

## ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ ЗА УМОВИ РІЗНИХ СПОСОБІВ ПОДАЧІ ЕЛЕКТРОДНОГО ДРОТУ В ПРОЦЕСАХ МЕХАНІЗОВАНОГО ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ Й НАПЛАВЛЕННЯ

Лебедєв В.О.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона, НАН України

***Анотація.** В роботі розглядається питання обґрунтування зниження енерговитрат за умови дугового зварювання електродом, що плавиться. Виведено та проаналізовано рівняння, що визначає потужність дугового процесу, у якому використовується керована імпульсна подача електродного дроту. Показані перспективи роботи. Обґрунтовано вимоги до приводу та джерела зварювального струму.*

***Ключові слова:** електрод, подача, дуговий процес, імпульси, швидкість плавлення, зварювальний струм, математична модель, енергетичні витрати.*

### Вступ

Механізоване й автоматичне електродугове зварювання і наплавлення посідає провідне місце в технологіях з'єднання металів, відновлення зношених поверхонь вузлів і деталей та в їхньому зміцненні.

Спираючись на те, що в світі експлуатується, розробляється і виробляється велика кількість автоматів, напівавтоматів, верстатів і установок для зварювання і наплавлення з усе більш ефективними системами, що входять до їхнього складу, удосконалюються технології, з'являються нові електродні матеріали і захисні середовища для ведення дугових процесів, слід все більшу увагу приділяти вдосконаленню обладнання, яке дозволяє підвищити якісні результати процесів і, що дуже важливо, знизити енергетичні та матеріальні ресурси.

### Аналіз публікацій

Зазначене вище положення буде зберігатися ще досить тривалий час [1].

У світі розробляється і виробляється велика кількість автоматів, напівавтоматів, верстатів і установок для зварювання і наплавлення з усе більш ефективними системами, що входять до їхнього складу. Удосконалюються технології, з'являються нові електродні матеріали і захисні середовища для ведення дугових процесів.

Варто виокремити кілька основних напрямів, які є визначальними у вирішенні все складніших завдань зварювального виробництва і виконання наплавних робіт за неоднакових умов і у використанні різних матеріалів для зварювання і наплавлення:

- 1) поліпшення експлуатаційних властивостей звареного шва або наплавленого валика;
- 2) можливість управління геометричними характеристиками шва, валика, глибини проплавлення, зони термічного впливу;
- 3) зниження витрат електродного металу на угар і розбризкування;
- 4) поліпшення гігієнічних умов і умов праці зварників і операторів;
- 5) зниження енергетичних витрат на ведення дугових процесів.

Практично всі ці напрями можуть бути порушені для їхнього вирішення у застосуванні імпульсних алгоритмів функціонування різних систем зварювально-наплавного обладнання [2]. Це належить до системи живлення дуги (сучасні інверторні джерела зварювального струму), система подачі електродного дроту, система подачі захисного газу, різні конструкції коливачів електродного дроту і виробу. Відомо, що дуговий процес з використанням імпульсного джерела зварювального струму дозволяє забезпечити ефективність ккд близько 80–85 % [3]. Управління циклом перенесення електродного металу шляхом управління параметрами джерела досить складне завдання, якщо враховувати все різноманіття способів і режимів зварювання-наплавлення, електродних матеріалів, захисних середовищ та ін.

Важливо також зазначити обмеження щодо застосування імпульсних інверторних джерел у монтажних умовах, де якість електроенергії за відсутності промислових електромереж значною мірою позначається на їхній працездатності.

Система подачі електродного дроту з різними алгоритмами імпульсної подачі елект-

родного дроту від некерованих, з жорстко заданими параметрами імпульсів до досконалих, із зворотними зв'язками за параметрами дугового процесу (з дозованою подачею дроту) із застосуванням комп'ютеризованих систем управління [4]. Система подачі електродного дроту з певною організацією імпульсного її руху може вирішити завдання всього вищевказаного переліку основних напрямів.

### Мета і постановка завдання

Метою цієї роботи є аналіз енергетичних витрат у застосуванні систем подачі електродного дроту зварювально-наплавного обладнання з розробкою математичного опису, що дозволяє вибирати характеристики зварювального процесу і параметри імпульсів подачі для оптимізації зазначених енергетичних витрат і можливості їхнього зниження, зокрема порівняно з відомими (традиційними) процесами зварювання і наплавлення.

У роботі [5] було вирішено завдання визначення енергетичних витрат за умови імпульсної подачі електродного дроту. Але це дослідження стосувалося практично одного способу подачі, відомого на той період. На сьогодні з'явилися можливості широкого регулювання параметрів імпульсів, а також їх формування в системах з використанням зворотного зв'язку за параметрами дугового процесу.

### Порівняльна оцінка енергетичних витрат

Розглянемо складові витрат електроенергії на дуговий процес, який реалізується за умови різних способів подачі електродного дроту без урахування низки супутніх факторів. Водночас становить інтерес і може бути також важливим отримання результатів порівняно з постійною швидкістю подачі. Необхідно вирішити завдання визначення співвідношення між витратами на плавлення електродного металу і фазовими перетвореннями матеріалу в процесі зварювання з фактичними витратами енергії.

Для того, щоб зрозуміти і пояснити за формою імпульсу, яка близька до прямокутної, математично описати ефект зміни витрат електроенергії за умови дугового зварювання з різними способами подачі електродного дроту, важливо зазначити, що відповідно до роботи [6] існує практично пропорційне збільшення коефіцієнта розплавлення зі збіль-

шенням струму і напруги дугового процесу, а, отже, і потужності дуги.

Очевидно, що витрати електроенергії на плавлення електродного дроту і коефіцієнт її розплавлення пов'язані практично пропорційною залежністю. Спочатку визначимо, виходячи з роботи [7], величину енергії  $\varepsilon$ , витраченої на утворення краплі електродного металу масою  $m$  у разі постійної швидкості переміщення електродного дроту, і це може бути описано рівнянням

$$\varepsilon = \rho \frac{\pi d_3^2}{4K\alpha} \int_0^{t_0} v_{n_0} e^{-A(U_0 - B)t} dt, \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність металу електрода;  $d_3$  – діаметр електродного дроту;  $\alpha$  – коефіцієнт, який враховує втрати електродного металу в дузі й на електроді;  $K$  – маса металу, який може бути розплавлений одиничною енергією;  $v_{n_0}$  – початкова швидкість плавлення електродного дроту;  $A$  і  $B$  – коефіцієнти пропорційності, які залежать від матеріалу електрода, середовища, у якому горить дуга, і властивостей джерела зварювального струму;  $U_0$  – напруга на дузі.

Необхідно виділити в рівнянні (1) вираз

$$\int_0^t v_{n_0} e^{-A(U_0 - B)t} dt \quad (2)$$

Вираз (2) описує інтегральне значення швидкості плавлення електродного дроту.

У наших попередніх роботах показано, що для найбільш поширених форм імпульсів подачі електродного дроту, що генеруються сучасними керованими електроприводами, вирази для струму дугового процесу можна записати: імпульс має форму, близьку до синусоїдальної по модулю

$$i_1(t) = V_1 \left[ \frac{2}{3} - \frac{3}{\pi^2} \left( \frac{3}{2} \cos \frac{2\pi x}{3} + \frac{3}{8} \cos \frac{4\pi x}{3} \right) \right] \frac{H}{gT} e^{-jt} \sin(gt). \quad (3)$$

За формою імпульсу, яка близька до прямокутної

$$i_2(t) = V_2 \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left( \frac{1}{2} \sin \left( \frac{1}{L} \pi x \right) + \sin \frac{3\pi x}{4L} \right) \right] \frac{H}{gT} e^{-jt} \sin(gt), \quad (4)$$

де  $V_1, V_2$  – амплітудні значення швидкостей імпульсного подання електродного дроту у разі форм імпульсів, близьких до синусоїдальної і прямокутної відповідно;  $j, g$  – значення підстановок (замін), отриманих у процесі знаходження оригіналів (3), (4) в операційних перетвореннях.

Відомо, що швидкість плавлення електродного дроту  $v_{nl}$  визначається струмом дугового процесу  $i_\phi$ , безінерційно йде за його змінами та пропорційна йому. Увівши коефіцієнт  $k_{nl}$ , який характеризує ступінь пропорційної залежності  $v_{nl} = f(i_\phi)$ , перепишемо рівняння (3), (4) таким чином:

$$v_{nl1} = k_{nl1} V_1 \left[ \frac{2}{3} - \frac{3}{\pi^2} \left( \frac{3}{2} \cos \frac{2\pi x}{3} + \frac{3}{8} \cos \frac{4\pi x}{3} \right) \right] \frac{H}{gT} e^{-jt} \sin(gt) \quad (5)$$

$$v_{nl2} = k_{nl2} V_2 \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left( \frac{1}{2} \sin \left( \frac{1}{L} \pi x \right) + \sin \frac{3\pi x}{4L} \right) \right] \frac{H}{gT} e^{-jt} \sin(gt) \quad (6)$$

Слід зазначити, що коефіцієнти  $k_{nl1}, k_{nl2}$  неоднакові для різних форм імпульсного впливу і встановлюються простими експериментальними дослідженнями, як це виконано, наприклад, у згаданій роботі [5].

Позначимо

$$k_{nl1} V_1 \left[ \frac{2}{3} - \frac{3}{\pi^2} \left( \frac{3}{2} \cos \frac{2\pi x}{3} + \frac{3}{8} \cos \frac{4\pi x}{3} \right) \right] \frac{H}{gT} = \eta$$

$$k_{nl2} V_2 \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left( \frac{1}{2} \sin \left( \frac{1}{L} \pi x \right) + \sin \frac{3\pi x}{4L} \right) \right] \frac{H}{gT} = \rho$$

Вирази (5), (6) будуть мати вигляд

$$v_{nl1} = \eta \frac{e^{-jt} (ge^{jt} - j \sin gt - g \cos gt)}{g^2 + j^2} \quad (7)$$

$$v_{nl1} = \lambda \frac{e^{-jt} (ge^{jt} - j \sin gt - g \cos gt)}{g^2 + j^2} \quad (8)$$

Підставивши вираз (7) і (8) в підінтегральне значення рівняння (1) і взявши відповідні інтеграли методом інтегрування частинами, отримаємо рівняння, що описують зміни енергії  $P_1$  та  $P_2$  дугового процесу за умови різних форм впливу, формованого під час подачі електродного дроту в такому вигляді:

$$P_1 = \rho \frac{\pi d_s^2}{4K\alpha} \eta \frac{e^{-jt} (ge^{jt} - j \sin gt - g \cos gt)}{j^2 + g^2} \quad (9)$$

$$P_2 = \rho \frac{\pi d_s^2}{4K\alpha} \lambda \frac{e^{-jt} (ge^{jt} - j \sin gt - g \cos gt)}{j^2 + g^2} \quad (10)$$

Рівняння (9), (10) в аналітичній формі приблизно з достатнім ступенем для отримання оцінювальних результатів і вибору характеристик дугового режиму і параметрів імпульсної подачі електродного дроту визначають витрати електричної енергії.

Можна наголосити, що характеристики енергетичних витрат містять як коливальні, так і експонентні складові, які залежать практично від усіх характеристик дугового процесу, зокрема склад і діаметр електродного дроту, властивості джерела зварювального струму та ін.

Тут варто вказати, що за умови правильно вибраних параметрів зварювання і характеристик параметрів  $f = \frac{1}{t}$ , де  $f$  – частота імпульсної подачі електродного дроту.

Процес зварювання з дозованою подачею електродного дроту вимагає дещо іншого підходу для визначення витрат електроенергії або знаходження потужності.

Спрощена структурна схема регулятора для реалізації і розуміння цього процесу представлена на рис. 1.

Для дугового процесу з дозованою подачею електродного дроту з використанням зворотного зв'язку з нелінійною ланкою після його гармонійної лінеаризації передавальна функція системи регулювання матиме вигляд

$$\frac{i(p)}{U_3(p)} = \frac{K_p K_o S}{(T_p p + 1)(T_o p + 1)(T_1^2 p^2 + T_2 p + k) + K_p K_o S(D - Np)} \quad (11)$$

Вираз (11) перетворимо на вигляд

$$i(p) = U_3 \frac{\frac{K_p K_o S}{T_o T_1^2}}{p^3 + \frac{T_1^2 + T_o T_2}{T_o T_1^2} p^2 + \frac{T_o k + T_2 - K_o N}{T_o T_1^2} p + \frac{K_o SLD + k}{T_o T_1^2}} \quad (12)$$

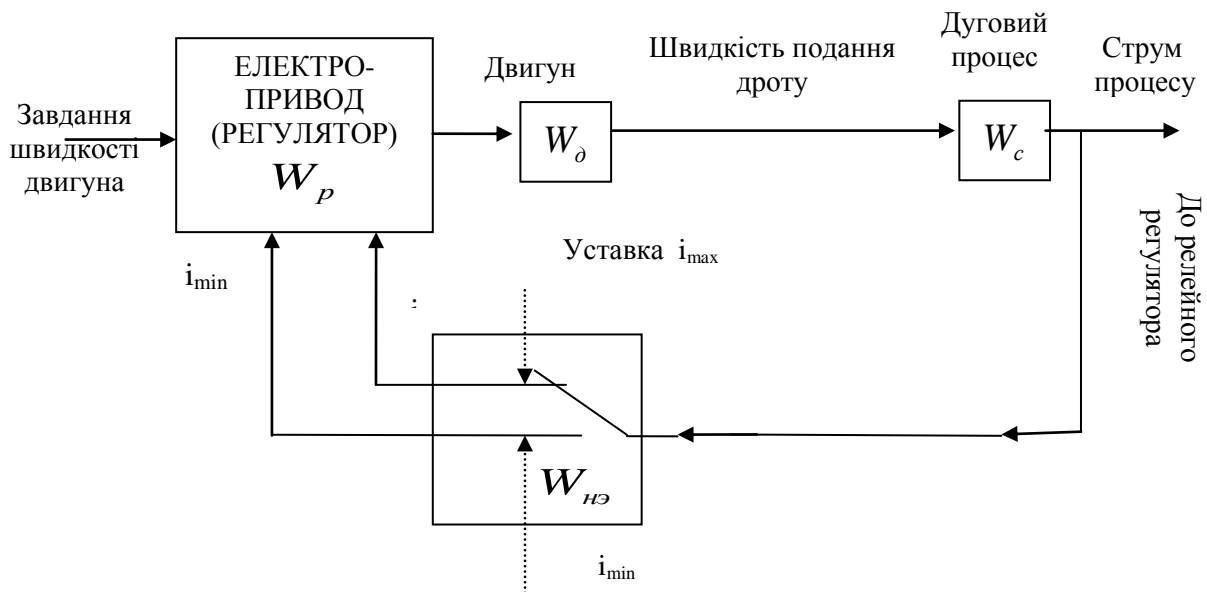


Рис. 1. Структурна схема системи управління процесом зварювання з дозованою подачею електродного дроту з нелінійною перемикальною ланкою:  $W_p$ ,  $W_d$ ,  $W_c$ ,  $W_{нэ}$  – передавальні функції електроприводу механізму подачі, електродвигуна, зварювального процесу, нелінійної перемикальної ланки

Позначимо

$$\frac{K_p K_o S}{T_o T} = n; \quad \frac{T_1^2 + T_o T_2}{T_o T_1^2} = m; \quad \frac{T_o k + T_2 - K_o N}{T_o T_1^2} = g; \quad \frac{K_o SKD + k}{T_o T_1^2} = z \quad (13)$$

Перепишемо з урахуванням (13) рівняння (12) в такому зручному для подальшого дослідження вигляді:

$$i(p) = U_3 \frac{n}{p^3 + mp^2 + gp + z} \quad (14)$$

У таблиці знаходимо зображення з вільним членом, за допомогою якого можна знайти оригінал виразу (15), що має вигляд

$$\frac{1}{(p+c)[(p+a)^2 + b^2]} \quad (15)$$

Оригінал табличного виразу (15) визначається таким чином:

$$i(t) = U_3 \left\{ \frac{1}{c\mu} - \frac{1}{c[(a-c)^2 + b^2]} e^{-at} + \frac{1}{b\mu\sqrt{(c-a)^2}} e^{at} \sin(bt - \lambda) \right\} \quad (16)$$

де  $\lambda = \arctg \frac{b}{-a} + \arctg \frac{b}{c-a}$ ;  $\mu^2 = a^2 + b^2$ .

Запишемо вираз (15) у такому вигляді:

$$\frac{1}{p^3 + (2a+c)p^2 + (a^2 + b^2 + 2ac)p + cb^2 + ca^2} \cdot (17)$$

З огляду на (14), (15), (16), (17), можна виконати заміни

$$\begin{aligned} 2a + c &= m; & a^2 + b^2 + 2ac &= g; \\ c(a^2 + b^2) &= z. \end{aligned} \quad (18)$$

У трьох замінах (18) є три невідомі  $a, b, c$ , які можуть бути знайдені з рівнянь у вигляді

$$a = \frac{mz}{2(g-m)}; \quad b = \sqrt{\frac{z}{c} - a^2}; \quad c = \frac{(g-m)}{z}. \quad (19)$$

Як і в попередньому випадку, введемо коефіцієнт пропорційності  $k_{нлз}$ , що визначає залежність  $v_{нлз} = f(i_0)$  і, відповідно до цього, визначимо рівняння (16) у такий спосіб:

$$P_3 = \rho \frac{\pi d_3^2 k_{нлз} U_3}{4K\alpha c \mu} \left\{ \frac{1}{c\mu} - \frac{1 - e^{-at}}{\gamma a} + \frac{ae^{at} \sin(bt - \lambda) - be^{at} \cos(bt - \lambda) + a \sin \lambda + b \cos \lambda}{(a^2 + b^2)\tau} \right\} \quad (23)$$

Рівняння (23) в аналітичній формі з достатньою для аналізу процесу точністю описує витрати електроенергії в процесі зварювання з дозованою подачею електродного дроту і містить усі характеристики дугового процесу, електродного дроту тощо й може бути використано в дослідницькій і технологічній практиці для вибору зазначених характеристик зварювання та параметрів зворотного зв'язку по струму для оптимізації витрат електроенергії.

Для прикладу на рис. 2 представлені розраховані аналітично графіки зміни потужності зварювання електродним дротом Св08Г2 діаметром 1,2 мм у середовищі CO<sub>2</sub> із застосуванням автоматизованого комплексу для переміщення зварювального пальника зі стабільною швидкістю і системи подачі з універсальним блоком управління, описаним в роботі [9] для низки характеристик дугового процесу, параметрів імпульсів і джерела зварювального струму, що мають форму, близьку до синусоїдальної по модулю, за якою струм зварювання визначається виразом (3). Зварювання проводилося в нижньо-

$$\begin{aligned} v_{нлз} &= k_{нлз} U_3 \left\{ \frac{1}{c\mu} - \frac{1}{c[(a-c)^2 + b^2]} e^{-at} + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{b\mu\sqrt{(c-a)^2}} e^{at} \sin(bt - \lambda) \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} P_3 &= \rho \frac{\pi d_3^2 k_{нлз} U_3}{4K\alpha c \mu} \int_0^{t_0} \left\{ \frac{1}{c\mu} - \frac{e^{-at}}{\gamma} + \frac{e^{at}}{\tau} (\sin bt - \lambda) \right\} dt \end{aligned} \quad (21)$$

Перепишем рівняння (21), враховуючи позначення

$$ac[(a-c)^2 + b^2] + b^2 = \gamma \quad b\mu(c-a) = \tau. \quad (22)$$

Підставивши вираз (21) і (8) у рівняння (1) і взявши відповідні визначені інтеграли після деяких алгебраїчних перетворень, отримаємо рівняння, що описують зміни енергії дугового процесу в застосуванні дозованої подачі електродного дроту, до того ж уявімо, що в підсумку отримаємо вираз у такому вигляді.

У підсумку отримаємо

му положенні зразків із легованої сталі. Графіки представлені у відносних одиницях  $P_{\text{відн. од.}} = f(f_u)$ , де  $f_u$  – частота імпульсів подачі потужності

$$P_{\text{відн. од.}} = \frac{P_1 \cdot P_2}{P}, \quad (24)$$

де  $P$  – потужність стаціонарного процесу, отримана шляхом інтегрування виразу (1).

Достовірність отриманих результатів перевірялася експериментально в наплавленні з зазначеними вище умовами. Виміри проводилися за допомогою спеціально розробленого пристрою типу ІЕ-1-200.

Порівняння розрахованих і експериментально отриманих результатів у діапазоні частот 25...40 Гц показують різницю в 10...20 %, що, на нашу думку, є досить прийнятним результатом і зумовлює можливість отримання аналітичним способом результатів з ефективного застосування імпульсної подачі з різними алгоритмами формування імпульсів.

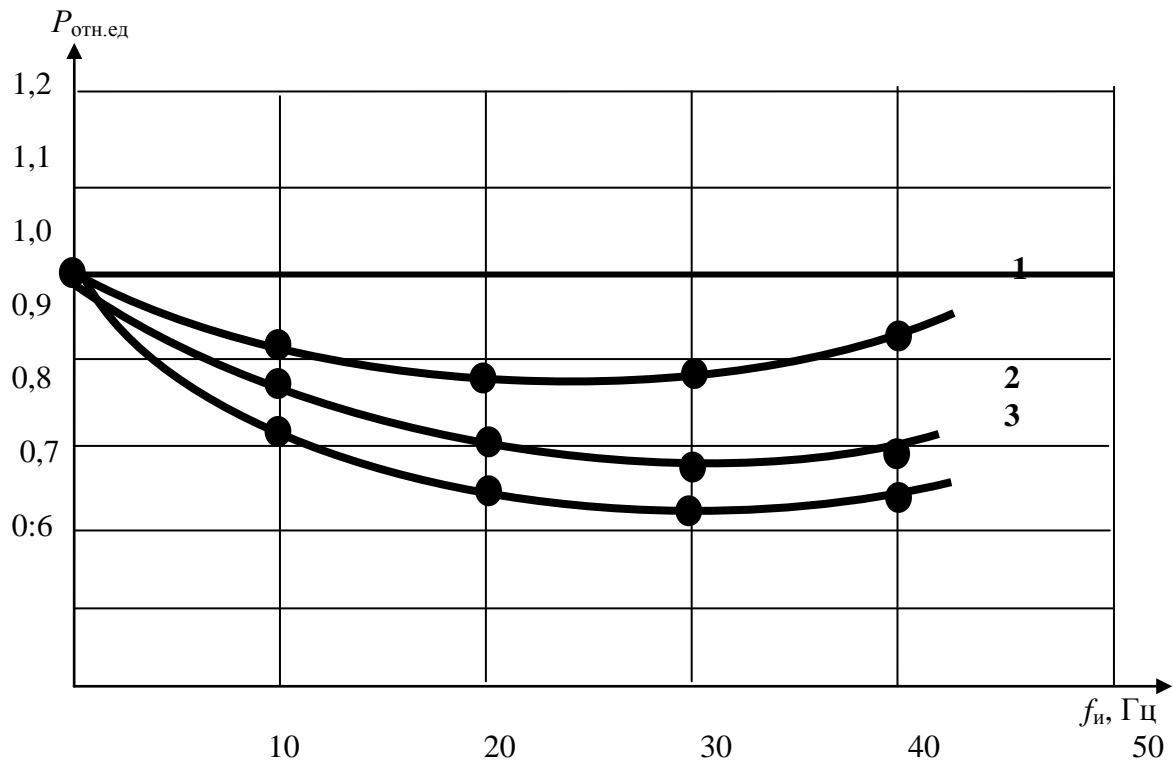


Рис. 2. Графіки зміни потужності зварювання електродним дротом Св08Г2 діаметром 1,2 мм в середовищі  $CO_2$  залежно від частоти імпульсної подачі за умови різних постійних часу зварювального кола: 1 – 0,5 С; 2 – 0,1 С; 3 – 0,05 С

Зауважимо, що за умови частот, що перевищують 40 Гц, знижується величина відносної зміни енерговитрат. Важливо зауважити, що зниження відносних витрат значною мірою залежить від постійної часу зварювального кола.

Аналогічні представленим на рис. 2 графікам розрахунки зі зварювання з дозованою подачею виконати практично неможливо, оскільки в цьому випадку частота імпульсної подачі не задається, а встановлюється процесом зварювання залежно від обраних технологічних умов ведення процесу і деяких параметрів імпульсного руху електродного дроту. Приклади такого процесу порівняно із звичайним зварюванням електродним дротом Св08Г2 діаметром 1,2 мм в середовищі  $CO_2$  залежно від установлених параметрів процесу представлені на характерних осцилограмах (рис. 3) з гістограмами процесів.

Аналіз осцилограм на рис. 3 показує, що порівняно зі звичайним зварювальним процесом (позиція 1), за умови застосування дозованої подачі короткі замикання дугового проміжку стають регулярними і про це можна судити за відповідними гістограмами.

Крім цього, варто зазначити, що частота коротких замикань і струм змінюються відповідно до змін устанавленого струму і напруги дугового процесу (синергетичний процес), до того ж природно змінюються і енергетичні витрати. Варто зауважити, що характеристики імпульсного руху електродного дроту змінюються, зокрема відповідно до встановлених рівнів зворотного зв'язку. Адекватність аналітичних висновків щодо визначення енерговитрат у процесі зварювання з дозованою подачею електродного дроту можна підтвердити, використовуючи також вищезазначений пристрій ІЕ-1-200. Вимірювання і розрахунок відповідно до виразу (23) дають результати з різницею в 15 ... 22 %, що можна вважати прийнятним висновком для твердження про доцільність подальшого застосування аналітичного результату.

На нашу думку, різниця у вимірах і розрахунках обумовлена прийнятими спрощеннями і припущеннями, зокрема в отриманні лінеаризованого рівняння, що описує систему управління процесом зварювання з дозованою подачею електродного дроту.

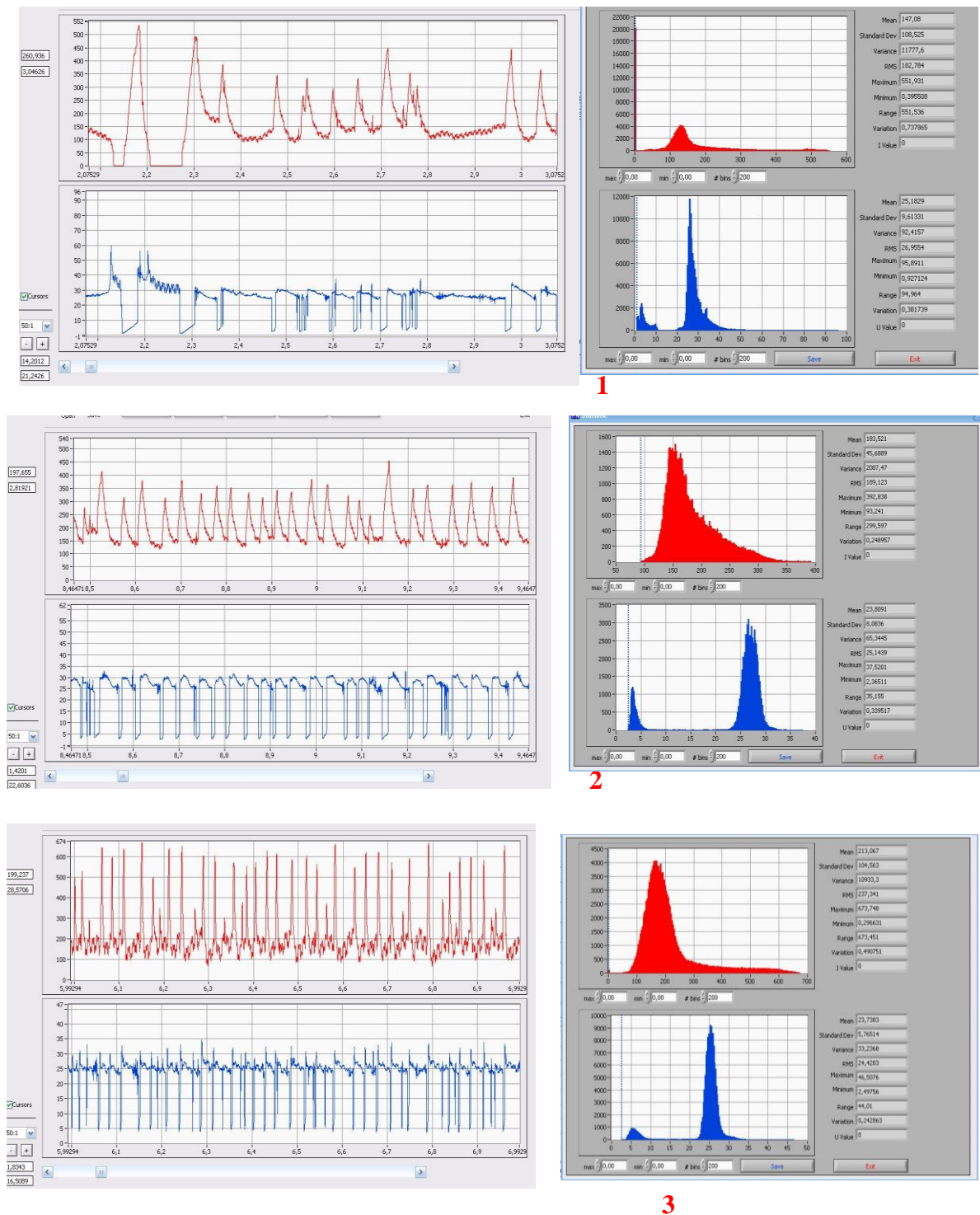


Рис. 3. Осцилограми струму (вгорі) і напруги (внизу), праворуч – гістограми процесу: 1 – звичайний процес; 2, 3 – процеси з дозованою подачею з різними рівнями струмів зворотних зв'язків

Підкреслимо, що важливість вирішення завдання зниження енерговитрат за умови дугового зварювання електродом, що плавиться, за рахунок застосування імпульсних алгоритмів подачі дроту має сполучатися з отриманням якісних характеристик зварного шва і наплавленого валика, зокрема наступним важливим завданням є необхідність

формулювання умов оптимального вибору параметрів імпульсної подачі для вирішення комплексу проблем, властивих розглянутому дуговому процесу.

Додатково до досліджень, наведених вище, особливу увагу у виконанні зварювання і наплавлення електродом, що плавиться, із застосуванням імпульсних алгоритмів

управління перенесенням електродного металу з використанням систем подачі слід приділити увагу дуже суттєвому ефекту – зниженню втрат (розбризування і чад) електродного металу. Цей показник належить, зокрема, не тільки до ресурсозбереження, а й до економії електроенергії, оскільки не витрачається енергія на зайве плавлення електродних матеріалів для формування швів

і наплавлених шарів, а також на надання шву товарного вигляду (зачистка від бризок електродного металу).

На рис. 4 представлені результати експериментальних досліджень з вивчення впливу частоти і шпаруватості на величину втрат електродного металу, для зварювання у вуглекислому газі електродним дротом Св08Г2С діаметром 1,2 мм [9].

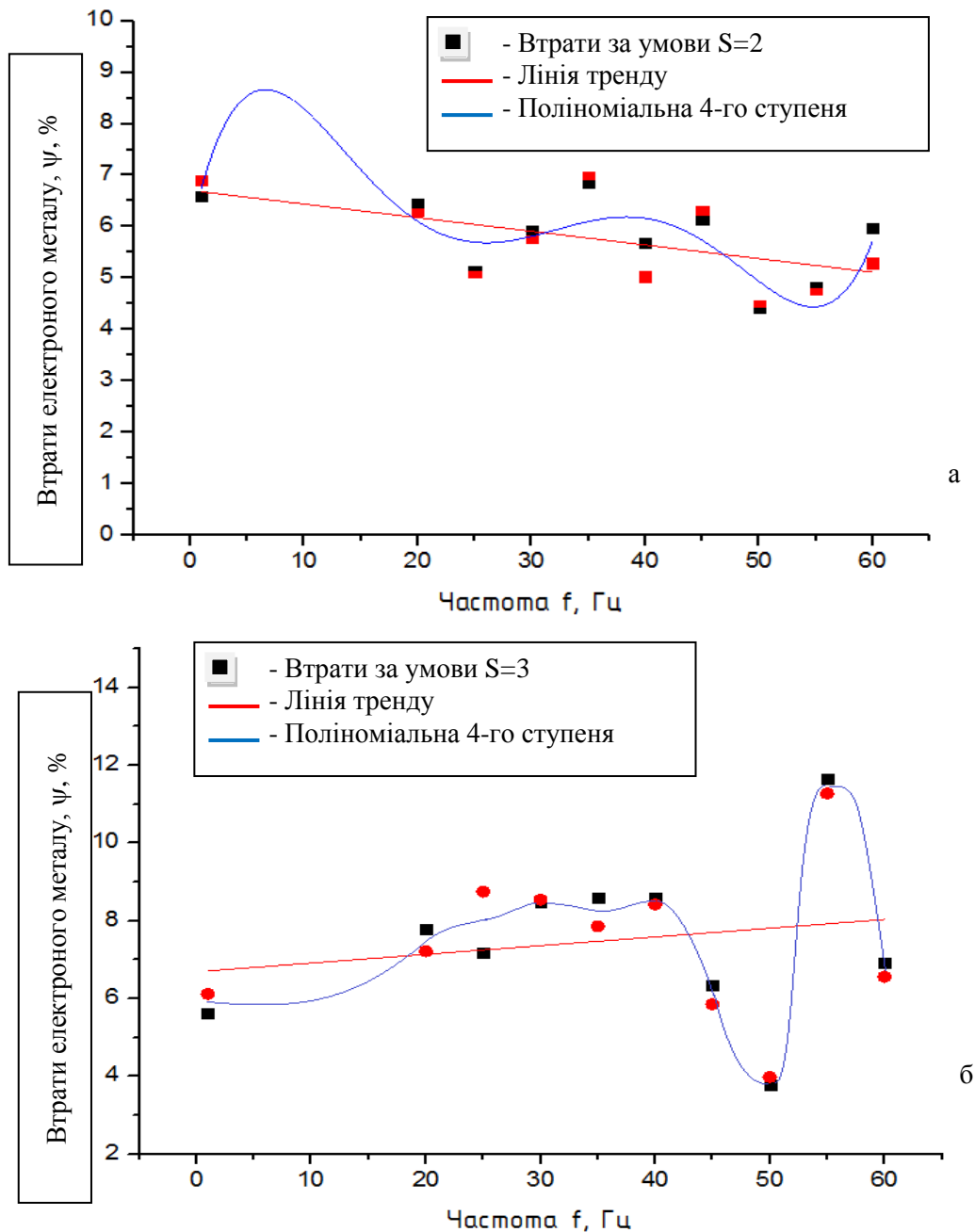


Рис. 4. Графіки втрат електродного металу за умови напруги зварювання  $U_d = 20 \dots 22$  В: а – у разі  $S = 2$  швидкість подачі в імпульсі  $V_i = 360$  м / год, швидкість подачі в паузі  $V_p = 0$  м / год; б – якщо  $S = 3$ , швидкість подачі в імпульсі  $V_i = 360$  м / год,  $V_i = 720$  м / год, швидкість подачі в паузі  $V_p = 0$ ,  $V_p = 0$  м/год



З огляду на важливість вирішення завдань отримання якісних характеристик зварного шва і енергоресурсозбереження, удосконалення дугових механізованих процесів зварювання і наплавлення буде ґрунтуватися на застосуванні систем подачі електродного дроту і живлення дуги з імпульсними алгоритмами функціонування, що дозволило ефективно вирішити такі завдання:

– установлена потужність джерел живлення дуги зменшується в 1,5...1,8 рази з відповідним зменшенням вартості та витрат на експлуатацію;

– економія електроенергії на 30–50 % на кілограм наплавленого металу, що відповідає вимогам ЄС від 2001 р.;

– зменшуються втрати електродного металу в 1,5...2 рази.

### Висновки

1. Імпульсна подача електродного дроту з установленими характеристиками дугового процесу і вибраними параметрами імпульсного руху електродного дроту, що забезпечує кероване перенесення електродного металу, має істотний вплив на енергетичні характеристики зварювального процесу, також як і дозована подача.

2. Енергетичні витрати зварювального процесу з імпульсними алгоритмами подачі залежать від форми та частоти імпульсного руху, до того ж імпульсний рух з формою імпульсів, близькою до прямокутної, забезпечує зниження енерговитрат за інших рівних умов, у більшому ступені, ніж у разі синусоїдального по модулю формі імпульсу.

3. У процесі дугового зварювання з дозованою подачею енерговитрати в істотно залежать від установлених зворотних зв'язків, що перемикаються, зокрема залежності визначаються мінімальним і максимальним значеннями струму зварювання, що вводяться в електропривод механізму подачі.

4. Отримані вирази в аналітичній формі, що визначають енергетичні витрати на процес зварювання, досить точно відображають вплив як характеристик дугового процесу, так і параметрів імпульсного впливу від системи подачі, і можуть бути використані для вибору параметрів, що мінімізують зазначені витрати або враховують їхні оптимальні величини разом з іншими технологічними характеристиками: втрати електродного металу, поліпшення структури металу шва та ін.

5. Істотне зниження втрат електродного металу під час зварювання й наплавлення у

застосуванні імпульсного впливу на процес перенесення із використанням спеціальних систем подачі й правильно обраних параметрах імпульсів також має бути розглянуто як зниження енерговитрат на ведення процесу й отримання зварного шва або наплавленого шару в остаточному вигляді: втрати електродного металу, поліпшення структури металу шва тощо.

### Література

1. Патон Б.Е. Избранные труды. Киев: Ин-т электросварки им. Е.О. Патона. 2008. 896 с.
2. Лебедев В.А., Драган С.В., Жук Г.В., Новиков С.В., Симутенков И.В. Применение импульсных воздействий при дуговой сварке плавящимся электродом в брете защитных газов. Автоматическая сварка 2019. № 8. С. 30–40.
3. Судник В.А., Иванов А.В., Дилтей У. Математическая модель источника теплоты при дуговой сварке плавящимся электродом в смеси защитных газов. Сварочное производство. 2000. № 9. С.9–16.
4. Лебедев В.А., Жук Г.В. Управление переносом электродного металла на основе импульсных алгоритмов функционирования систем с дозированием подачи электродной проволоки при механизированной дуговой сварке. Тяжёлое машиностроение. 2017. № 6. С. 27–32.
5. Лебедев В.А. Аспекты выбора оборудования для электродуговой механизированной и автоматической сварки с импульсной подачей электродной проволоки. Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвідомчий науково-технічний збірник. Київ. Техніка, 2008. Вип. 70. С.45–49.
6. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. Москва: Машиностроение, 1974. 768 с.
7. Букаров В.А., Ермаков С.С. Анализ закономерностей изменения энергетических характеристик дуги при сварке плавящимся электродом. Сварочное производство. 1993. № 9. С. 7–9.
8. Lebedev V., Zhuk G. New system of electrode wire control, supply for mechanized electric welding and surfacing. Проблеми зварювання та споріднених технологій: Матеріали Всеукраїнської конференції, 17–19 вересня 2019 р. С. 34–35.
9. Лендел И.В., Максимов С.Ю., Лебедев В.А., Козырко О.А. Влияние импульсной подачи электродной проволоки на формирование и износостойкость наплавленного валика, а также потери электродного металла при дуговой наплавке в CO<sub>2</sub>. Автоматическая сварка. 2015. № 5–6. С. 46–48.

## References

1. Paton B.E. Izbrannyye trudy. Kiev: In-tekstrosvariki im. E.O. Patona, 2008. 896 p. [in Russian].
2. Lebedev V.A., Dragan S.V., ZHuk G.V., Novikov S.V., Simutenkov I.V. Primenenie impul'snyh vozdeystviy pri dugovoy svarke plavyashchimsya elektrodom v brede zashchitnyh gazov. *Avtomaticheskaya svarka*, 2019, no. 8, pp. 30-40.
3. Sudnik V.A., Ivanov A.V., Diltey U. Matematicheskaya model' istochnika teploty pri dugovoy svarki plavyashchimsya elektrodom v smesi zashchitnyh gazov. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2000, no. 9, pp. 9-16.
4. Lebedev V.A., ZHuk G.V. Upravlenie perenosom elektrodnoho metala na osnove impul'snyh algoritmov funkcionirovaniya sistem s dozirovaniem podachi elektrodnoy provoloki pri mekhanizirovannoy dugovoy svarke. *Tyazhyoloe mashinostroenie*. 2017, no. 6, pp. 27-32.
5. Lebedev V.A. Aspekty vybora oborudovaniya dlya elektrodugovoy mekhanizirovannoy i avtomaticheskoy svarki s impul'snoy podachej elektrodnoy provoloki. *Elektromashinobudovannya ta elektroobladnannya. Mizhvidomchij naukovo-tekhnichnij zbirnik*. Vipusk 70. Kiiv: Tekhnika, 2008. P. 45-49.
6. Tekhnologiya elektricheskoy svarki metallov i splavov plavlenniem / po redakciej B.E. Patona. Moskva: Mashinostroenie, 1974. 768 p.
7. Bukarov V.A., Ermakov S.S. Analiz zakonornostej izmeneniya energeticheskikh harakteristik dugi pri svarke plavyashchimsya elektrodom. *Svarochnoe proizvodstvo*. 1993, no. 9, pp. 7-9.
8. Lebedev V., Zhuk G. New system of electrode wire control, supply for mechanized electric welding and surfacing. *Problemi zvaryvannya ta sporidnenih tekhnologij. Materiali Vseukraïns'koï konferencii*. 17-19 veresnya 2019, pp. 34-35.
9. Lendel I.V., Maksimov S.YU., Lebedev V.A., Kozyrko O.A. Vliyanie impul'snoy podachi elektrodnoy provoloki na formirovanie i iznosostojkost' naplavlennogo valika, a takzhe poteri elektrodnoho metalda pri dugovoy naplavke v SO<sub>2</sub>. *Avtomaticheskaya svarka*. 2015, no. 5-6, pp. 46-48.

**Лебедєв Володимир Олександрович**, д.т.н., професор, головний конструктор ДП «Конструкторсько-технологічне бюро Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України», tel.: +38 (044) 2004546; e-mail: valpaton@ukr.net, м. Київ, Україна.

### Comparative evaluation of energy costs at different methods of electrode wire supply in mechanized arc welding processes

**Relevance of work.** Problems of energy saving in all technological processes are always significant. In the

processes of arc welding and surfacing, energy consumption is one of the main indicators of the profitability of using a particular implementation method, and therefore the search for reducing energy costs remains relevant. It is known that the pulsed feed of the electrode wire in mechanized and automatic welding-surfacing processes can reduce the specific power consumption for conducting processes in comparison with traditional arc welding-surfacing methods. **Purpose of the work.** The purpose of the work is to analyze the energy costs when using electrode wire feed systems of welding and surfacing equipment with the development of a mathematical description that allows you to select the characteristics of the welding process and parameters of the feed pulses to optimize the specified energy costs and the possibility of their reduction. **Research methods.** The main method for studying energy processes is to obtain a mathematical model that describes the levels of energy consumption when using the most characteristic forms of impulse actions in surfacing welding with a controlled pulse feed of an electrode wire. Obtaining and analysis of the obtained dependencies, including comparison with the results obtained with traditional methods of conducting arc processes, as well as the results of experimental studies using specially designed devices. **Results.** Mathematical models of the processes of electric arc welding with a pulse feed of an electrode wire have been obtained, in which the energy features of welding and surfacing with various, most well-known pulse shapes, time constants of welding current sources, as well as a number of other significant characteristics of the arc process are distinguished. A comparative assessment of the required power consumption for equipment with pulsed and conventional electrode wire feed systems with experimental natural fixation of the results has been made. **Scientific novelty.** For the first time, adequate mathematical models have been obtained that describe the dependences of energy costs in welding and surfacing with pulse algorithms for feeding an electrode wire with almost all the operating characteristics of the arc process with a special emphasis on the shape and parameters of the pulse movement of the wire. A comparative assessment of energy costs, including the costs of a conventional process, is made. **Practical value.** The main practical conclusions (results) of the work are analytical descriptions of electricity consumption for welding-surfacing when using a pulse feed with various pulse characteristics, taking into account a number of other characteristics, including the physicochemical characteristics of the process and materials, as well as the technical characteristics of the source. The results obtained can be used when choosing and setting the parameters of impulse action to ensure optimal energy consumption.

**Key words:** electrode, feed, arc process, pulses, melting rate, welding current, mathematical model, energy costs

**Lebedjev Volodymyr Oleksandrovych**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Designer, Sf “Experimental Design-Technological Office of the E.O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine”,  
tel. +38(044)2004546; e-mail: valpaton@ukr.net, Kyiv, Ukraine.

**Сравнительная оценка энергетических затрат при различных способах подачи электродной проволоки в процессах механизированной дуговой сварки и наплавки**

*Аннотация.* В работе рассматривается вопрос обоснования снижения энергозатрат при дуговой сварке плавящимся электродом. Выведено и проанализировано уравнение, определяющее мощ-

ность дугового процесса, в котором используется управляемая импульсная подача электродной проволоки. Показаны перспективы работы. Обоснованы требования к приводу и источнику сварочного тока.

**Ключевые слова:** электрод, подача, дуговой процесс, импульсы, скорость плавления, сварочный ток, математическая модель, энергетические затраты.

**Лебедев Владимир Александрович**, д.т.н., профессор, главный конструктор ГП «Конструкторско-технологическое бюро Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины», тел.: +38(044)2004546; e-mail: valpaton@ukr.net, г. Киев, Украина.

---