

# МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЗВАРЮВАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ ДЛЯ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

А.А. Бабінець, І.О. Рябцев, І.П. Лентюгов

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: a\_babinets@ukr.net

Проведено аналіз існуючих методик оцінки зварювально-технологічних властивостей електродних матеріалів, які застосовуються під час електродугового наплавлення (зварювання). Розглянуто основні принципи оцінювання стабільності дугового процесу. Визначено основні підходи до дослідження властивостей електродних матеріалів і перелік контрольованих параметрів, які найчастіше використовуються для цього. Показано, що кількісні критерії оцінки мають переваги над якісними. На основі проведеного аналізу розроблено комплексну методику оцінки зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів, яка складається з трьох основних блоків. Перший блок використовує візуальну експертну оцінку процесу дугового наплавлення та якості формування наплавленого металу, яка виконується з використанням диференціальної бальної системи. Другий блок спрямований на оцінку характеристик плавлення порошкових електродних дротів на основі експериментально визначених коефіцієнтів розплавлення, наплавлення та втрат. Третій блок охоплює оцінку стабільності дугового процесу, яка виконується за експериментально визначеними коефіцієнтами варіації величин струму та напруги на дузі. Переваги використання запропонованої комплексної методики продемонстровано на прикладі оцінки властивостей реальних порошкових дротів для дугового наплавлення. Установлено, що ця методика є інформативнішою порівняно з підходами, які базуються лише на визначенні якісних показників. Підтверджено, що тип і гранулометричний склад металевих компонентів осердя порошкових дротів впливають на стабільність дугового процесу наплавлення. Використання в осерді порошкових дротів більш хімічно чистих та однорідних за властивостями металевих гранульованих порошоків, у порівнянні з порошками феросплавів, дозволяє підвищити стабільність та продуктивність наплавлення на 15...30 %. Бібліогр. 19, табл. 2, рис. 2.

*Ключові слова:* дугове наплавлення, порошковий дріт, наплавлений метал, зварювально-технологічні властивості, стабільність наплавлення, коефіцієнти варіації

**Вступ.** Відомо, що порошковий дріт є високопродуктивним матеріалом, здатним вирішувати широкий спектр завдань, зокрема пов'язаних із виготовленням або відновленням методами дугового наплавлення деталей, які використовуються у різних галузях промисловості [1–3].

Порошковий дріт складається з металеві оболонки (з м'якої сталеві, нікелевої, титанові стрічки тощо) та осердя, заповненого порошковими компонентами. До складу осердя входять легувальні компоненти (феросплави, чисті метали, карбіди, бориди тощо), які забезпечують необхідний хімічний склад і властивості наплавленого металу [1–3]. Окрім легувальних елементів, до складу осердя часто додають розкислювальні, газо- та шлакоутворювальні компоненти, що сприяють захисту та рафінуванню розплавленого металу. Додатково до осердя можуть вводитися легкоіонізуючі добавки, які стабілізують дуговий розряд, що підвищує ефективність процесу наплавлення (зварювання) [1–5].

Перевагами порошкових дротів є їхня універсальність, широкі можливості легування наплавленого металу, а також висока продуктивність, яка

забезпечує суттєве зниження матеріальних витрат [1, 5, 6]. Завдяки цьому порошкові дрони успішно застосовуються в процесах механізованого та автоматичного наплавлення (зварювання). За своїми операційними показниками вони практично не поступаються дротам суцільного перерізу, тому для наплавлення можна використовувати серійне обладнання [6].

Проте, порівняно з наплавленням порошковими дротами, використання суцільних електродних дротів дозволяє отримати метал з одноріднішим хімічним складом і властивостями. Це обумовлено вищою стабільністю процесу наплавлення в другому випадку.

Висока стабільність процесу наплавлення, а отже, і більша однорідність наплавленого металу за його складом і властивостями особливо важлива при наплавленні корозійно-, газоерозійно- та зносоустійких шарів відповідальних деталей, які експлуатуються в хімічній, нафтогазовій, металургійній та інших галузях промисловості. У таких випадках при виборі електродних матеріалів виникає необхідність оцінки їхніх зварювально-технологічних властивостей, а також вивчення впливу численних

Бабінець А.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4432-8879>, Рябцев І.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7180-7782>, Лентюгов І.П. – <https://orcid.org/0000-0001-8474-6819>

© А.А. Бабінець, І.О. Рябцев, І.П. Лентюгов, 2025

факторів, серед яких ключове значення має склад наповнювача (осердя) порошкових дротів.

**Метою роботи** є аналіз існуючих методик оцінки зварювально-технологічних властивостей електродних матеріалів, які застосовуються при наплавленні (зварюванні), а також розробка відповідної методики для дугових методів наплавлення із використанням порошкових електродних дротів.

**Аналіз джерел посилань.** Стабільність процесу наплавлення (зварювання) є одним із ключових параметрів зварювально-технологічних властивостей електродних матеріалів. Водночас це – складне та багатофакторне поняття, яке не має єдиної стандартизованої методики оцінювання [4, 7]. Стабільність залежить від параметрів об'єкта дослідження, методику її визначення дослідники обирають або розробляють у кожному конкретному випадку, залежно від поставлених задач.

Для підвищення рівномірності плавлення осердя та оболонки порошкового дроту, з метою підвищення однорідності отриманого наплавленого металу, застосовують різні технологічні прийоми. Серед них: збільшення частки металевих порошоків у складі осердя, вибір легкоплавких композицій для шлакоутворювальних компонентів, зменшення товщини оболонки тощо [3].

Часто зварювально-технологічні властивості електродних матеріалів оцінюють шляхом візуального огляду отриманих зразків та аналізу якості формування наплавленого валика чи зварного шва [8–11]. Візуальний огляд здійснюють за допомогою лупи зі збільшенням  $\times 2 \dots 5$ , фіксуючи при цьому контрольовані параметри. До них належать: відповідність геометричних розмірів наплавленого валика (або зварного шва) технічній документації; сталість розмірів за всією довжиною контрольованого відрізка; відсутність подрізів і видимих дефектів тощо. Проте така методика дозволяє лише опосередковано оцінити стабільність дугового процесу.

На думку авторів [3, 4, 6], стабільність дугових процесів може бути ефективно оцінена за допомогою кількісних показників. Процес вважається стабільним, якщо відхилення його параметрів від середніх значень не перевищує заданого рівня. Мірою стабільності при цьому є величина відхилення параметра від його середнього значення. У якості такої міри можуть бути використані дисперсія, середньоквадратичне відхилення або коефіцієнт варіації [12].

Так, у [6] для визначення та оптимізації зварювально-технологічних характеристик покритих електродів і зварювального дроту були обрані наступні критерії стабільності процесу: середня та

критична частота коротких замикань, коефіцієнти варіації відповідної частоти, а також середня та максимальна маса краплі металу.

У [5, 13], присвячених зварюванню самозахисними порошковими дротами, оцінку стабільності процесу виконували, аналізуючи величину коефіцієнтів варіації зварювального струму та напруги, а також середній час та частоту коротких замикань, визначених за допомогою системи, яка використовує швидкісний аналого-цифровий перетворювач. Додатково оцінювали віддільність шлакової кірки, наявність дефектів і втрати металу на розбризкування.

Зварювально-технологічні властивості електродів у [14] оцінювали за допомогою комплексної системи бального ранжування, враховуючи такі контрольовані параметри: легкість збудження дуги, якість формування шва, ступінь розбризкування металу, покритву властивість і легкість відокремлювання шлаку, наявність дефектів. Стабільність горіння дуги оцінювали з використанням автоматизованого комплексу діагностики та контролю параметрів зварювальних процесів, також переводячи отримані дані в підсумкові бали.

У [15, 16] при наплавленні порошковими дротами та стрічками використовували методику оцінки зварювально-технологічних властивостей на основі визначення якості формування наплавленого металу, коефіцієнтів розплавлення, наплавлення, втрат на розбризкування та стабільності горіння дуги. Якість формування оцінювалася співвідношенням ширини ( $b$ ) наплавленого валика до його висоти ( $h$ ). На думку авторів зазначених робіт, чим більше величина ( $b/h$ ), тим вище якість формування. Стабільність визначалася величиною коефіцієнтів варіації за напругою та струмом: чим вони менші, тим процес горіння дуги стабільніший.

У [17] зварювально-технологічні властивості порошкового дроту, мікролегованого бором, оцінювали за комплексною методикою, яка містила такі якісні параметри: характер збудження дуги (легкий, середній, ускладнений); стабільність горіння дуги (стабільне, задовільне, нестабільне); якість формування наплавленого валика (якісне, задовільне, неякісне); тип і наявність дефектів у наплавленому металі (відсутні, поодинокі, значна кількість); якість відділення шлакової кірки (легке, задовільне, ускладнене); відповідність хімічного складу та твердості наплавленого металу технічним вимогам (відповідає, не відповідає). Також оцінювали характеристики плавлення за кількісними показниками: коефіцієнтами розплавлення, наплавлення та втрат.

**Розробка методики оцінки зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів для дугового наплавлення.** Підсумовуючи наведені дані, можна стверджувати, що для підвищення інформативності та обґрунтованості вибору електродних матеріалів для наплавлення оцінка їх зварювально-технологічних властивостей повинна бути комплексною. При цьому слід враховувати такі ключові показники, як: характеристики плавлення електродного дроту, наявність дефектів, якість формування наплавленого металу та якість відділення шлакової кірки (якщо застосовуються спосіб наплавлення під флюсом або самозахисними порошковими дротами).

Якість формування наплавленого металу, на нашу думку, доцільно оцінювати за допомогою диференціальної бальної системи. Застосування математичних виразів для такої оцінки, заснованої на співвідношенні його параметрів [15], не несе практичної користі, оскільки режими наплавлення зазвичай обирають з урахуванням вимог до забезпечення заданої глибини проплавлення, ширини чи висоти наплавленого валика [1].

Оцінку стабільності дугового процесу доцільно виконувати на основі кількісних показників. Це особливо важливо при використанні електродних матеріалів, близьких за характеристиками, коли візуальне визначення стабільності дугового процесу значно ускладнене. Найточнішої та найінформативнішої оцінки можна досягти шляхом аналізу

інтегральних величин, які визначають енергетичний стан дугового процесу. Прикладами таких величин є напруга та струм дуги, які багаторазово фіксуються впродовж процесу [4].

На основі проведеного аналізу та результатів власних експериментальних досліджень [17, 18] нами розроблено наступну методику комплексної оцінки зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів для наплавлення, яка складається з трьох блоків.

Перший блок містить візуальну експертну оцінку процесу дугового наплавлення та отриманого наплавленого металу з використанням диференціальної бальної системи (табл. 1). Контрольовані параметри, які використовує даний блок: характер збудження дуги, якість формування наплавленого металу, наявність видимих дефектів, відповідність хімічного складу наплавленого металу вимогам та якість відокремлення шлакової кірки (за умови, що використовується спосіб наплавлення під флюсом або самозахисним порошковим дротом).

Другий блок містить оцінку характеристик плавлення (продуктивності) порошкових електродних дротів, яка визначається за коефіцієнтами розплавлення, наплавлення та втрат. Коефіцієнт розплавлення ( $\alpha_p$ ) характеризує питому (віднесену до одного ампера зварювального струму) продуктивність процесу розплавлення дроту. Коефіцієнтом наплавлення ( $\alpha_n$ ) характеризується питома продуктивність процесу наплавлення. Втра-

**Таблиця 1. Контрольовані показники зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів для наплавлення з бальною оцінкою за диференціальним методом**

Контрольований параметр	Оцінка в балах	Коротка характеристика показника
Характер збудження дуги	0	Поганий. Запалювання не з першого дотику електроду до виробу або відсутність запалювання
	1	Задовільний. Запалювання без приварювання електроду
	2	Гарний. Запалювання відразу після дотику електроду до виробу
Якість формування наплавленого металу	0	Погана. Валик нерівномірний за шириною та висотою, поверхня крупнолуска
	1	Задовільна. Окремі нерівності за шириною чи висотою, у тому числі на краях, поверхня дрібнолуска
	2	Гарна. Валик рівномірний, з плавним переходом до основного металу, поверхня гладка
Наявність видимих дефектів (пори, тріщини, несплавлення)	0	Одна або більше тріщин завдовжки > 5 мм та/або ланцюжків, скупчень пор
	1	Тріщини відсутні. Поодинокі пори на відстані > 100 мм
	2	Дефекти відсутні
Відповідність хімічного складу наплавленого металу технічним вимогам	0	Не відповідає. Відхилення масової частки для будь-якого елемента більше ніж $\pm 10\%$ від його регламентованого значення або відхилення масової частки для двох чи більше елементів більше ніж $\pm 5\%$ від їх регламентованих значень
	1	Частково відповідає. Відхилення масової частки для будь-якого елемента більше ніж $\pm 5\%$ його регламентованого значення або відхилення масової частки для двох чи більше елементів більше ніж $\pm 2,5\%$ їх регламентованих значень
	2	Відповідає. Хімічний склад металу знаходиться в межах регламентованого діапазону за всіма елементами
Якість відокремлення шлакової кірки	0	Погана. При закінченні процесу наплавлення кірка не відокремлюється
	1	Задовільна. Відокремлюється при додатковому механічному впливі
	2	Гарна. Відокремлюється після наплавлення без додаткового механічного впливу

ти електродного металу (з урахуванням втрат на вигар і розбризкування) характеризуються відповідно коефіцієнтом втрат ( $\psi$ ). Вказані коефіцієнти розраховуються за наступними виразами [17, 18]:

$$\alpha_p = \frac{G_p}{I \cdot t}, \quad (1)$$

$$\alpha_n = \frac{G_n}{I \cdot t}, \quad (2)$$

$$\psi = \frac{\alpha_p - \alpha_n}{\alpha_p} \cdot 100\% \quad (3)$$

де  $G_p$  – маса розплавленого металу, г;  $G_n$  – маса наплавленого металу, г;  $I$  – зварювальний струм, А;  $t$  – час наплавлення, год.

Чим вище показники розплавлення та наплавлення і чим менше показник втрат, тим продуктивність наплавлення порошковим дротом вища.

Третій блок містить оцінку стабільності перебігу дугового процесу наплавлення, яку пропонується виконувати за дисперсністю поточних значень величин струму та напруги на дузі при їх багаторазовій фіксації за розрахованими відповідними коефіцієнтами варіації. Застосування коефіцієнта варіації у якості контрольованого параметра дозволяє усунути вплив масштабу різних вибірок отриманих даних.

Для фіксації параметрів режиму протягом процесу наплавлення потрібно використовувати пристрій з високошвидкісними аналого-цифровими перетворювачами та функцією збереження отриманих даних. У нашій роботі для цієї мети використовувався цифровий записуючий мультиметр ANENG AN9002, оснащений високошвидкісним аналого-цифровим перетворювачем. Мультиметр у режимі реального часу зберігає результати вимірювань у власній пам'яті та дозволяє передавати їх на інші пристрої за допомогою технології зв'язку Bluetooth.

Аналіз отриманих поточних значень величин струму та напруги на дузі за допомогою розрахованих коефіцієнтів варіації можна виконувати за допомогою стандартних засобів, які входять до складу програм для математичного аналізу, таких, наприклад, як Microsoft Excel, MathLab тощо [19]. У даній роботі використовували вбудовані функції математичного аналізу програми Microsoft Excel.

Для визначення коефіцієнту варіації необхідно спочатку розрахувати стандартне відхилення ( $S$ ). Для цього можна скористатись вбудованою функцією STDEV(число1; ...), де число1 – це перший числовий аргумент, який відповідає вибірці із генеральної сукупності. Замість аргументів, розділених крапкою з комою, можна використовувати масив чи посилання на масив. Функція STDEV

розраховує стандартне відхилення за наступною формулою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}}, \quad (4)$$

де  $X$  – вибіркове середнє;  $n$  – розмір вибірки.

Далі потрібно визначити середнє арифметичне ( $\bar{X}$ ), яке можна розрахувати за допомогою функції AVERAGE(число1; ...), де число1 – це перше число, посилання на комірку або діапазон, для якого потрібно обчислити середнє значення. При цьому слід враховувати, що функція AVERAGE обчислює середнє значення, тобто центр набору чисел у статистичному розподілі. Існує три найпоширеніші способи визначення середнього значення:

1. Середнє арифметичне – обчислюється шляхом додавання набору чисел з наступним розподілом отриманої суми на їх кількість.

2. Медіана – число, яке є серединою множини чисел, тобто половина чисел мають значення більші, ніж медіана, а половина чисел мають значення менші, ніж медіана.

3. Мода – число, що найчастіше зустрічається в даному наборі чисел.

При симетричному розподілі множини чисел ці величини оцінки ступеня централізації рівні. При асиметричному розподілі множини чисел вони можуть відрізнитися, що необхідно враховувати при розрахунках.

Коефіцієнт варіації, як відомо, виражає ступінь коливання досліджуваного параметра і визначається співвідношенням середньоквадратичного відхилення ( $S$ ) до середньої величини значення параметра ( $\bar{X}$ ), тобто розраховується за виразом:

$$V = \frac{S}{\bar{X}}, \quad (5)$$

де  $S$  – стандартне (середньоквадратичне) відхилення;  $\bar{X}$  – середнє арифметичне.

Для загального випадку прийнято, якщо значення коефіцієнта варіації менше 33 %, то сукупність вважається однорідною, а якщо більше 33 %, то неоднорідною. На практиці, при визначенні стабільності дугового процесу порівнянням між собою коефіцієнтів варіації за струмом і напругою, стабільнішим буде той процес, для якого ці коефіцієнти менші. Коефіцієнт варіації зазвичай виражається у відсотках.

Окрім того, часто при статистичному аналізі даних доцільно побудувати гістограму розподілу певного параметра, яка дозволяє візуально оцінити величину і характер розкиду даних. У програмі Excel гістограма розподілу – це стовпчикова діаграма, кожний стовпчик якої є інтервалом значень

(кишенею), а висота стовпчика пропорційна кількості значень у ній (частоті спостережень). Для побудови гістограми розподілу в Excel у наборі да-

них повинно бути щонайменше 50 значень. Сама гістограма створюється за допомогою надбудови «Пакет аналізу».

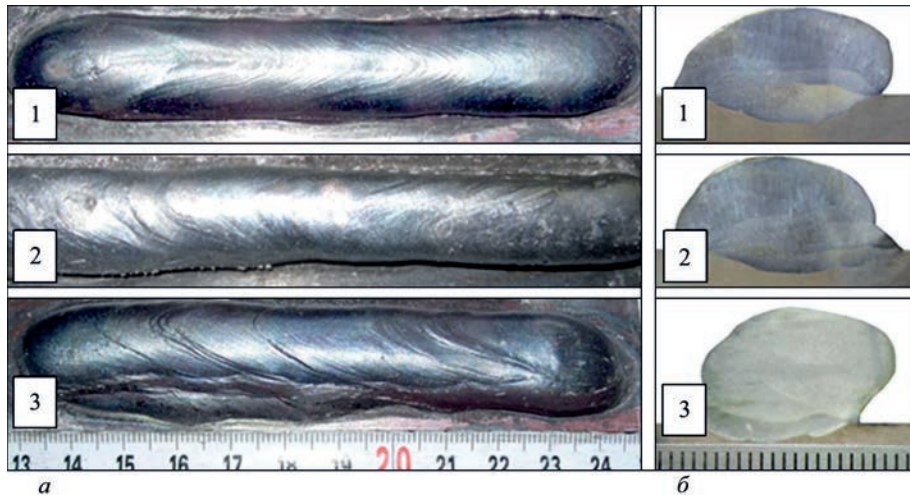


Рис. 1. Зовнішній вигляд (а) і поперечні макрошліфи (б) зразків, наплавлених у п'ять шарів дротами №№ 1–3. Позначення дротів згідно з табл. 2

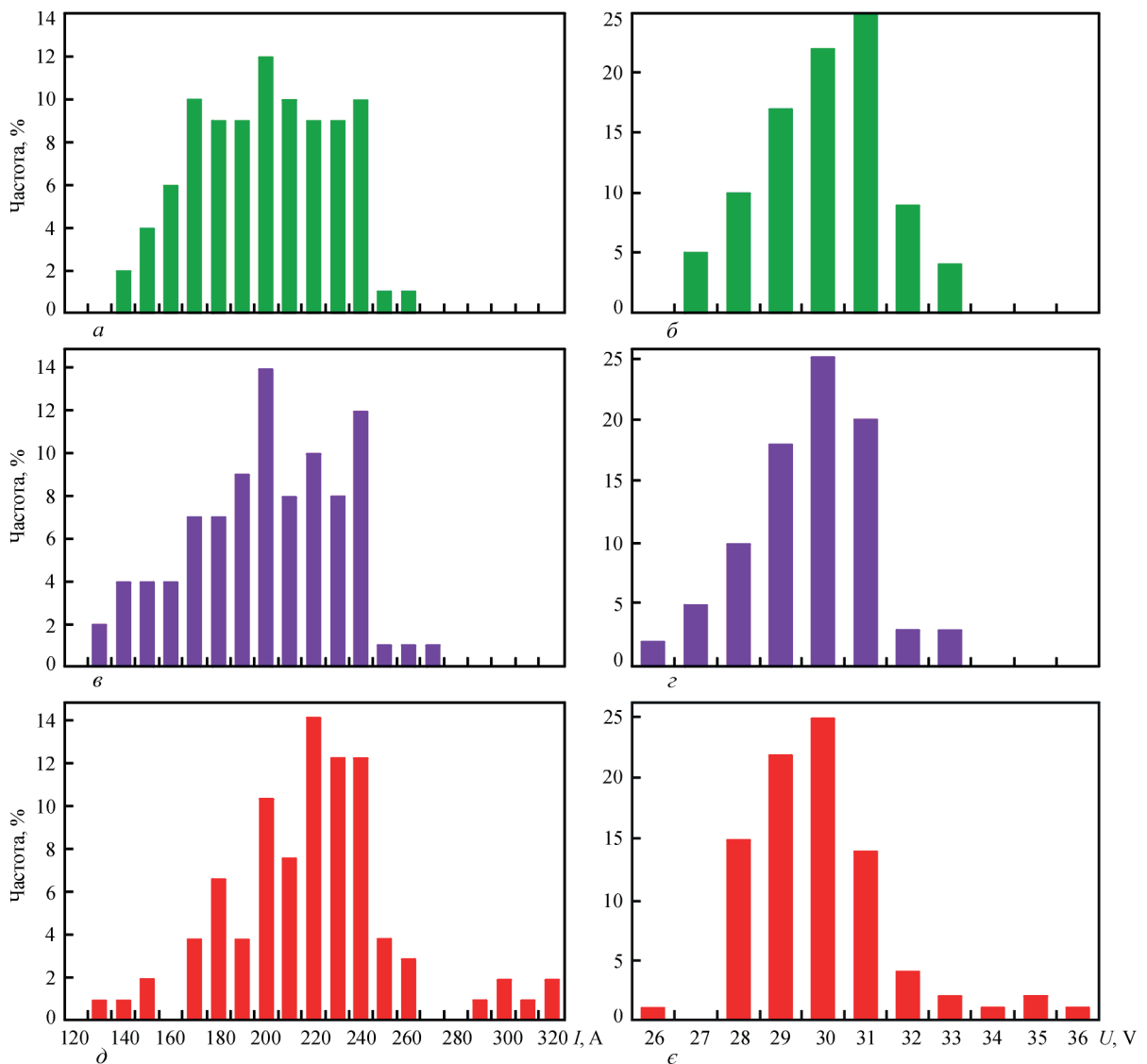


Рис. 2. Гістограми розподілу струму (а, в, д) та напруги (б, з, е) при напавленні дротами: № 1 (а, б), № 2 (в, з), № 3 (д, е). Позначення дротів згідно з табл. 2

**Таблиця 2. Порівняльна оцінка зварювально-технологічних властивостей дослідних дротів і стабільності процесу дугового наплавлення дослідними дротами**

№ з/п	Склад осердя порошкового дроту, розмір фракції	Характер збудження дуги	Якість формування наплавленого металу	Наявність дефектів	Відповідність хімічного складу наплавленого металу	Якість відокремлення шлакової кірки	Сумарна кількість балів	Коефіцієнти, %				
								розплавлення	наплавлення	втрат	варіації за струмом	варіації за напругою
1	Порошок ПГ-Р6М5, 50...300 мкм	2	2	2	2	1	9	17,1	16,8	1,75	14,12	4,73
2	Порошок ПГ-Р6М5, 200...250 мкм	2	1	2	2	1	8	16,2	15,8	2,47	14,71	4,99
3	Суміш порошків феросплавів, 50...300 мкм	2	1	2	2	1	8	13,6	12,6	7,35	16,18	6,08

Для прикладу в даній роботі наведено оцінку зварювально-технологічних властивостей дослідних порошкових дротів, яку виконували за розробленою методикою. Порівнювали властивості порошкових дротів з різним гранулометричним складом матеріалу осердя, в якості якого в дослідних дротах використовували гранульований металевий порошок ПГ-Р6М5 двох різних фракцій (табл. 2). В якості еталону використовували порошковий дріт з осердям із суміші феросплавних та інших компонентів, вміст яких було розраховано таким чином, щоби забезпечити отримання наплавленого металу одного хімічного складу. Зразки отримували методом дугового наплавлення під шаром флюсу АН-26П. Режими наплавлення і термообробки всіх зразків були однаковими, зразки наплавляли в п'ять шарів. Детальніше про ідею досліджень викладено в [18].

Результати оцінки зварювально-технологічних властивостей дослідних порошкових дротів наведені в табл. 2. Зовнішній вигляд наплавлених зразків наведено на рис. 1, гістограми розподілу поточних значень величин струму та напруги на дузі – на рис. 2.

Як видно з отриманих даних, оцінка зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів, які мають близькі характеристики, тільки за якісними показниками згідно з методикою [17], без урахування даних по продуктивності та стабільності процесу, дає практично однакові результати (див. сумарну кількість балів у табл. 2).

Проведення комплексного аналізу за розробленою методикою із урахуванням коефіцієнтів розплавлення, наплавлення, втрат, а також коефіцієнтів варіації за напругою та струмом і гістограмами їх розподілу, дозволило визначити підвищення продуктивності та стабільності при наплавленні дослідними порошковими дротами (№№ 1, 2) на 15...30 % у порівнянні з дротом-еталоном (№ 3).

### Висновки

1. Розроблено комплексну методику порівняльної оцінки зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів для дугового наплавлення, засновану на визначенні якості формування наплавленого металу, параметрів продуктивності та стабільності процесу.

2. Використання запропонованої методики дозволяє комплексно оцінити вказані властивості порошкових електродних дротів за допомогою кількісних показників, не використовуючи при цьому складних і коштовних програмно-апаратних комплексів.

3. Підтверджено, що тип і гранулометричний склад металевих компонентів осердя порошкових дротів при електродуговому наплавленні впливають на параметри та стабільність процесу, зокрема використання замість традиційних феросплавів металевих гранульованих порошків високої хімічної чистоти та однорідності за фізичними властивостями, наприклад, типу Р6М5, сприяє покращенню зварювально-технологічних властивостей порошкових електродних дротів.

### Список літератури/References

- Ryabtsev, I., Fomichov, S., Kuznetsov, V. et al. (2023) *Surfacing and Additive Technologies in Welded Fabrication*. Switzerland, Springer Nature AG. ISBN 978-3-031-34390-2. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-34390-2>
- Pokhodnya, I.K., Shlepakov, V.N., Maksimov, S.Yu., Ryabtsev, I.A. (2010) Research and developments of the E.O. Paton Electric Welding Institute in the field of electric arc welding and surfacing using flux-cored wire (Review). *The Paton Welding J.*, **12**, 26–33.
- Походня И.К., Суптель А.М., Шлепаков В.Н. (1972) *Сварка порошковой проволокой*. Киев, Наукова думка. Pokhodnya, I.K., Suptel, A.M., Shlepakov, V.N. (1972) *Welding with flux-cored wire*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- Походня И.К., Горпенюк В.Н., Миличенко С.С. и др. (1990) *Металлургия дуговой сварки: процессы в дуге и плавление электродов*. Киев, Наукова думка. Pokhodnya, I.K., Gorpenyuk, V.N., Milichenko, S.S. et al. (1990) *Metallurgy of arc welding: Processes in the arc and melting of electrodes*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- Golovko, V., Kotelchuk, O., Naumeiko, S., Golyakevich, A.A. (2022). Development of self-shielded flux-cored wires

- for arc welding of low-alloy steels. *Defect and Diffusion Forum*, **416**, 103–114. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-58v9g5>
6. Shlepakov, V.N. (2014) Physical-metallurgical and welding-technological properties of gas-shielded flux-cored wires for welding of structural steels. *The Paton Welding J.*, **6-7**, 53–56. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.10>
  7. Kostin, O.M., Yaros, O.O., Yaros, Y.O., Savenko, O.V. (2021) UPE-500 complex for determining welding and technological characteristics of coated electrodes. *The Paton Welding J.*, **8**, 33–37. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.08.07>
  8. Pawlik, J., Bembenek, M., Goral, T. et al. (2023) On the influence of heat input on Ni-WC GMAW hardfaced coating properties. *Materials*, **16(11)**, 3960. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16113960>
  9. Beczkowski, R., Gucwa, M. (2017) Cladding hardfacing layers used to protect the surface against abrasive wear. In: *Proc. 26<sup>th</sup> International Conference on Metallurgy and Materials*, Brno, Czech Republic, May 24–26, 1188–1193.
  10. Kakhov's'kyi, M.Y. (2016) Influence of aqueous media on the gas saturation of weld metal in the course of underwater welding of 12KH18N10T steel. *Materials Science*, **51**, 843–846. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9911-7>
  11. Zhang, M., Wang, Y., Zhang, W.-H. et al. (2018) Development of gas shielded flux cored wire for 1Cr12Ni2W1MoV stainless steel and properties of welded joint. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, **39(11)**, 129–136. DOI: <https://doi.org/10.13289/j.issn.1009-6264.2018-0215>
  12. Lankin, Yu.N. (2011) Indicators of stability of the GMAW process. *The Paton Welding J.*, **1**, 6–13.
  13. Shlepakov, V.N., Kotelchuk, A.S., Gavrilyuk, Yu.A. (2017) Modern flux-cored wires for welding of low-alloy steels of increased and high strength. *The Paton Welding J.*, **11**, 8–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.11.01>
  14. Majdanchuk, T.B., Skorina, N.V. (2014) Improvement of adaptability to fabrication and welding properties of electrodes for tin bronze welding and surfacing. *The Paton Welding J.*, **6-7**, 172–176. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.37>
  15. Zhudra, A.P., Krivchikov, S.Yu., Dzykovich, V.I. (2014) Application of complex-alloyed powders produced by thermocentrifugal sputtering in flux-cored wires. *The Paton Welding J.*, **12**, 36–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.12.08>
  16. Voronchuk, A.P., Zhudra, A.P., Petrov, A.V., Kochura, V.O. (2019) Influence of modes of flux-cored strip surfacing on their welding-technological properties. *The Paton Welding J.*, **1**, 33–37. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.01.07>
  17. Ryabtsev, I.O., Babinets, A.A., Lentyugov, I.P. (2023) Welding-technological properties of flux-cored wire with boron-containing binder in the charge. *The Paton Welding J.*, **9**, 17–20. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.09.03>
  18. Ryabtsev, I.O., Babinets, A.A., Lentyugov, I.P. et al. (2024) Welding and technological properties of flux-cored wire with the charge in the form of granulated powder. *The Paton Welding J.*, **7**, 17–21. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.07.03>
  19. Mackenzie, J.G., Allen, M. (1998) Mathematical power tools: Maple, Mathematica, Matlab and Excel. *Chemical Engineering Education*, **32(2)**, 156–160.

## METHODOLOGY FOR EVALUATING THE WELDING AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF FLUX-CORED WIRES FOR ARC SURFACING

A.A. Babinets, I.O. Ryabtsev, I.P. Lentyugov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: a\_babinets@ukr.net

An analysis of existing methods for evaluating the welding and technological properties of electrode materials used in electric arc surfacing and welding has been conducted. The fundamental principles for assessing the stability of the arc process have been reviewed. The key approaches to studying the properties of electrode materials and the list of controlled parameters most frequently used for this purpose have been determined. It has been demonstrated that quantitative evaluation criteria are more advantageous compared to qualitative ones. Based on the analysis, a comprehensive methodology for evaluating the welding and technological properties of flux-cored wires has been developed, comprising three main components. The first component includes a visual expert assessment of the arc surfacing process and the quality of the deposited metal formation, performed using a differential scoring system. The second component focuses on evaluating the melting characteristics of flux-cored electrode wires based on experimentally determined melting rates, deposition rates, and material loss coefficients. The third component involves assessing the stability of the arc process, which is conducted using experimentally determined coefficients of variation for current and voltage fluctuations on the arc. The advantages of the proposed comprehensive methodology have been demonstrated through the evaluation of real flux-cored wires for arc surfacing. It has been established that this methodology provides more informative results compared to approaches relying solely on qualitative indicators. The study confirmed that the type and particle size distribution of metallic components in the core of flux-cored wires significantly influence the stability of the arc surfacing process. The use of chemically more pure and more homogeneous metallic granular powders in the flux-cored wire core, compared to ferroalloy powders, improves the stability and efficiency of the surfacing process by 15–30%. 19 Ref., 2 Tabl., 2 Fig.

*Keywords:* arc surfacing, flux-cored wire, deposited metal, welding and technological properties, surfacing stability, coefficients of variation

Отримано 24.01.2025

Отримано у переглянутому вигляді 26.02.2025

Прийнято 03.04.2025

27–29  
травня  
2025



XXIII МІЖНАРОДНИЙ  
ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ

Місце проведення: Україна, м. Київ, МВЦ, Броварський пр-т, 15