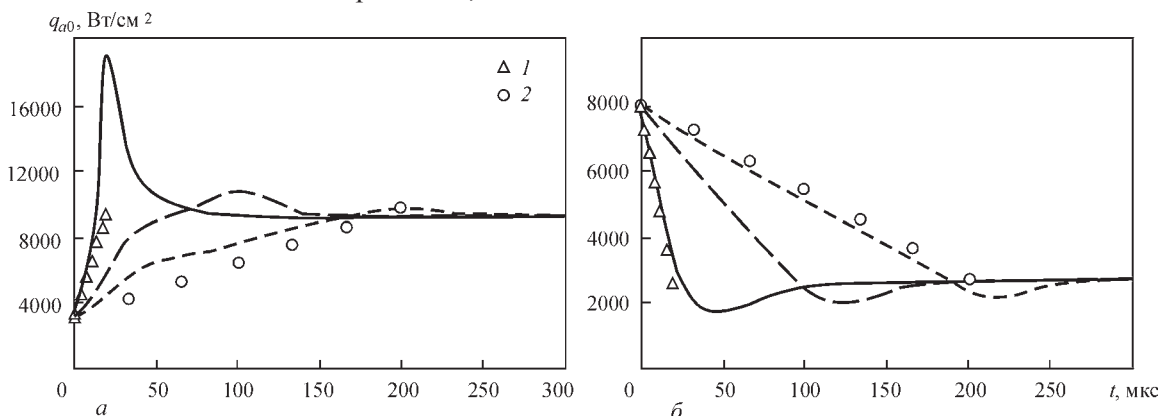


Рис. 14. Зміна осевого значення щільності теплового потоку в анод при імпульсному підвищенні (а) і зниженні (б) струму дуги (маркерами показані значення q_{a0} для стаціонарної дуги при відповідних значеннях струму: 1 – $b = 20$; 2 – 200 мкс) [14]

де F – сила дії дуги на поверхню металу, що зварюється; ρ , σ – щільність і коефіцієнт поверхневого натягу розплаву; g – прискорення вільного падіння; r , h – радіус зварювальної ванни і прогин її вільної поверхні (див. рис. 15). Корінь рівняння $\Phi(h) = 0$ відповідає величині h , при якій виконується баланс сил (17).

Радіус зварювальної ванни r , що входить у вираз (17), визначався як половина експериментально виміряного значення ширини шва B і далі будувалися залежності $\Phi(h)$ для різних значень частоти модуляції, які представлені на рис. 16. На цьому ж малюнку вказані відповідні значення коренів рівняння $\Phi(h) = 0$.

Зведення експериментальних і розрахункових значень величин, що визначають прогин поверхні зварювальної ванни, наведено в табл. 4.

Завершуючи розгляд роботи [16], слід зазначити, що сила F , яка вимірюється експериментально, містить дві складові – безпосередньо силу дії дугової плазми на зварюваний метал і силу, що діє на зварюваний зразок, за рахунок розтікання струму в його об'ємі (аналогічна сила, що діє на плазму стовпа дуги, була визначена в [4]). Розрахунки показують, що, наприклад, при постійному струмі дуги, рівному 178 А, сила, що діє на зразок з нержавіючої сталі завтовшки 5 мм, становить 4,4 мН. Таким чином, використані в роботі [16] значення сили дії дуги на поверхню зварю-

вальної ванни, а отже, і прогину цієї поверхні є сильно завищеними.

У роботі [17] зроблено спробу проаналізувати силу дії на поверхню металу, що зварюється, потоку дугової плазми при ТІГ зварюванні з ВЧІ модуляцією струму дуги. Без будь-якого обґрунтування автори припускають, що розподіл тиску потоку плазми в області анодної прив'язки дуги має вигляд

$$P_r = P_{peak} \exp(-a|r|), \quad (18)$$

де P_{peak} – газодинамічний тиск на осі дуги; a – коефіцієнт розподілу; r – радіальна координата. Потім математично некоректно обчислюється величина відповідної сили, що діє на поверхню зварювальної ванни та порівнюється з експериментально вимірним (за методикою, описаною в роботі [16]) значенням цієї сили, яке, як зазначено вище, є сильно завищеним. Тому висновки, зроблені в роботі [17], не представляються обґрунтованими.

Робота [5] присвячена використанню моделі нестационарної дуги з зосередженими параметрами для аналізу динаміки зміни її характеристик в умовах ТІГ зварювання при імпульсній зміні струму. При побудові такої моделі рівняння Кірхгофа, що описують електричне коло, були доповнені рівняннями динамічної моделі дуги як елемента електричного кола [18]. Як параметри моделі з зосередженими параметрами використовується статична ВАХ стовпа дуги і постійна часу перехідного процесу, яка підлягає визначенню. Для ідентифікації цих параметрів були проведені експериментальні дослідження статичних ВАХ аргонової дуги з вольфрамівим катодом і мідним водоохолоджуванним анодом. Постійна часу θ перехідного процесу визначалася виходячи з розрахункових даних про динаміку зміни напруги на дузі, отриманих за допомогою моделі з розподіленими параметрами [15].

Розглядався вплив на дугу трапецієподібних імпульсів струму з різними тривалостями фронтів (20; 100; 200 мкс). Розрахунки проводилися для аргонової дуги довжиною 3 мм з тугоплавким катодом. Передбачалося, що після підйому (спаду) струму дуга горить при постійному струмі до встановлення стаціонарного стану. Результати розрахунку динамічної ВАХ такої дуги для моделей з розподіленими та зосередженими па-

Таблиця 4. Значення параметрів, що визначають прогин поверхні зварювальної ванни [16]

Частота f , кГц	Сила дії дуги F , мН	Ширина шва B , мм	Глибина проплавлення H , мм	Прогин поверхні h , мм
0	1,79	4,16	2,29	0,11
20	4,19	3,10	1,75	0,29
40	7,00	2,77	1,85	0,53
60	8,84	3,21	2,15	0,67
80	16,06	2,59	2,06	1,63

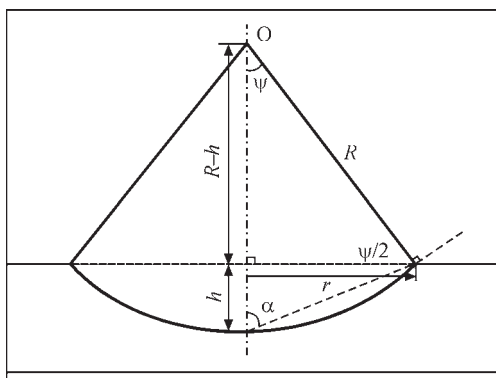


Рис. 15. Апроксимація вільної поверхні зварювальної ванни [16]

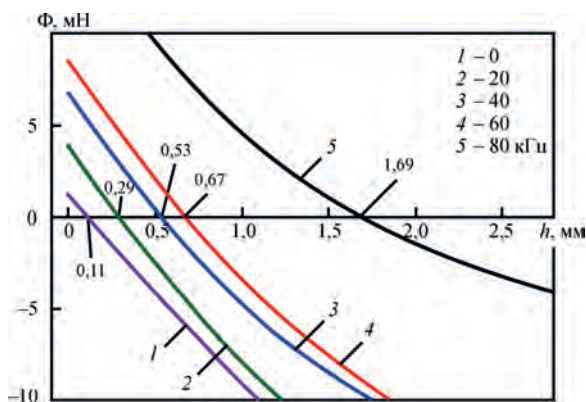


Рис. 16. Залежності $\Phi(h)$ за різних значень частоти модуляції струму дуги [16]

раметрами представлені на рис. 17. На цьому ж малюнку наведені відповідні значення θ , обрані за критерієм найкращої відповідності результатів розрахунку з використанням зазначених моделей.

Як впливає з наведених на цьому малюнку розрахункових даних, постійна часу зменшується зі зменшенням тривалості фронту імпульсу. Характерною особливістю динамічної ВАХ дуги є те, що вона представляється у вигляді петлі гістерезису, у якій верхня та нижня криві відповідають переднім і заднім фронтам імпульсу, а вертикальні відрізки – переходу в стаціонарний стан дуги. ВАХ дуги у вигляді петлі гістерезису була отримана експериментально у роботах [19, 20]. Причиною її виникнення є різна ступінь інерційності процесів перенесення енергії, імпульсу та заряду при підйомі та спаді струму. Відзначимо, що зі збільшенням тривалості фронту імпульсу розмах петлі гістерезиса зменшується і динамічна ВАХ дуги наближається до ВАХ стаціонарної дуги (див. рис. 17, в).

У роботі [21] проведено аналіз впливу параметрів імпульсної модуляції зварювального струму на характеристики динамічної дії дуги з тугоплавким катодом на метал зварювальної ванни. Показано, що чим більший квадрат діючого (ефектив-

ного) значення струму I_E дуги, тим більша сила, що діє на розплавлений метал. Таким чином, для забезпечення максимуму зазначеної дії (при фіксованому середньому значенні струму I_A) форму та часові параметри імпульсів модуляції слід вибирати за критерієм максимуму I_E .

Для будь-якого струму $I(t)$, що періодично змінюється у часі, має місце таке представлення:

$$I(t) = I_A + A\eta(t), \quad (19)$$

де $A = I_2 - I_1$ – амплітуда модуляції струму; I_1, I_2 – мінімальне та максимальне значення струму; $\eta(t)$ – деяка нормована функція, яка містить інформацію щодо форми та часових параметрів імпульсів. Розглядаючи досить загальний випадок модуляції зварювального струму імпульсами трапецієподібної форми, зображеними на рис. 18, автори показали, що

$$I_E^2 = I_A^2 + A^2 f(\xi, \gamma). \quad (20)$$

$$\text{Тут } f(\xi, \gamma) = \xi \left[\frac{2}{3}(1+2\gamma) - \xi(1+\gamma)^2 \right],$$

де безрозмірні параметри $\xi = \frac{\tau_3}{2\tau}$ ($0 < \xi \leq \frac{1}{2}$) і $\gamma = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3}$ ($0 \leq \gamma \leq 1$) характеризують, відповідно, відносну тривалість імпульсу (дорівнює половині коефіцієнта заповнення) і його форму (при $\gamma = 0$ трапецієподібний імпульс стає трикутним, а при $\gamma = 1$ – прямокутним), а середнє значення струму може бути записано у вигляді $I_A = (1 - \alpha)I_1 + \alpha I_2$, де $\alpha = \frac{\tau_3 + \tau_2 - \tau_1}{2\tau}$ ($0 \leq \alpha \leq 1$).

На рис. 19 показано поведінку функції $f(\xi, \gamma)$, з явного виду якої випливає, що діюче значення модульованого струму залежить від коефіцієнта заповнення і форми імпульсів і не залежить від частоти їх проходження. Відзначимо також, що, $f(\xi, \gamma) \geq 0$, тобто квадрат ефективного значення струму завжди перевищує квадрат його середнього значення.

Як впливає з (20), для забезпечення максимального значення I_E при фіксованих значеннях I_A та A , параметри слід вибирати таким чином, щоб функція $f(\xi, \gamma)$ приймала найбільше значення. Для трапецієподібних імпульсів (див. рис. 18) параметр α дорівнює $\xi(1 + \gamma)$, тому при аналізі функції $f(\xi, \gamma)$ слід розглядати не увесь діапазон зміни параметрів ξ, γ , а лише ті їх значення, які задовольняють рівняння $\alpha = \xi(1 + \gamma)$. Виражаючи з цього рівняння γ через ξ, α , отримаємо $f(\xi, \alpha) = \frac{4}{3}\alpha - \alpha^2 - \frac{2}{3}\xi$. Ця функція монотонно зменшується зі збільшенням ξ і має найбільше значення при мінімальному значенні ξ_{min} . У випадку трикутних імпульсів ($\gamma = 0$) знаходимо $\xi = \alpha$, а в разі прямокутних імпульсів ($\gamma = 1$) маємо $\xi = \frac{\alpha}{2}$. Таким чином, мінімальне значення $\xi_{min} = \frac{\alpha}{2}$, що

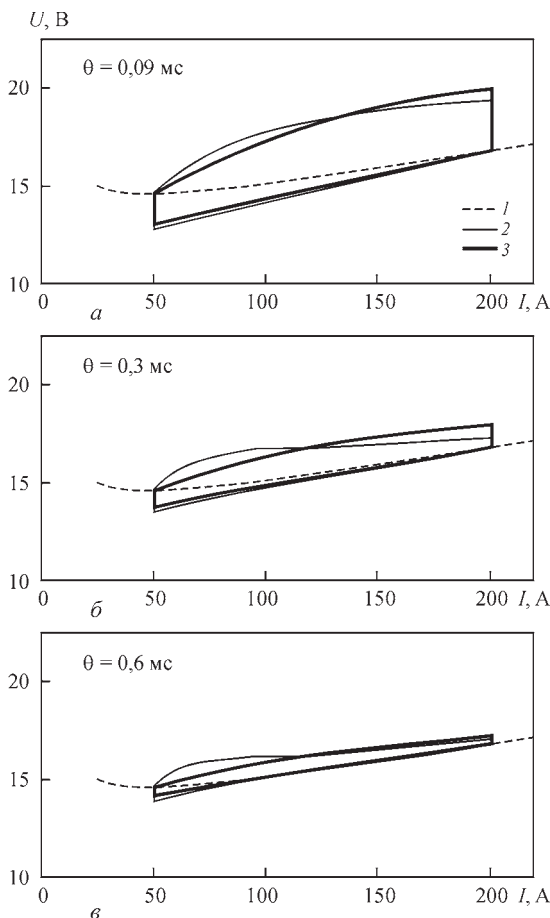


Рис. 17. Динамічні ВАХ дуги при тривалості фронтів імпульсу: 20 мкс (а); 100 мкс (б); 200 мкс (в); 1 – статична ВАХ дуги; 2 – динамічна ВАХ (модель з розподіленими параметрами); 3 – динамічна ВАХ (модель із зосередженими параметрами) [5]

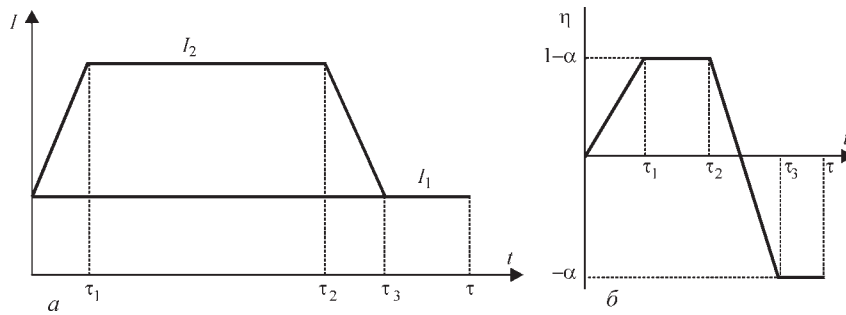


Рис. 18. Схематичне представлення імпульсу струму дуги: а – трапецієподібний імпульс з паузою; б – відповідний нормований імпульс (функція) $\eta(t)$ [21]

забезпечує при заданому α найбільше значення функції $f(\xi_{min}, \alpha) = \alpha - \alpha^2$, досягається у випадку $\gamma = 0$. Функція $\alpha - \alpha^2$ має максимум при $\alpha = 0,5$, що дає $\xi = 0,25$, тобто даний набір безрозмірних параметрів відповідає прямокутним імпульсам у вигляді меандру.

Оскільки на практиці досягти прямокутної форми імпульсів струму неможливо, у роботі [21] досліджено поведінку функції $f(\xi, \gamma)$ для випадку трапецієподібного імпульсу струму. Позначивши через $\tau_f = \tau_1 + \tau_3 - \tau_2$ сумарну тривалість переднього та заднього фронтів імпульсу (див. рис. 18, а), можна показати, що мінімальне значення ξ визначається наступним чином:

$$\xi_{min} = \frac{\alpha}{2 - \bar{\tau}_f}, \text{ де } \bar{\tau}_f = \frac{\tau_f}{\tau_3}. \text{ Звідси випливає, що}$$

$$f(\xi_{min}, \alpha) = \frac{2}{3} \left(2 - \frac{1}{2 - \bar{\tau}_f} \right) \alpha - \alpha^2. \text{ Ця функція має}$$

$$\text{максимум, рівний } f(\bar{\tau}_f) = \frac{1}{9} \left(2 - \frac{1}{\bar{\tau}_f} \right)^2, \text{ при}$$

$$\alpha = \frac{1}{3} \left(2 - \frac{1}{\bar{\tau}_f} \right).$$

Аналіз результатів робіт, присвячених моделюванню процесів ТІГ зварювання модульованим струмом, дозволяє зробити наступні висновки:

1. Результати теоретичного аналізу характеристик дуги з тугоплавким катодом при високочастотній імпульсній модуляції струму підтверджують ефекти стиснення дуги та підвищення тиску потоку дугової плазми на поверхню анода у порівнянні з тиском дуги постійного струму, що спостерігалися експериментально. Показано, наприклад, що тиск дуги з ВЧІ модуляцією струму зростає зі зменшенням коефіцієнта заповнення (при сталості середнього значення потужності дуги) пропорційно відношенню квадратів ефективного та середнього значень модульованого струму.

2. Відповідно до умов точкового ТІГ зварювання з низькочастотною ($f < 10$ Гц) модуляцією зварювального струму, розроблені математичні моделі теплових, гідродинамічних і електромагнітних процесів у зварюваному металі (у тому числі при самоузгодженому врахуванні процесів, що протікають у дуговій плазмі). Проведено детальне комп'ютерне моделювання зазначених процесів, результати якого знаходяться у хорошій відповідності з експериментальними даними.

3. Питанням моделювання розподілених характеристик плазми нестационарної дуги з тугоплавким катодом та її дії на поверхню металу, що зварюється, при ТІГ зварюванні з ВЧІ модуляцією зварювального струму ($f > 10$ кГц) в сучасній науково-технічній літературі не приділено достатньої уваги (за винятком робіт [5, 14]). Тому вважається за доцільне провести детальні теоретичні дослідження та математичне моделювання процесів енерго-, масо- і електропереносу в системі «нестационарна дуга – зварюваний матеріал» при ТІГ зварюванні з ВЧІ модуляцією струму.

Список літератури / References

1. Бой У., Кривцун І.В. (2019) Процессы сварки неплавящимся электродом с модуляцией сварочного тока (Обзор). Часть I. Особенности горения нестационарных дуг с тугоплавким катодом. *Автоматическая сварка*, **11**, 29–39. Boyi Wu, Krivtsun, I.V. (2019) Processes of nonconsumable electrode welding with welding current modulation (Review). Part 1. Peculiarities of burning of nonstationary arcs with refractory cathode. *The Paton Welding J.*, **11**, 23-32.
2. Бой У., Кривцун І.В. (2019) Процессы сварки неплавящимся электродом с модуляцией сварочного тока (Обзор). Часть II. Эффекты дугового воздействия на свариваемый металл. *Там же*, **12**, 12–24. Boyi Wu, Krivtsun, I.V. (2019) Processes of nonconsumable electrode welding with welding current modulation (Review).

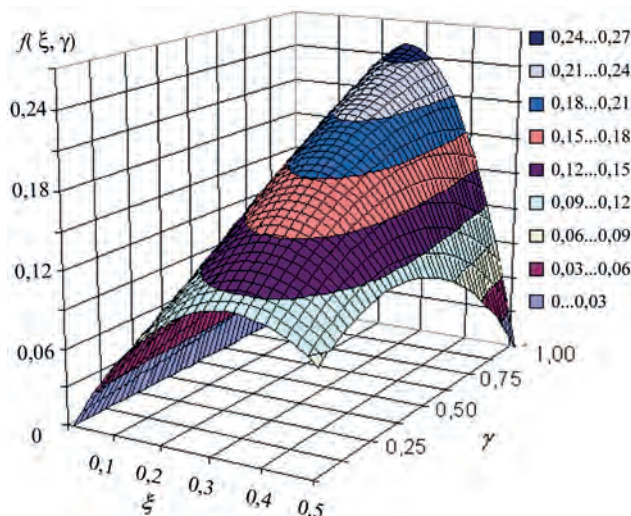


Рис. 19. Вигляд функції $f(\xi, \gamma)$ [21]

- Part 2. Effects of arc impact on the metal being welded. *The Paton Welding J.*, **12**, 11–23.
3. Yamaoto, T., Shimada, W., Gotoh, T. (1976) *Characteristics of high frequency pulsed DC TIG welding process*. Doc. IIW 212-628-76, 11–23.
 4. Cook G.E., Eassa H. E.-D. E. H. (1985) The effect of high-frequency pulsing of a welding arc. *IEEE Transactions on Industrial Application*, 1A-21, **5**, 1294–1299.
 5. Сидорец В.Н., Кривцун И.В., Демченко В.Ф. и др. (2016) Расчетное и экспериментальное исследование статических и динамических вольт-амперных характеристик аргоновой дуги с тугоплавким катодом. *Автоматическая сварка*, **2**, 7–13.
 - Sydorets, V.N., Krivtsun, I.V., Demchenko, V.F. et al. (2016) Calculation and experimental research of static and dynamic volt-ampere characteristics of argon arc with refractory cathode. *The Paton Welding J.*, **2**, 2-8.
 6. Kim, W.H., Na, S.J. (1998) Heat and fluid flow in pulsed current GTA weld pool. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **41**(21), 3213–3227.
 7. Lee S.Y., Na S.J. (1996) A numerical analysis of a stationary gas tungsten welding arc considering various electrode angle. *Weld. J., Res. Suppl.*, 269–279.
 8. Kim W.H., Fan H.G., Na S.J. (1997) A mathematical model of gas tungsten arc welding considering the cathode and the free surface. *Metall. Trans.*, **28B**, 679–686.
 9. Wu, C.S., Zheng, W., Wu, L. (1999) Modelling the transient behaviour of pulsed current tungsten-inert-gas weld pools. *Modelling and Simul. Mater. Sci. Eng.*, **7**(1), 15–23.
 10. Wu C.S. (2008) *Welding heat process and pool geometry*. Beijing, China Machine Press, pp. 102–104.
 11. Traidia A., Roger F., Guyot E. (2010) Optimal parameters for pulsed gas tungsten arc welding in partially and fully penetrated weld pools. *Int. J. of Thermal Sciences*, **49**, 1197–1208.
 12. Traidia A., Roger F. (2011) Numerical and experimental study of arc and weld pool behaviour for pulsed current GTA welding. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **54**, 2163–2179.
 13. Yang M., Qi B., Cong B. et al. (2013) Study on electromagnetic force in arc plasma with UHFP-GTAW of Ti–6Al–4V. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **41**, (9), 2561–2568.
 14. Кривцун И.В., Крикент И.В., Демченко В.Ф. (2013) Моделирование динамических характеристик импульсной дуги с тугоплавким катодом. *Автоматическая сварка*, **7**, 14–25.
 - Krivtsun, I.V., Krikent, I.V., Demchenko, V.F. (2013) Modeling of dynamic characteristics of a pulsed arc with refractory cathode. *The Paton Welding J.*, **7**, 13-23.
 15. Крикент И.В., Кривцун И.В., Демченко В.Ф. (2012) Моделирование процессов тепло-, массо- и электропереноса в столбе и анодной области дуги с тугоплавким катодом. *Там же*, **3**, 7–11.
 - Krikent, I.V., Krivtsun, I.V., Demchenko, V.F. (2012) Modeling of processes of heat-, mass- and electric transfer in column and anode region of arc with refractory cathode. *Ibid.*, **3**, 2-6.
 16. Yang M., Yang Z., Cong B. et al. (2014) A study on the surface depression of the molten pool with pulsed welding. *Welding J., Res. Suppl.*, **93**, (8), 312–319.
 17. Yang, M., Yang, Z., Qi, B. (2015) The effect of pulsed frequency on the plasma jet force with ultra high frequency pulsed arc welding. *IIW*, **8**, 875–882.
 18. Сидорец В.Н., Пентегов И.В. (2013) *Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой*. Киев, Международная Ассоциация «Сварка».
 - Sydorets, V.N., Pentegov, I.V. (2013) Deterministic chaos in nonlinear circuits with electric arc. Kiev, IAW [in Russian].
 19. Соколов О.И., Гладков Э.А. (1977) Динамические характеристики свободной и сжатой сварочных дуг постоянного тока с неплавящимся электродом. *Сварочное производство*, **4**, 3–5.
 - Sokolov, O.I., Gladkov, E.A. (1977) Dynamic characteristics of free and constricted welding arcs of direct current with nonconsumable electrode. *Svarochn. Proizvodstvo*, **4**, 3–5 [in Russian].
 20. Трофимов Н.М., Синицкий Р.В. (1967) Динамические характеристики импульсной дуги при сварке в аргоне. *Там же*, **8**, 18–19.
 - Trofimov, N.M., Sinitzky, R.V. (1967) Dynamic characteristics of pulsed arc in argon arc welding. *Ibid.*, **8**, 18–19 [in Russian].
 21. Демченко В.Ф., Бой У., Кривцун И.В. и др. (2017) Действующие значения электродинамических характеристик процесса сварки неплавящимся электродом с импульсной модуляцией тока дуги. *Автоматическая сварка*, **8**, 3–14.
 - Demchenko, V.F., Boi, U., Krivtsun, I.V., Shuba, I.V. (2017) Effective values of electrodynamic characteristics of the process of nonconsumable electrode welding with pulse modulation of arc current. *The Paton Welding J.*, **8**, 2-11.

PROCESSES OF NONCONSUMABLE ELECTRODE WELDING WITH WELDING CURRENT MODULATION (Review)

Part III. Modeling of the Processes of TIG Welding by Modulated Current

U. Boyi¹, I.V. Krivtsun²

¹Guangdong Institute of Welding (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding).

363 Chiansin Str., 510650, Guangzhou, Tianhe. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

A review of investigations devoted to the processes of inert-gas nonconsumable electrode welding with welding current modulation was performed. The third part of the review is devoted to analysis of the works, dealing with theoretical study and mathematical modeling of the processes of heat-, mass- and electric transfer in arc plasma and welded metal in TIG welding by modulated current. Different approaches to theoretical study of the above-mentioned processes are described, as well as respective mathematical models, allowing for the conditions of nonconsumable electrode welding with low-frequency (up to 10 Hz) and high-frequency (above 10 kHz) pulsed modulation of welding current. Results of numerical analysis of the distributed and integral characteristics of an argon arc with refractory cathode at pulse variation of current are given. It was performed on the base of models of a non-stationary arc with distributed and concentrated parameters. Results of computer modeling of thermal, hydrodynamic and electromagnetic processes in the welded metal (also at self-consistent accounting of the processes that proceed in arc plasma) were analyzed for the case of spot TIG welding with low-frequency pulse modulation of current. Presented are the analytical dependencies that describe the impact of the shape and parameters of welding current pulses on the characteristics of dynamic action of an arc with a refractory cathode on weld pool metal. 21 Ref., 4 Tabl., 19 Fig.

Keywords: arc with refractory cathode, TIG welding, arc plasma, welded metal, penetration, welding current modulation, pulse, frequency, fill factor; amplitude, mathematical modeling

Надійшла до редакції 21.12.2019