

Самчук Л.М.^[0000-0003-2516-045X], Карпусь С.Г.^[0000-0002-1087-9245], Гулієва Н.М.^[0000-0001-9282-4880],
Сичук В.А.^[0000-0002-8267-0846]

Луцький національний технічний університет

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИЗОВАНОГО ЗВАРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ З УРАХУВАННЯМ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

У статті розглянуто оцінювання ефективності роботизованого зварювального комплексу з урахуванням стабілізації теплофізичних параметрів технологічного процесу. Обґрунтовано, що ефективність роботизації зварювання доцільно визначати не лише за продуктивністю, трудомісткістю та терміном окупності, а й через стабільність струму, напруги, швидкості переміщення пальника, дугової енергії та лінійного тепловкладення. Запропоновано розрахункову схему, яка пов'язує стабілізацію траєкторії інструмента з умовами формування зварювальної ванни, геометрією шва, рівнем браку та виробничою результативністю. Для однієї стандартної зварювальної операції показано, що скорочення часу основного зварювання з 5 до 3 хв за незмінних значень струму 150 А і напруги 18 В збільшує швидкість переміщення пальника з 3,33 до 5,56 мм/с. За цих умов дугова енергія на одиницю довжини зменшується з 0,810 до 0,486 кДж/мм, тобто на 40,0%. Це підтверджує необхідність узгодженого керування струмом, напругою та швидкістю для стабілізації теплофізичних умов роботизованому процесі. Встановлено, що роботизація зменшує середнє відхилення геометрії шва з 2,5 до 0,8 мм, стандартне відхилення – з 1,2 до 0,3 мм, а ймовірність дефекту – з 0,10 до 0,03. За тривалості стандартної операції 10 хв продуктивність ручного зварювання становить 48 шт. за 8-годинну зміну, тоді як за роботизованої операції тривалістю 6 хв – 80 шт./зміну. Випуск придатної продукції з урахуванням зниження браку зростає з 43,2 до 77,6 шт./зміну, тобто на 79,6%. Отримані результати показують, що виробничий та економічний ефект роботизації формується через поєднання скорочення часу операції, стабілізації теплофізичних умов процесу та підвищення повторюваності якості зварного з'єднання.

Ключові слова: роботизоване зварювання, зварювальний комплекс, тепловкладення, дугова енергія, теплофізичні параметри, якість шва, продуктивність, рівень дефекту.

L. Samchuk, S. Karpus, N. Huliieva, V. Sychuk

EFFICIENCY ASSESSMENT OF A ROBOTIC WELDING SYSTEM CONSIDERING STABILIZATION OF THERMOPHYSICAL PARAMETERS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS

The article examines the evaluation of the efficiency of a robotic welding system with consideration of the stabilization of the thermophysical parameters of the technological process. It is substantiated that the efficiency of welding robotization should be determined not only by productivity, labor intensity, and payback period, but also by the stability of current, voltage, torch travel speed, arc energy, and linear heat input. A calculation framework is proposed that relates the stabilization of the tool trajectory to the conditions of weld pool formation, weld geometry, defect rate, and production performance. For a standard welding operation, it is shown that reducing the primary welding time from 5 to 3 minutes while maintaining constant values of current at 150 A and voltage at 18 V increases the torch travel speed from 3.33 to 5.56 mm/s. Under these conditions, the arc energy per unit length decreases from 0.810 to 0.486 kJ/mm, i.e., by 40.0%. This confirms the necessity of coordinated control of current, voltage, and speed in order to stabilize heat input in the robotic process. It was established that robotization reduces the average deviation of weld geometry from 2.5 to 0.8 mm, the standard deviation from 1.2 to 0.3 mm, and the probability of defects from 0.10 to 0.03. For a standard operation duration of 10 minutes, the productivity of manual welding amounts to 48 units per 8-hour shift, whereas a robotic operation with a duration of 6 minutes ensures 80 units per shift. Taking into account the reduction in defects, the output of acceptable products increases from 43.2 to 77.6 units per shift, i.e., by 79.6%. The obtained results demonstrate that the production and economic effect of robotization is achieved through the combination of reduced operation time, stabilization of the thermophysical conditions of the process, and improved repeatability of welded joint quality.

Keywords: robotic welding, welding system, heat input, arc energy, thermophysical parameters, weld quality, productivity, defect rate.

Постановка проблеми. Зварювання залишається одним із головних технологічних процесів у машинобудуванні, будівництві, транспортному виробництві та виготовленні металоконструкцій. Якість зварного з'єднання безпосередньо впливає на міцність, довговічність і надійність виробу, а відхилення режимів зварювання можуть спричиняти дефекти, додаткові витрати на виправлення браку та зниження продуктивності виробництва.

Ручне зварювання має високу гнучкість, однак його результат значною мірою залежить від кваліфікації, стабільності рухів і фізичного стану зварювальника. Через це складно забезпечити однакову швидкість переміщення пальника, стабільне положення відносно шва та повторюваність теплового впливу на метал. Унаслідок цього змінюються умови формування зварювальної ванни, проплавлення, геометрія шва та ймовірність появи дефектів.

Роботизовані зварювальні комплекси дають змогу зменшити вплив людського фактора, стабілізувати траєкторію руху інструменту, підтримувати задану швидкість зварювання та

забезпечувати повторюваність технологічних режимів. Особливого значення при цьому набуває контроль теплофізичних параметрів процесу, зокрема струму, напруги, швидкості переміщення пальника та лінійного теплового ефекту. Саме ці параметри визначають тепловий стан зони зварювання, умови формування шва, розміри зони термічного впливу та стабільність якості зварного з'єднання. Попри поширення роботизованого зварювання, його ефективність часто оцінюють переважно за економічними або виробничими показниками: продуктивністю, трудомісткістю, рівнем браку та терміном окупності. Водночас недостатньо враховується, що економічний ефект роботизації формується не лише через скорочення часу операцій, а й через стабілізацію теплофізичних умов процесу, зменшення діапазону параметрів шва та підвищення повторюваності якості. Тому актуальним є дослідження ефективності роботизованого зварювального комплексу з урахуванням стабілізації теплофізичних параметрів технологічного процесу. Такий підхід дає змогу пов'язати технічні параметри зварювання з якістю з'єднання, рівнем браку, продуктивністю та економічною доцільністю впровадження роботизованих технологічних систем.

Мета роботи – оцінити вплив упровадження роботизованого зварювального комплексу на стабільність теплофізичних параметрів процесу, якість формування зварного шва, продуктивність і техніко-економічну ефективність роботи зварювальної дільниці.

Задачі дослідження:

1. Сформулювати систему показників для оцінювання роботизованого зварювання, що поєднує теплофізичні, якісні, виробничі та економічні параметри.
2. Визначити лінійний тепловий процес для ручного та роботизованого зварювання.
3. Оцінити стабільність формування зварного шва за відхиленням геометричних параметрів, стандартним відхиленням і коефіцієнтом варіації.
4. Встановити вплив роботизації на продуктивність, тривалість циклу, рівень браку та завантаження обладнання.

Об'єкт дослідження – процес роботизованого дугового зварювання в умовах промислового зварювального комплексу.

Предмет дослідження – вплив стабілізації теплофізичних параметрів роботизованого зварювання, зокрема струму, напруги, швидкості переміщення та лінійного теплового процесу, на якість зварного з'єднання, рівень браку, продуктивність і техніко-економічну ефективність впровадження роботизованого комплексу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботі [1] запропонували алгоритм роботизованого weaving welding із підтриманням постійних теплових параметрів через адаптивне планування швидкості, однак робота зосереджена переважно на керуванні траєкторією і не поєднує теплову стабільність з економічною ефективністю процесу. У праці [2-3] систематизували сучасні напрями роботизованого зварювання, зокрема інспекцію, моделювання, моніторинг та автоматизацію, проте огляд має широкий характер і не формує цілісної методики кількісного оцінювання ефективності конкретної зварювальної комірки. У дослідженнях [4] розглянули оптимізацію параметрів автономного зварювання з використанням статистичних, сенсорних та AI-підходів, але основний акцент зроблено на якості й адаптивному керуванні, а не на зв'язку між тепловкладенням, браком і окупністю роботизованої системи. Автори публікації [5] показали складність правильного визначення gross heat input в дуговому зварюванні та вплив похибок калориметричних методів, що є важливим для обережного використання розрахункової формули теплового процесу у прикладних дослідженнях. У праці [6] узагальнили підходи до теплового й структурного моделювання дугового зварювання, включаючи температурні поля, деформації та залишкові напруження, однак ці моделі здебільшого не інтегровані з питаннями роботизованої реалізації процесу. Дослідження викладені в [7] довели доцільність теплового моніторингу задньої частини зварювальної ванни за допомогою двоколірної пірометрії, але запропонований підхід потребує спеціалізованого вимірювального обладнання та не завжди придатний для типової промислової комірки. Автори [8] запропонували прогнозування проплавлення інфрачервоним тепловим промінням, машинним зором і ANN-моделлю, що підтверджує перспективність тепловізійного контролю, однак така система потребує додаткової валідації для різних матеріалів і режимів зварювання. У праці [9] виконали систематичний огляд роботизованого зварювання в морських конструкціях і показали переваги автоматизації для якості, продуктивності та безпеки, але галузева специфіка обмежує застосування в широкій машинобудівній галузі виробництва. Автори праці [10] удосконалили методику розрахунку окупності промислових роботів, наголошуючи на потребі врахування ширшого набору витрат і заощаджень, однак їхній підхід не деталізує

технологічні причини формування економічного ефекту у зварюванні. У статті [11] порівняли ручне й автономне лінійне зварювання за точністю, якістю та тривалістю операцій, проте дослідження стосується специфічного типу мобільного зварювального робота і не охоплює повноцінну промислову роботизовану комірку. У результатах досліджень [12] запропонували smart manufacturing-підхід до оптимізації роботизованого зварювання з використанням CAD, машинного зору та reinforcement learning, але модель має переважно алгоритмічний характер і потребує обережного застосування для виробничих економічних оцінок. У праці [13] подали фундаментальний опис промислових роботів, їхніх застосувань, робочих комірок, інтеграції та програмування, однак це джерело є базовим робототехнічним розділом і не розкриває спеціальну теплофізику зварювального процесу. У працях [14–16] розглянуто проектування технологічного оснащення і цільових механізмів маніпулювання для виробничих систем, що дає розширені можливості для забезпечення нових потрібних характеристик функціонування допоміжної частини роботизованої зварювальної комірки, зокрема базування, фіксації, позиціонування та маніпулювання заготовками. У роботах [17, 18] запропоновано мехатронні пристрої затиску циліндричних об'єктів, що сприяє можливості розвитку механізмів для реалізації нових режимів фіксації та маніпулювання об'єктом зварювання.

Отже, наявні дослідження достатньо повно розкривають роботизоване зварювання, оптимізацію параметрів, теплове моделювання, моніторинг і розрахунок окупності, але ці напрями переважно розглядаються окремо. Недостатньо опрацьованим залишається комплексне оцінювання, у якому стабільність теплового ефекту роботизованого зварювального процесу безпосередньо пов'язується до якості шва, рівня дефекту, продуктивності та економічної доцільності впровадження роботизованого комплексу.

Методика дослідження. Дослідження виконували на основі порівняльного оцінювання ручного та роботизованого дугового зварювання за технічними, теплофізичними, якісними та економічними показниками. Як базовий сценарій розглядали традиційне ручне зварювання, а як модернізований метод – використання роботизованого зварювального комплексу, що забезпечує програмоване переміщення пальника, стабілізацію траєкторії та повторюваність технологічних режимів (рис. 1).

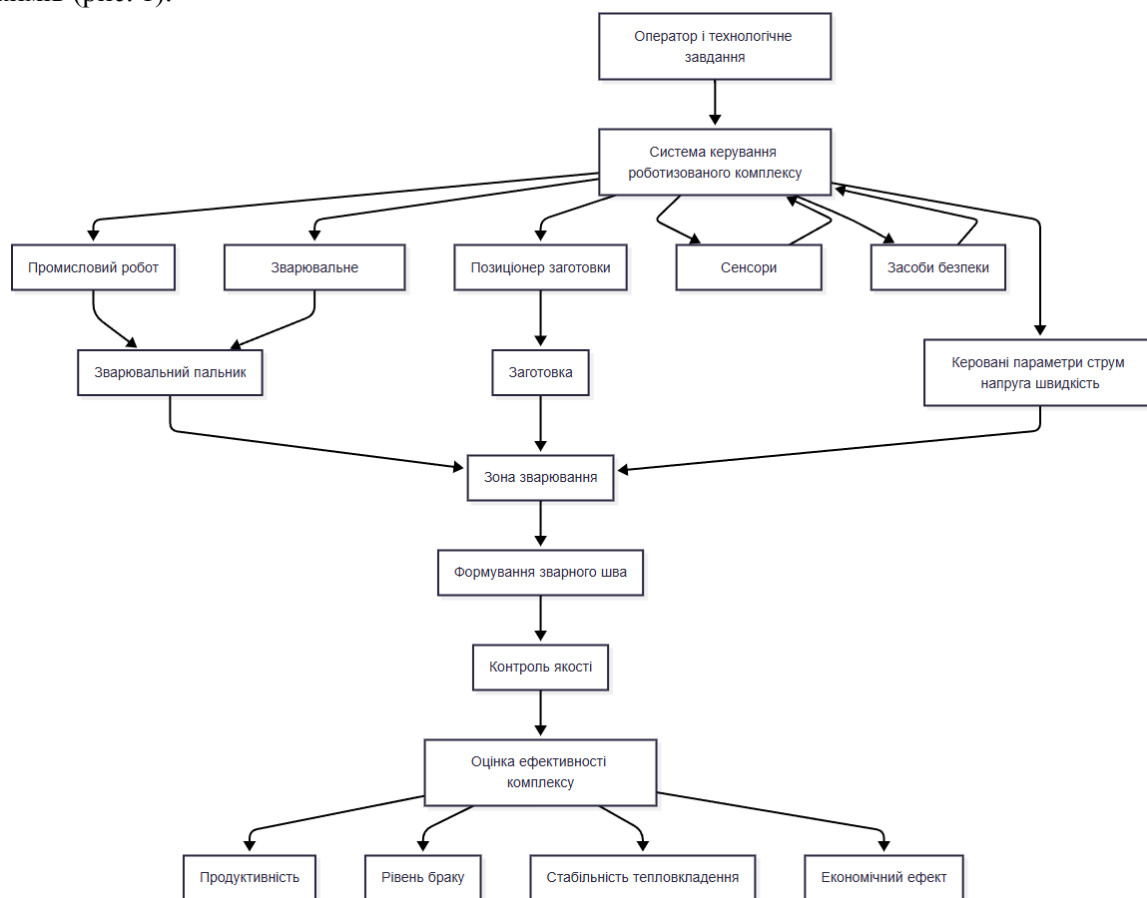


Рис. 1. Структура роботизованого зварювального комплексу як технологічної системи

Теплофізичний стан процесу оцінювали за розрахунковим показником лінійного теплового ефекту:

$$q_l = (\eta UI)/v, \quad (1)$$

де: q_l – лінійний тепловий ефект, Дж/мм; η – коефіцієнт ефективності теплопередачі; U – напруга дуги, В; I – зварювальний струм, А; v – швидкість зварювання, мм/с. Такий підхід дозволяє об'єднати стабільність керованих параметрів роботизованого процесу з умовами формування зварювальної ванни та якістю шва. Рівномірність процесу оцінювали за відносною мінливістю основних параметрів зварювання. Для цього використовували коефіцієнт варіації:

$$CV = (\sigma/x) 100\%, \quad (2)$$

де: σ – стандартне відхилення параметра; x – його середнє значення. Для порівняння ручного та роботизованого зварювання аналізували зміну CV для швидкості переміщення, лінійного теплового ефекту та геометричних параметрів шва.

Якість зварювання оцінювали за рівнем браку, повторюваністю геометрії шва та стабільністю формування зварного з'єднання. Виробничу ефективність визначали за тривалістю технологічного циклу, продуктивністю, трудомісткістю операцій і завантаженням обладнання. Економічну ефективність оцінювали за річним економічним ефектом і орієнтовним терміном окупності:

$$T_{pb} = K/E_y, \quad (3)$$

де: T_{pb} – термін окупності, років; K – початкові інвестиційні витрати, грн; E_y – річний економічний ефект, грн/рік.

Результати порівняння узагальнювали у вигляді таблиць, у яких для ручного та роботизованого зварювання порівнювали параметри I , U , v , q_l (рівень дефекту, тривалість циклу, продуктивність, витрати). Інтерпретацію результатів виконували з позиції того, що економічний ефект роботизації формується не лише за рахунок скорочення трудомісткості, а й через стабілізацію теплофізичних умов процесу, зменшення відхилень якості та зниження витрат від дефектів. Для оцінювання впливу роботизації на теплофізичні параметри процесу розглянуто одну стандартну зварювальну операцію. Загальна тривалість операції для ручного зварювання становила 10 хв, а для роботизованого – 6 хв. Для теплофізичного розрахунку враховано саме час основного зварювання, оскільки лінійний тепловий ефект визначається параметрами дуги та швидкістю переміщення пальника під час формування шва. Прийнято, що тривалість основного зварювання скорочується з 5 хв до 3 хв, тобто на 40%. Такий рівень скорочення відповідає сучасним дослідженням автоматизованого лінійного зварювання, де встановлено приблизно 40% зменшення часу при використанні зварювального робота [10].

Викладення основного матеріалу дослідження. Роботизований зварювальний комплекс розглядається як технологічна система, що поєднує промисловий робот, зварювальне джерело, пальник, систему позиціонування заготовки, засоби програмування траєкторії та елементи контролю параметрів процесу. На відміну від ручного зварювання, така система забезпечує повторюваність положення пальника, стабільність швидкості переміщення та менший вплив людського фактора на формування зварного шва.

Головним теплофізичним показником процесу є лінійний тепловий ефект q_l , який визначається струмом, напругою, швидкістю переміщення пальника та коефіцієнтом ефективності теплопередачі. Для роботизованого зварювання особливо важливою є не лише величина q_l , а й стабільність цього показника вздовж траєкторії шва. Зменшення коливань швидкості та положення пальника сприяє більш рівномірному формуванню зварювальної ванни, стабільнішому проплавленню та зниженню ймовірності появи дефектів. Порівняння ручного та роботизованого зварювання доцільно виконувати за чотирма групами показників: теплофізичними, якісними, виробничими та економічними. До теплофізичних показників належать струм, напруга, швидкість зварювання і лінійний тепловий ефект. Якісні показники охоплюють рівень дефекту, повторюваність геометрії шва та стабільність формування зварного з'єднання. Виробничі показники характеризують тривалість технологічного циклу, продуктивність і трудомісткість операцій. Економічні показники відображають витрати, економічний ефект і термін окупності роботизованого комплексу. Вплив стабілізації теплофізичних параметрів на якість і ефективність роботизованого зварювання наведено на рис. 2.

Розрахунок приросту продуктивності

$$\Delta P = (P_1 - P_0) \times 100\%, \quad (4)$$

де $P_0 = 48$ шт./зміну – продуктивність до впровадження;

$P_1 = 80$ шт./зміну – продуктивність після впровадження.

$$\Delta P = ((80 - 48)/48) \times 100\% = 66,7\%.$$

Отже, продуктивність зросла на 66,7%.

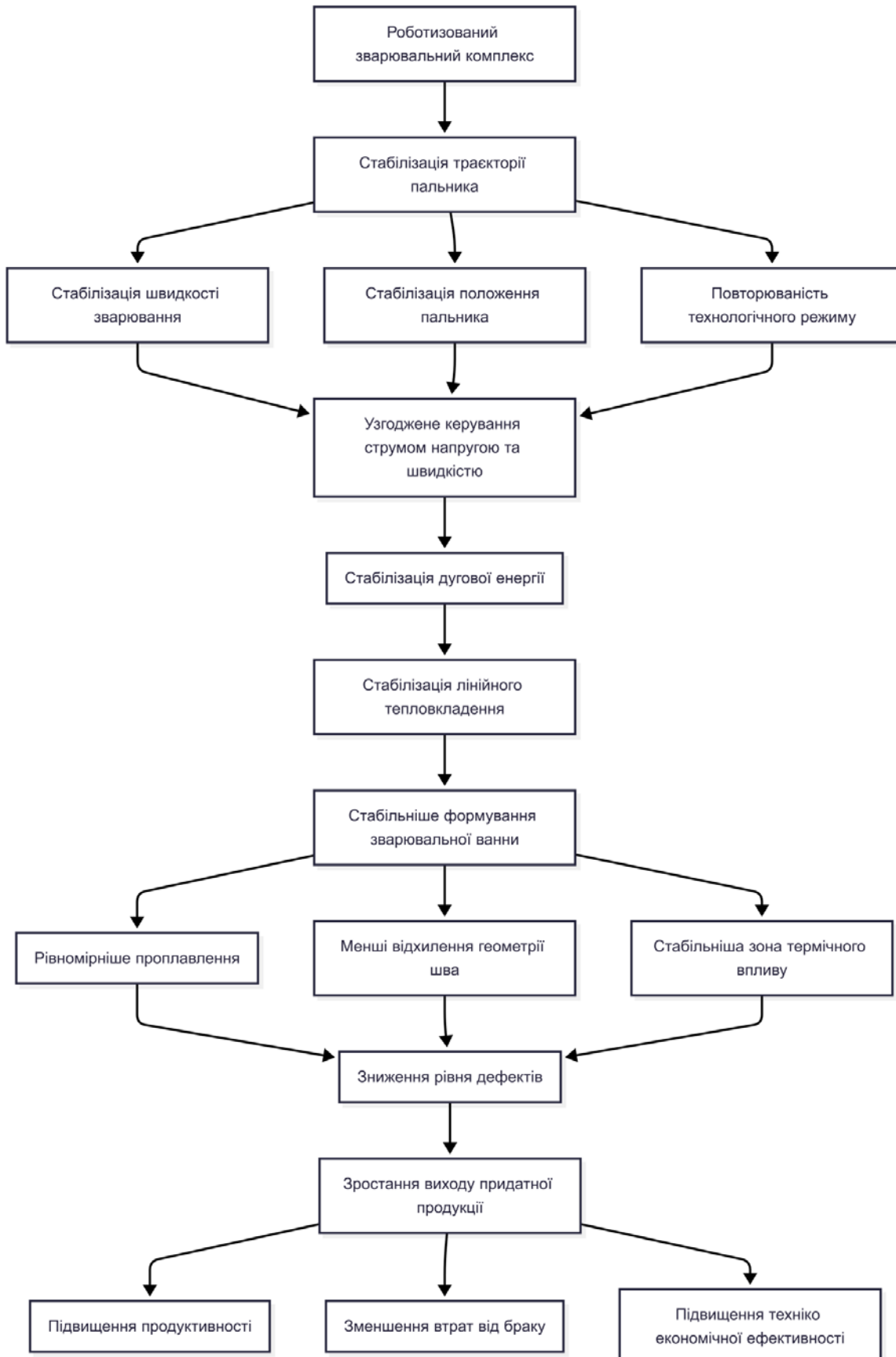


Рис. 2. Вплив стабілізації теплофізичних параметрів на якість і ефективність роботизованого зварювання

Розрахунок скорочення тривалості технологічного циклу

$$\Delta t = ((t_0 - t_1) / t_0) \times 100\%,$$

(5)

© Самчук Л.М., Карпуть С.Г., Гулієва Н.М., Сичук В.А.

де $t_0=10$ хв – тривалість циклу до впровадження; $t_1=6$ хв – тривалість циклу після впровадження.

$$\Delta t = (10-6) / 10 \times 100\% = 40\%$$

Отже, тривалість технологічного циклу зменшилася на 40%.

Розрахунок зменшення рівня дефекту.

Абсолютне зменшення браку:

$$\Delta B_{abs} = B_0 - B_1 = 10 - 3 = 7 \text{ в.п.} \quad (6)$$

Відносне зменшення браку:

$$\Delta B_{rel} = (B_0 - B_1) / B_0 \times 100\%, \quad (7)$$

$$\Delta B_{rel} = (10 - 3) / 10 \times 100\% = 70\%.$$

Отже, рівень браку зменшився на 7 відсоткових пунктів, або на 70% від початкового рівня.

Розрахунок приросту придатної продукції.

Кількість придатної продукції до впровадження:

$$Q_0 = P_0(1 - B_0), \quad (8)$$

$$Q_0 = 48(1 - 0,10) = 43,2 \text{ шт./зміну.}$$

$$Q_1 = 80(1 - 0,03) = 77,6 \text{ шт./зміну.}$$

$$\Delta Q = ((77,6 - 43,2) / 43,2) \times 100\% = 79,6\%.$$

Отже, випуск придатної продукції збільшується на 79,6%.

Розрахунок зміни завантаження обладнання

$$\Delta K_z = (K_{z1} - K_{z0}) / K_{z0} \times 100\%, \quad (9)$$

де $K_{z0}=65\%$, $K_{z1}=85\%$.

$$\Delta K_z = (85 - 65) / 65 \times 100\% = 30,8\%.$$

Абсолютне збільшення становить: $85 - 65 = 20$ в.п.

Отже, завантаження обладнання зросло на 20 відсоткових пунктів, або на 30,8% від базового рівня

Розрахунок скорочення потреби в персоналі

$$\Delta N = (N_0 - N_1) / N_0 \times 100\%, \quad (10)$$

де $N_0=4$ особи, $N_1=2$ особи.

$$\Delta N = (4 - 2) / 4 \times 100\% = 50\%.$$

Отже, потреба в обслуговуючому персоналі зменшується на 50%.

Теплофізичне пояснення отриманих результатів обґрунтовано розрахунковою моделлю.

Для розрахунку використано типовий режим автоматизованого зварювання: $I=150$ А, $U=18$ В, $v=3,33$ мм/с, що відповідає $\text{arcenergy } E=0,810$ кДж/мм. Стабілізацію процесу оцінено через зменшення середнього відхилення шва з 2,5 до 0,8 мм, стандартного відхилення з 1,2 до 0,3 мм, коефіцієнта варіації з 48% до 37 % та ймовірності дефекту з 0,10 до 0,03.

Приймаємо, що порівнюється однакова довжина шва L , а скорочення часу основного зварювання з 5 до 3 хв досягається за рахунок збільшення швидкості переміщення пальника. Для модельного розрахунку використано типовий режим автоматизованого зварювання: $I=150$ А, $U=18$ В, $v=20$ см/хв, тобто 3,33 мм/с.

$$t_{w0}=5 \text{ хв, } t_{w1}=3 \text{ хв; } v_0=20 \text{ см/хв}=200 \text{ мм/хв}=3,33 \text{ мм/с.}$$

Довжина шва для модельної операції: $L=v_0 t_{w0}=200 \cdot 5=1000$ мм

Швидкість роботизованого зварювання для тієї самої довжини шва:

$$v_1 = L / t_{w1} = 1000 / 3 = 333,3 \text{ мм/хв}=5,56 \text{ мм/с.}$$

Отже, швидкість переміщення пальника зростає у:

$$v_1 / v_0 = 5,56 / 3,333 = 1,667 \text{ рази.}$$

Розрахунок дугової енергії на одиницю довжини.

Для інженерного розрахунку доцільно використовувати спочатку дугову енергію:

$$E_l = UI / v \quad (11)$$

де E_l – дугова енергія на одиницю довжини, Дж/мм; U – напруга, В; I – струм, А; v – швидкість зварювання, мм/с.

Для ручного варіанту:

$$E_{l0} = 10^{-3} \cdot 18 \cdot 150 / 3,3 = 0,810 \text{ кДж/мм}$$

Якщо після роботизації залишити той самий струм і напругу, але збільшити швидкість до 5,56 мм/с:

$$E_{l1} = 10^{-3} \cdot 18 \cdot 150 / 5,66 = 0,486 \text{ кДж/мм}$$

Відносна зміна:

$$\Delta E_1 = ((0,486 - 0,810) / 0,810) \times 100\% = -40\%.$$

Отже, просте скорочення часу основного зварювання з 5 до 3 хв без коригування режиму зменшує дугову енергію на одиницю довжини приблизно на 40%. Це означає, що підвищення швидкості роботизованого зварювання саме по собі не гарантує стабільності теплофізичних умов формування шва.

Умова стабілізації теплового процесу.

Лінійний тепловий процес можна подати як:

$$q_l = \eta E_1 = \eta UI / v \quad (12)$$

де η – лінійне тепловкладення. Оскільки точне визначення фактичного тепловкладення залежить від умов процесу, матеріалу, розмірів зразка та теплових втрат, його потрібно трактувати обережно.

Для збереження сталого теплового ефекту потрібно:

$$q_{l1} = q_{l0}. \quad (13)$$

Якщо $\eta_0 \approx \eta_1$, тоді:

$$U_1 I_1 / v_1 = U_0 I_0 / v_0,$$

Звідси:

$$U_1 I_1 = U_0 I_0 v_1 / v_0, \quad (14)$$

$$U_1 I_1 = 18 \cdot 150 \cdot 1,667 = 4500 \text{ Вт.}$$

Початкова дугова потужність:

$$P_0 = U_0 I_0 = 18 \cdot 150 = 2700 \text{ Вт.}$$

Необхідна потужність для збереження $E_1 = 0,810$ кДж/мм при швидкості 5,56 мм/с:

$$P_1 = 4500 \text{ Вт.}$$

Приріст необхідної дугової потужності:

$$\Delta P_{\text{арс}} = 4500 - 2700 / 2700 \times 100 \% = 66,7\%.$$

Розрахункову оцінку впливу роботизації подано у таблиці 1.

Табл. 1

Розрахункова оцінка впливу роботизації на швидкість зварювання, дугову енергію та умови стабілізації теплового процесу

Показник	Ручне зварювання	Роботизоване зварювання без корекції (U, I)	Роботизоване зварювання зі стабілізацією (q_l)
Час основного зварювання, хв	5	3	3
Довжина шва, мм	1000	1000	1000
Швидкість, мм/с	3,33	5,56	5,56
Струм, А	150	150	визначається WPS
Напруга, В	18	18	визначається WPS
Дугова потужність (UI), Вт	2700	2700	4500
Дугова енергія (E_1), кДж/мм	0,810	0,486	0,810
Відносна зміна (E_1), %	—	- 40,0%	0%

Цей результат означає, що скорочення часу основного зварювання на 40% саме по собі не гарантує стабільності теплофізичних умов. Якщо роботизований комплекс лише збільшує швидкість переміщення пальника, але не коригує U, I або інші параметри режиму, лінійний тепловий ефект зменшується. Це може змінити умови проплавлення, ширину шва, зону термічного впливу та ймовірність дефектів. Таким чином, логіку змін можна представити у вигляді послідовності: роботизація → стабілізація v, U, I → стабілізація q_l → стабільніша геометрія шва → зниження рівня дефектності. Це відповідає сучасним роботизованим підходам, у яких підтримання сталого тепловкладення може забезпечуватися адаптивним плануванням швидкості та траєкторії

Показники якості.

Отриманий результат показує, що ефективність роботизованого зварювального комплексу повинна оцінюватися не лише за скороченням тривалості операції, а й за здатністю підтримувати стабільний тепловий ефект. Саме стабілізація співвідношення між U, I та v є теплофізичною основою підвищення повторюваності формування шва. Непрямим підтвердженням стабілізації процесу є покращення статистичних показників якості шва. Середнє відхилення геометрії шва

зменшилося з 2,5 до 0,8 мм, стандартне відхилення – з 1,2 до 0,3 мм, а ймовірність дефекту – з 0,10 до 0,03.

Зменшення середнього відхилення шва:

$$\Delta\delta = (2,5 - 0,8) / 2,5 \times 100\% = 68\%.$$

Зменшення стандартного відхилення:

$$\Delta\sigma = (1,2 - 0,3) / 1,2 \times 100\% = 75\%.$$

Зменшення ймовірності дефекту:

$$\Delta p_d = (0,10 - 0,03) / 0,1 \times 100\% = 70\%.$$

Розрахунково встановлено, що скорочення часу основного зварювання з 5 до 3 хв за незмінних значень струму та напруги призводить до збільшення швидкості переміщення пальника та відповідного зменшення дугової енергії на одиницю довжини з 0,810 до 0,486 кДж/мм. Разом з тим рисунок 3 показує, що при роботизованому зварюванні зі стабілізацією тепловкладення дугова енергія підтримується на рівні ручного зварювання (0,810 кДж/мм) за рахунок узгодженого керування струмом, напругою та швидкістю переміщення пальника. Таким чином, роботизація без корекції режиму призводить до зниження тепловкладення, тоді як роботизоване зварювання зі стабілізацією забезпечує збереження необхідних теплофізичних умов формування шва. Непрямим підтвердженням підвищення стабільності процесу є зменшення середнього відхилення шва на 68,0 %, стандартного відхилення на 75,0 % і ймовірності дефекту на 70,0 %

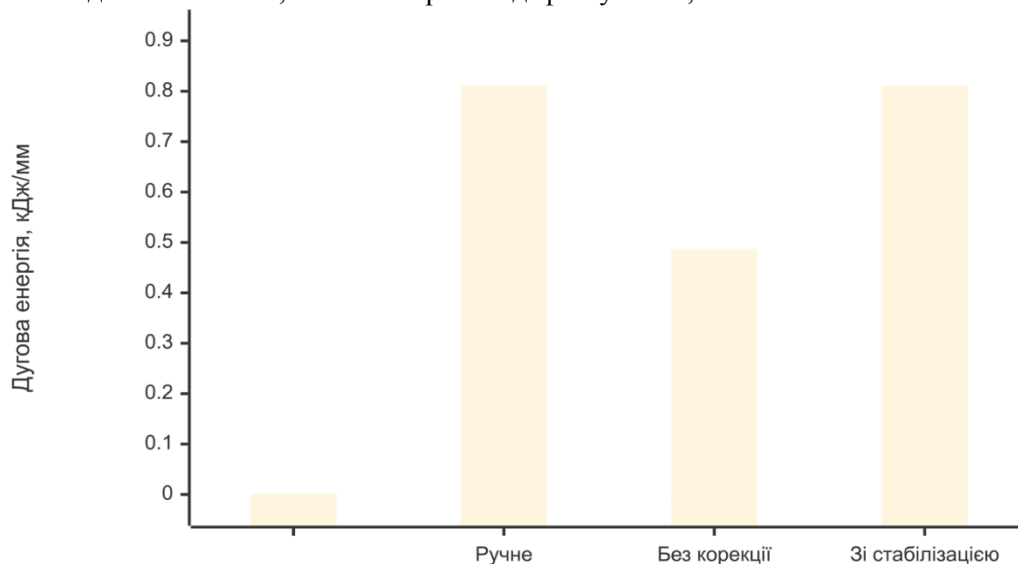


Рис. 3. Порівняння дугової енергії на одиницю довжини для ручного зварювання, роботизованого зварювання без корекції режиму та роботизованого зварювання зі стабілізацією тепловкладення

Як видно з рисунка 3, роботизоване зварювання без корекції режиму супроводжується зменшенням дугової енергії приблизно на 40 %, що може негативно впливати на глибину проплавлення та стабільність формування шва. Водночас використання стабілізації тепловкладення дозволяє підтримувати дугову енергію на рівні ручного зварювання, забезпечуючи необхідні теплофізичні умови процесу та підвищення повторюваності якості зварного з'єднання.

Новизна дослідження полягає в удосконаленні підходу до оцінювання ефективності роботизованого зварювального комплексу шляхом поєднання виробничих, якісних, економічних і теплофізичних показників процесу. На відміну від підходів, у яких ефективність роботизованого зварювання оцінюється переважно за продуктивністю, трудомісткістю або терміном окупності, у роботі ефективність пов'язано зі стабілізацією лінійного теплового ефекту, що визначається узгодженим керуванням струмом, напругою та швидкістю переміщення пальника. У роботі показано, що скорочення часу основного зварювання з 5 до 3 хв за незмінних струму та напруги призводить до зменшення дугової енергії на одиницю довжини з 0,810 до 0,486 кДж/мм, тобто на 40,0%. Це обґрунтовує необхідність не лише підвищення швидкості роботизованого зварювання, а й стабілізації теплофізичних параметрів процесу.

Удосконалено розрахункову схему оцінювання роботизованого зварювання, у якій технологічний ефект подано через послідовність: стабілізація траєкторії пальника → стабілізація швидкості зварювання → узгоджене керування U , I , v → стабілізація теплового ефекту →

зменшення відхилень геометрії шва – зниження рівня дефектності. Практична відмінність запропонованого підходу полягає в тому, що він дозволяє пояснити економічну ефективність роботизованого комплексу не лише скороченням часу операції, а й підвищенням повторюваності теплофізичних умов формування зварного шва.

Висновки.

1. Сформовано систему оцінювання ефективності роботизованого зварювального комплексу, яка поєднує теплофізичні, якісні, виробничі та економічні показники. До головних параметрів віднесено струм, напругу, швидкість переміщення пальника, дугову енергію на одиницю довжини, лінійний тепловий ефект, відхилення геометрії шва, рівень браку, продуктивність і термін окупності.

2. Розрахунково встановлено, що скорочення часу основного зварювання з 5 до 3 хв за незмінних значень струму $I=150$ А і напруги $U=18$ В збільшує швидкість переміщення пальника з 3,33 до 5,56 мм/с. За таких умов дугова енергія на одиницю довжини зменшується з 0,810 до 0,486 кДж/мм, тобто на 40,0%. Це підтверджує, що підвищення швидкості роботизованого зварювання потребує узгодженого керування U , I та v для стабілізації теплового процесу.

3. Показано, що стабілізація роботизованого процесу супроводжується покращенням показників якості шва. Середнє відхилення геометрії шва зменшилося з 2,5 до 0,8 мм, тобто на 68,0%; стандартне відхилення – з 1,2 до 0,3 мм, тобто на 75,0%; ймовірність дефекту – з 0,10 до 0,03, тобто на 70,0%. Це свідчить про підвищення повторюваності формування зварного з'єднання.

4. За тривалості стандартної операції 10 хв продуктивність ручного зварювання становить 48 шт. за 8-годинну зміну, а за тривалості роботизованої операції 6 хв – 80 шт./зміну. Приріст продуктивності становить 66,7%, а випуск придатної продукції з урахуванням зниження браку з 10% до 3% збільшується з 43,2 до 77,6 шт./зміну, тобто на 79,6%. Отже, ефективність роботизованого зварювального комплексу формується не лише за рахунок скорочення тривалості операції, а й через стабілізацію теплофізичних умов процесу та підвищення якості зварного з'єднання.

Список використаних джерел

1. Lu H., Wu Z., Zhang Y., Wang Y., Liu S., Huang H., Liu M., Liu S. Towards a UniformWeldingQuality: A Novel Weaving Welding Control Algorithm Based on Constant Heat Input. Materials. 2022. Vol. 15, No. 11. Article 3796. DOI: 10.3390/ma15113796.
2. Curiel D., Veiga F., Suarez A., Villanueva P. Advances in Robotic Welding for Metallic Materials: Application of Inspection, Modeling, Monitoring and Automation Techniques. Metals. 2023. Vol. 13, No. 4. Article 711. DOI: 10.3390/met13040711.
3. Придальний Б.І., Самчук Л.М., Гулієва Н.М., Сичук В.А. Підвищення надійності роботизованих виробничих систем на основі діагностики відмов, прогностичного обслуговування та поточного моніторингу. Наукові нотатки : міжвузівський зб. наук. праць. Вип. 85. 2026. С. 136-144. DOI:10.36910/775.24153966.2026.86.18
4. Ali R., El-Betar A., Magdy M. A review on optimization of autonomou swelding parameters for robotics applications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024. Vol. 134. P. 5065–5086. DOI: 10.1007/s00170-024-14396-9.
5. Liskevych O., Scotti A. Determination of the grossheat input in arc welding. Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 225. P. 139–150. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.06.005.
6. Arora H., Singh R., Brar G. S. Thermal and structural modelling of arc welding processes: A literature review. Measurement and Control. 2019. Vol. 52, No. 7–8. P. 955–969. DOI: 10.1177/0020294019857747.
7. Jorge V. L., Bendaoud I., Soulié F., Bordreuil C. Rear Weld Pool Thermal Monitoring in GTAW Process Using a Developed Two-Colour Pyrometer. Metals. 2024. Vol. 14, No. 8. Article 937. DOI: 10.3390/met14080937.
8. Wang Y., Lee W., Jang S., Truong V. D., Jeong Y., Won C., Lee J., Yoon J. Prediction of internal welding penetration based on IR the rmalimage supported by machine vision and ANN-model during automatic robot weldin gprocess. Journal of Advanced Joining Processes. 2024. Vol. 9. Article 100199. DOI: 10.1016/j.jajp.2024.100199.
9. Wahidi S. I., Oterkus S., Oterkus E. Robotic welding techniques in marine structures and production processes: A systematic literature review. Marine Structures. 2024. Vol. 95. Article 103608. DOI: 10.1016/j.marstruc.2024.103608.

10. Zenišek D., Broum T., Šimon M. Payback calculation refinement of industrial robot applications. *MM Science Journal*. 2023. October. P. 6785–6792. DOI: 10.17973/MMSJ.2023_10_2023077.
11. Pandey A., Reddy M. P. K., RamakrishnaCh. S., Zade S., Singh R. An analysis of the efficiency and accuracy of manual and autonomous four-wheeled linear welding across various parameters. *Discover Mechanical Engineering*. 2025. Vol. 4. Article 77. DOI: 10.1007/s44245-025-00166-8.
12. Sathick J., AzeezKhan A. A. A smart manufacturing paradigm for robotic welding process optimization through machine learning. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 42946. DOI: 10.1038/s41598-024-82590-6.
13. Hägele M., Nilsson K., Pires J. N. Industrial Robotics. In: Siciliano B., Khatib O. (eds.). *Springer Hand book of Robotics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. P. 963–986.
14. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І., ГаоСінмін. Технологічне оснащення фрезерних верстатів: проектування, теорія, практика. Монографія. Луцьк: Вежа-Друк, 2023. 292 с. ISBN 978-966-940-449-7.
15. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Приводи затискних механізмів металообробних верстатів. Монографія. Луцьк: Вежа-Друк, 2016. 352 с. ISBN 978-966-940-017-8.
16. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Проектування цільових механізмів маніпулювання верстатів нового покоління. Навчальний посібник. Вид. 2-ге. Луцьк: Вежа-Друк, 2014. 428 с. ISBN 978-617-7181-20-9.
17. Prydalnyi B.I. Mechatronic clamping mechanism with electro-hydraulic actuator for machine spindle units. *Perspective Technologies and Devices*. 2021. No. 18. P. 124–128. DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2021-18-18.
18. Prydalnyi B. Mechatronic device for two-stage clamping of cylindrical objects in machine tool spindles. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*. 2021. Vol. 13, No. 1. P. 118–123. DOI: 10.31649/2413-4503-2021-13-1-118-123.

Дата надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.05.2026

Дата оприлюднення: 28.05.2026