

УДК 621.791.927

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.1\(503\).1.7](https://doi.org/10.15589/znп2026.1(503).1.7)**METHOD OF SELECTING PARAMETERS OF THE ELECTRIC ARC PROCESS
WITH PULSE FEED OF ELECTRODE WIRE****МЕТОДИКА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ПРОЦЕСУ
З ІМПУЛЬСНОЮ ПОДАЧЕЮ ЕЛЕКТРОДНОГО ДРОТУ****Volodymyr A. Lebedev**

valpaton@ukr.net

ORCID: 0000-0003-0391-6113

V. V. Spiharenko

vladimir.kherson11@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6328-9791

S. A. Loi

loys@ukr.net

ORCID: 0000-0002-1936-6390

В. О. Лебедєв,

докт. техн. наук, професор

В. В. Спіхтаренко,

доцент

С. А. Лой,

доцент, старший викладач

*Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National Shipbuilding University, Kherson**Херсонський навчально-науковий інститут**Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон*

Abstract. Purpose. Automatic and mechanized welding using a consumable electrode wire is widely applied in various sectors of human economic activity with different tasks and operating conditions. This creates a need for the continuous improvement of the technical characteristics of equipment used in this technology and for increasing its efficiency. The improvement of the efficiency of equipment and technologies is based on a wide range of research studies. This is particularly relevant for welding and surfacing processes with controlled pulsed feeding of the electrode wire. In this method of arc process control, additional factors influence the process; therefore, hardware-based and mathematical research methods become significantly more complex and require considerable time and material resources. The objective of this work is to identify possibilities for simplifying research procedures aimed at determining the final results of welding and surfacing with pulsed electrode wire feeding.

Method. The studies presented in this work concern pulsed algorithms influencing welding equipment systems, primarily the pulsed motion of the electrode wire into the arc burning zone. Mechanisms for pulsed feeding of the electrode wire with an adjustable valve electric drive were used. In these studies, both full-scale experiments based on specially developed experimental plans and mathematical methods for processing the obtained data were applied, followed by the construction of regression models and contour plots that visualize the research results.

Results. Based on the analysis of the process of constructing a regression mathematical model, a new approach to its analysis has been determined, the basis of which is the reduction in the number of experiments. A new decomposition-based factorial space of full factorial experiments is proposed for studying the influence of energy parameters (current and voltage of the arc process) and parameters of pulsed electrode wire feeding (frequency and duty cycle of the pulsed motion) on the results of welding and surfacing.

Scientific novelty. A scientific solution has been achieved in the possibility of new principles for constructing a mathematical model of the technological welding process with multiple input and output parameters, with a reduction in the number of experimental data through the elimination of a number of factorial experiments.

Practical importance. The reduction in the amount of obtained data required for constructing a mathematical description based on statistical regression models is of particular importance in the study of new processes, especially in welding and surfacing with pulsed algorithms of equipment system operation. This reduction does not affect the quality of the research results but significantly affects the duration of research work, the consumption of active materials, the materials of test samples, and their instrumental examination. The proposed method may be useful for predicting the results of research studies.

Key words: mechanized welding; surfacing; pulsed feed; electrode wire; surfacing layer; mathematical model.

Анотація. Мета. Автоматичне та механізоване зварювання з використанням електродного дроту який плавиться має дуже широке використання в різних галузях господарської діяльності людини з різними завданнями та умовами. Завдяки цьому виникає проблема постійного покращення технічних характеристик обладнання для цієї технології та підвищення його ефективності. Підвищення ефективності обладнання та технологій базується на цілому ряді досліджень. Особливо це стосується зварювання та наплавлення з керованою імпульсною подачею електродного дроту. При цьому методі ведення дугових процесів на нього діють додаткові чинники і тому апаратні та математичні методи досліджень стають значно складнішими і займають досить багато часу і матеріальних ресурсів. Метою роботи є пошук можливостей для спрощення ведення дослідницьких робіт по визначенню кінцевих результатів зварювання та наплавлення з імпульсною подачею електродного дроту

Методика. Дослідження, викладені в цій роботі стосуються імпульсних алгоритмів впливу систем зварювального обладнання а насамперед імпульсного руху електродного дроту в зону горіння дуги використовувались механізми імпульсної подачі електродного дроту з регульованим вентильним електроприводом. В цих дослідженнях застосовано як натуральні експерименти на основі спеціально розроблених планів так і математичні методи обробки отриманих даних з подальшою побудовою регресійних моделей та контурних графіків які візуалізують результати досліджень

Результати. На основі аналізу процесу побудови регресійної математичної моделі визначено новий підхід до її аналізу основою якого є скорочення числа експериментів. Запропоновано новий декомпозиційний факторний простір повних факторних експериментів для вивчення впливу енергетичних параметрів (струм та напруга дугового процесу) та параметрів імпульсної подачі електродного дроту (частота та шпаруватість імпульсного руху) на результати зварювання та наплавлення

Наукова новизна. Досягнуто наукове рішення в можливості нових принципів побудови математичної моделі технологічного процесу зварювання з декількома вхідними та вихідними параметрами з скороченням числа експериментальних даних за рахунок вимкнення ряду факторних експериментів

Практична значимість. Скорочення числа отриманих даних для побудови математичного опису на основі статистичних регресійних моделей має певне значення при вивченні нових процесів зокрема в зварюванні та наплавленні з імпульсними алгоритмами функціонування систем обладнання. Це скорочення не впливає на якість результатів дослідження, але суттєво впливає на час дослідної роботи, витрати на активні матеріали, матеріали зразків а також їх приладне дослідження. Вказаний метод може бути корисним для прогнозування результатів досліджень.

Ключові слова: механізоване зварювання; наплавлення; імпульсна подача; електродний дріт; наплавлений шар; математична модель.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Електродугове зварювання та наплавлення з використанням імпульсної подачі електродного дроту це одне з напрямків ефективного впливу на майже всі характеристики зварювання та наплавлення [1; 2].

Такий процес при раціонально підібраних параметрах дозволяє:

- керувати процесом перенесення крапель електродного металу;
- знизити втрати електродного металу на випаровування та розбризкування;
- змінювати геометричні розміри зварного шва та наплавленого валика;
- знизити загальні втрати енергії;
- покращити санітарно – гігієнічні характеристики процесу;
- впливати на якість металу зварного шва та наплавленого шару;
- впливати на процес зварювання та наплавлення в положеннях відмінних від нижнього.

Оцінка впливу технології зварювання (наплавлення) на вищевказані можливості може бути проведена по результатах експериментальних досліджень на основі яких можна побудувати математичний опис та визначити

залежності вихідних параметрів процесу від параметрів горіння дуги та імпульсного руху електродного дроту. Експериментальні дослідження зазвичай виконуються на основі розробленого плану на базі якого базується математична модель, рівняння, графіки, поверхні відгуку та інше для візуалізації та аналізу результату.

Певне значення результату зварювання яке потрібно знайти позначимо літерою Z . Тоді пошук математичної моделі визначається наступним виразом [3].

$$Z = \psi(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

де $x_1, x_2, \dots, x_n$ – фактори, які впливають на результат Z електродугового зварювання з імпульсною подачею електродного дроту. Цих факторів може бути достатньо велика кількість, але серед них треба вибирати найбільш вагомі.

На параметр Z , який треба визначити, впливають наступні силові параметри (сила струму I , напруга дуги U), параметри імпульсної подачі (частота f , шпаруватість S), додаткові фактори (витрати захисного газу, виліт електродного дроту, швидкість зварювання) та інші. На протязі дослідження припускаємо що змінюється сила струму I , напруга дуги U , та параметри імпульсної подачі (частота f , шпаруватість S). Решта факторів залишаються незмінними.

При зварюванні та наплавленні в CO_2 з імпульсною подачею електродного дроту важливими є наступні результати:

- h – опуклість валика наплавленого металу, мм;
- b – ширина валика наплавленого металу, мм;
- p – глибина проплавлення, мм;
- α – кут сплавлення, град.;
- ψ – коефіцієнт втрат електродного металу, %;
- W – витрати електроенергії, кВт·год.

Результати, які отримуються при зварюванні з імпульсним рухом електродного дроту і зазначені вище при встановлених параметрах впливу, можуть бути визначені в загальному вигляді як функція відгуку рівнянням

$$h, b, p, \alpha, \psi, W = \varphi(U, I, f, S) \quad (2)$$

Треба зазначити, що струм та напруга впливають на геометричні характеристики практично по лінійній залежності. Втрати електродного металу залежать від струму нелінійно. Вплив характеристик імпульсного руху на всі складові процесів зварювання та наплавлення постійно вивчається зважаючи в тому числі на багато типів електродних дротів, включаючи порошкові самозахисні дроти, різні види матеріалів які зварюються та інше.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для більш широкого вивчення впливу частоти та шпаруватості імпульсної подачі електродного дроту на результати електродугового зварювання зазвичай використовують повні факторні експерименти [3]. Це дає можливість отримати математичний опис результатів дослідження, який в ряді випадків задовольняє умовам пошуку відгуків, але має певні недоліки.

З рівняння функції відгуку (2) яке описує функцію відгуку, тобто пов'язує вхідні (задані) та вихідні параметри процесу випливає, що об'єкти досліджень залежать від чотирьох чинників, отже, поверхня відгуку перебуває у чотиривимірному факторному просторі. По-перше, його не можна відобразити наочно, а лише за допомогою алгебраїчних рівнянь. По-друге, повний факторний експеримент, який необхідно застосувати в даному випадку, для чотирьох змінних потребує проведення як мінімум $3^4 = 81$ експериментів, а це дуже великий об'єм роботи з застосуванням зразків, зварювальних та захисних матеріалів, виготовлення шліфів, їх аналізу. Витрачається дуже велика кількість робочого часу.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Запропоновано для поліпшення умов експериментальних досліджень шляхом суттєвого скорочення об'єму робіт застосувати новий підхід до визначення залежності між параметрами керування імпульсного руху електродного дроту та енергетичними характеристиками процесу зварювання з імпульсною подачею електродного дроту [4].

Сутність нового підходу організації досліджень та фіксації їх результатів полягає в декомпозиції

факторного простору за силою зварювального струму та напруги а також частотою та шпаруватістю подачі електродного дроту.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для даного типу досліджень відсутні попередні дані про вид залежності між факторами та відгуком (лінійна, квадратична та інші). Для вивчення відгуку в таких випадках ефективно застосовувати поліном другого порядку. Такий поліном може бути досліджено на екстремум, що дуже важливо для визначення максимальних та мінімальних значень відгуків. Для цього число дослідів N повинно бути не менше кількості визначених коефіцієнтів у рівнянні регресії другого порядку для числа факторів k . Тому, як план експерименту для вивчення енергетичних характеристик дугового процесу та параметрів руху електродного дроту був обраний композиційний план повного факторного експерименту. Композиційний план складається з повно факторними експериментами $2k$ ($k \leq 5$), до яких потрібно додати експеримент у центрі плану та в $2k$ зіркових точках, розташованих на осях фіктивного простору, координати яких: $(\pm\alpha, 0, \dots, 0)$, $(0, \pm\alpha, 0, \dots, 0)$, $\dots$, $(0, \dots, 0, \pm\alpha)$ «зіркового плеча». Це представлено на рис. 1

Загальна кількість дослідів розраховується за формулою:

$$N_0 = 2^k + n_0 \quad (3)$$

де N_0 – кількість дослідів повного факторного експерименту, $2k$ кількість дослідів у центрі плану, k – число факторів, n_0 – кількість опытов в центре плана

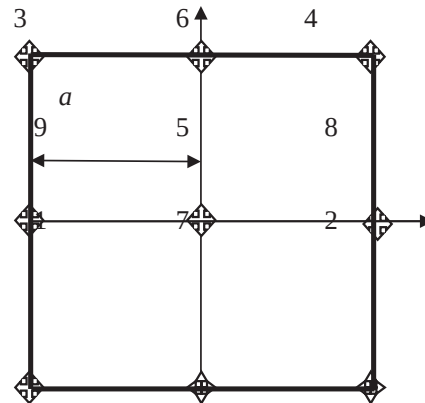


Рис. 1. Композиційний ортогональний план другого порядку точки 1–4 утворюють повний факторний експеримент 2^2 , точка 5 – центр плану, точки 6–9 – «зіркові» точки з координатами

Композиційні плани експериментів ведуть до ортогонального вибору зіркового плеча a . Довжину «зіркового плеча» можна визначити за виразом (4):

$$a = \sqrt{\frac{\sqrt{N_0 N} - N_0}{2}} \quad (4)$$

Величина «зіркового плеча» залежить від кількості повних повторень експериментів у центрі плану.

Композиційний ортогональний план повного факторного експерименту, представлений на рисунку 1, застосовувався для декомпозиційного факторного простору щодо впливу енергетичних параметрів і параметрів імпульсної подачі електродного дроту на відповідні відгуки. Цей план представлений на рис. 2.

Декомпозиційний підхід дозволяє за рахунок апріорного скорочення кількості досліджуваних параметрів (факторів) скоротити обсяг експериментальних досліджень.

Для реалізації цієї методики на першому етапі було досліджено вплив енергетичних параметрів при постійній подачі електродного дроту на відгук $Y(h, b, w, p, \alpha, \psi, W)$

$$h, b, p, \alpha, \psi, W = \varphi(U, I) \quad (5)$$

Далі, на дослідженому просторі I, U , виділяються характерні 5 точок А, В, С, D, Е з конкретною силою струму та напругою (точка Е – центр плану, точки А, В, С, D – зіркові точки з координатами $(\pm\alpha, 0)$ та $(0, \pm\alpha)$). Вибраних точок достатньо для побудови лінійної поверхні відгуку впливу параметрів імпульсної подачі електродного дроту на всьому досліджуваному просторі I, U (рис. 1): (рис. 2).

$$h, b, p, \alpha, \psi, W = \varphi(f, S) \quad (6)$$

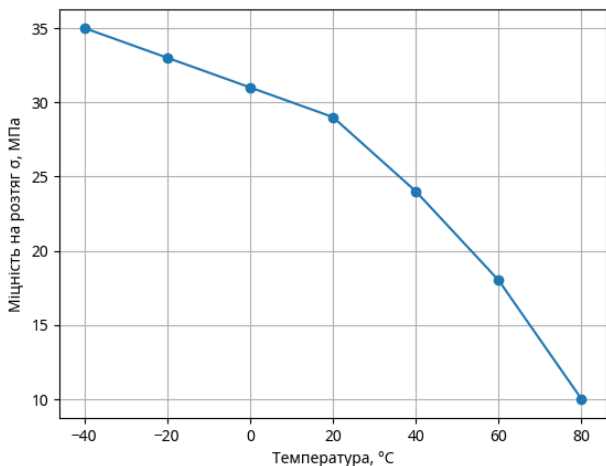


Рис. 2. Декомпозиційний факторний простір повних факторних експериментів для вивчення впливу енергетичних параметрів та параметрів імпульсної подачі електродного дроту

Композиційний ортогональний план повного факторного експерименту, представлений на рис. 1 застосовувався для декомпозиційного факторного простору щодо впливу енергетичних параметрів і параметрів імпульсної подачі електродного дроту на відповідні відгуки. Цей план с визначенням одного з параметрів зварного шва представлений на рис. 3.

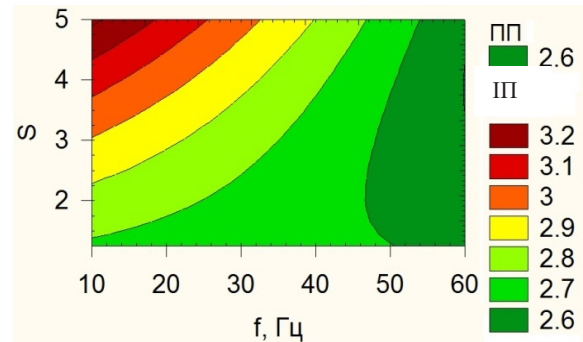


Рис. 3. Контурний графік зміни висоти шва від частоти та шпаруватості імпульсів подачі електродного дроту: ПП – постійна подача; ІП – імпульсна подача

Такий запропонований підхід дозволяє зменшити кількість експериментів, і представити результати у вигляді поверхонь відгуку або контурних графіків, які дуже наочно ілюструють зміну відгуку від факторів і зручні у використанні. Вибір характерних точок дає можливість не тільки досліджувати вплив імпульсної подачі електродного дроту у цих точках, але також, у будь-якій іншій точці простору I, U , за допомогою отриманих даних, засобами інтерполяції або екстраполяції.

На рис. 3 представлений варіант результату досліджень проведений з використанням декомпозиції факторного простору.

ВИСНОВКИ

1 Розроблена методика дослідження процесу дугового зварювання з імпульсною подачею електродного дроту.

2 Використання методики дозволяє за рахунок декомпозиції чотиривимірного факторного простору на два двомірні скоротити кількість експериментів і дати можливість представити отримані результати у вигляді контурних графіків.

REFERENCES

- [1] Lebedev V., Labartkava A., Loy S., Zhuk G. (2021). Operational Characteristics of the Welding Joint and the Overlay at the Mechanized Arc Welding-Overlay with Pulse of the Electrode Wire Supply. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, vol. 15, no. 3, R. 19-26. http://science.org.ge/bnas/t15-n3/03_Lebedev_Mechanics.pdf
- [2] Lebedev V.O., Loy S.A., Yermolayev H.V., & Spikhtarenko V.V. (2023) Vplyv impul'snoyi podachi elektrodnoho droutu na vmist lehuyuchykh ele-mentiv ta deyakі mekhanichni kharakterystyky naplavlenykh shariv metalu [The influence of pulsed electrode wire feeding on the content of alloying elements and some mechanical characteristics of deposited metal layers]. *Zbirnyk naukovykh prats' NUK*. № 4. [https://doi.org/10.15589/znp2023.4\(493\).4](https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).4) [in Ukrainian].
- [3] Nechayev V., Beridze T., & Kononenko V. (2005) *Teoriya planuvannya eksperymentu* [Theory of experimental design]. K.: Kondor [in Ukrainian].

- [4] Motyhin V.V., & Pavlov S.M. (2001) Planuvannya eksperymentu v inzhenernykh doslidzhennyakh Navchal'nyy posibnyk [Experimental design in engineering research]. Vinnytsya: VDTU [in Ukrainian].
- [5] Vynarsky M. S., & Lurine M.V. (1975) Planuvannya eksperymentu v tekhnolohichnykh dosli-dzhennyakh [Experimental planning in technological research]. Kyiv: Tekhnika [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Lebedev V., Labartkava A., Loy S., Zhuk G. (2021). Operational Characteristics of the Welding Joint and the Overlay at the Mechanized Arc Welding-Overlay with Pulse of the Electrode Wire Supply. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, vol. 15, no. 3, R. 19-26. http://science.org.ge/bnas/t15-n3/03_Lebedev_Mechanics.pdf
- [2] Лебедєв В.О., Лой С.А., Єрмолаєв Г.В., Спіхтаренко В.В. (2023). Вплив імпульсної подачі електродного дроту на вміст легуючих елементів та деякі механічні характеристики наплавлених шарів металу. *Збірник наукових праць НУК*. № 4, С. 28–32 DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2023.4\(493\).4](https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).4)
- [3] Теорія планування експерименту / В. Нечаєв, Т. Берідзе, В. Кононенко – К.: Кондор, 2005. 232 с.
- [4] Мотигін В.В., Павлов С.М. Планування експерименту в інженерних дослідженнях Навчальний посібник. Вінниця : ВДТУ, 2001, 82 с.
- [5] Винарский М.С., Луріне М.В. (1975). Планування експерименту в технологічних дослідженнях. Київ : Техніка, 158 с.

© Лебедєв В. О., Спіхтаренко В. В., Лой С. А.

Дата першого надходження статті до видання: 10.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)