

ПРОМИСЛОВІ ЗВАРЮВАЛЬНІ РОБОТИ: ВИРІШЕННЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОБЛЕМ ТА СТИМУЛЮВАННЯ ТРАНСФОРМАЦІЇ

¹Національний університет цивільного захисту України

²ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА"

³Національний університет «Запорізька політехніка»

Анотація. У статті представлено аналітичний огляд трансформації промислового зварювання в умовах автоматизації, зокрема впровадження роботизованих систем у 2020–2025 роках. Визначено ключові проблеми традиційного ручного зварювання та показано, як роботизація вирішує їх за рахунок підвищення продуктивності, точності, безпеки та економічної ефективності. Розглянуто приклади практичного впровадження зварювальних роботів у виробництві, з урахуванням сучасних технологічних трендів – штучного інтелекту, цифрових двійників та коботів.

Ключові слова: роботизоване зварювання, автоматизація, продуктивність, коботи, цифрова трансформація, безпека праці.

Промислове зварювання залишається базовим етапом у виготовленні металоконструкцій та обладнання в ключових галузях: машинобудуванні, енергетиці, будівництві, транспорті. Проте традиційне ручне зварювання стикається з комплексом викликів, серед яких – дефіцит кваліфікованих кадрів, нестабільність якості швів, високі трудові витрати, а також ризики для здоров'я працівників через вплив шкідливих факторів (ультрафіолетове випромінювання, випари металів, ергономічні навантаження) [1, 2].

Поширені дефекти ручного зварювання – пористість, бризки, подрізи, деформації та тріщини – негативно впливають на цілісність конструкцій, підвищують витрати на переробку й знижують загальну ефективність виробництва. Крім того, нестабільність параметрів, пов'язана з людським фактором (втома, концентрація, досвід), робить якість зварних з'єднань непередбачуваною [2].

Роботизоване зварювання забезпечує суттєве підвищення технологічної та економічної ефективності процесу. Так, час увімкнення дуги (arc-on time) для ручного зварювання становить лише 10–40%, тоді як у роботизованих системах цей показник досягає 60–80% і більше [2]. Роботи працюють безперервно, без втоми, з високою повторюваністю рухів, що гарантує стабільну якість зварювання.

Впровадження систем FANUC компанією Will-Burt Co. дозволило збільшити продуктивність у 3–4 рази, додатково забезпечивши 240–320 годин зварювання щотижня на одну систему. Це дало змогу залучити понад \$4 млн контрактних замовлень, знизити ризики для працівників і покращити якість продукції [3]. У свою чергу, компанія Raymath застосувала коботів Universal Robots, що забезпечило 200% приріст зварювального виробництва з повною окупністю проєкту менш ніж за 12 місяців [4].

Роботи дозволяють не лише зменшити витрати на оплату праці, а й підвищити точність зварювання. Сучасні системи з вбудованими сенсорами, машинним зором і цифровими двійниками досягають точності до 0,08 мм і ефективності виявлення дефектів на рівні понад 97% [1]. Це значно знижує частку браку й витрати на матеріали. Більше того, такі системи легко інтегруються у середовище «Індустрії 4.0», взаємодіють з MES/ERP і забезпечують передбачуваність, контроль і самодіагностику процесів.

Застосування роботизованих систем також підвищує рівень безпеки на робочому місці, оскільки людина виводиться із зони дії небезпечних факторів. Це сприяє зниженню рівня травматизму,

зменшенню витрат на страхування та формуванню більш безпечного і привабливого виробничого середовища [4]. Компанія General Motors, зокрема, завдяки роботизації, уникла понад 100 випадків зупинки виробництва, кожна хвилина яких могла коштувати \$20 000 [4].

У середньо- та довгостроковій перспективі роботизація зварювальних процесів стає ключовим фактором виживання і зростання виробничих підприємств. Вона дозволяє масштабувати потужності, підтримувати стабільно високу якість, впроваджувати нові технології та формувати нову модель виробничої зайнятості – від операторів до програмістів і аналітиків даних [5].

У контексті глобальної цифрової трансформації промисловості, роботизоване зварювання стає не лише технологічним рішенням, а стратегічною складовою концепції «розумного виробництва» (Smart Manufacturing). Зростає роль таких підходів, як цифрові двійники, які дозволяють моделювати процеси офлайн, оптимізувати зварювальні параметри та мінімізувати помилки ще до фізичного запуску виробничого циклу. Такі системи активно застосовуються в авіа- та суднобудуванні, де ціна помилки є критично високою [1].

Паралельно з цим розвиваються системи самонавчання на основі штучного інтелекту, які дають змогу автоматизувати програмування зварювального маршруту за CAD-моделлю, проводити адаптивну корекцію у реальному часі залежно від геометрії деталі, спостерігати за стабільністю дуги та контролювати якість шва без втручання людини [1, 2]. Таке поєднання дозволяє перейти від класичної автоматизації до автономних зварювальних систем.

Важливо зазначити, що попри переваги, масове впровадження роботизованого зварювання стикається з низкою викликів. До них належать високі початкові капітальні витрати, потреба у кваліфікованих кадрах для обслуговування та програмування роботизованих комплексів, складність інтеграції в існуючі виробничі процеси, особливо в умовах багатомоделного виробництва [4].

Однак сучасні тренди свідчать про поступове зниження цих бар'єрів. Наприклад, роботи з інтуїтивними інтерфейсами та функцією «навчання з демонстрації» стають доступними для малих і середніх підприємств. Крім того, інтеграція low-code та no-code платформ у середовище промислової автоматизації відкриває шлях до демократизації технологій – коли оператор без навичок програмування може налаштувати базовий цикл зварювання [5].

Усе це вказує на те, що роботизоване зварювання не є статичним технологічним інструментом, а динамічною складовою цифрової індустрії, яка безпосередньо впливає на гнучкість виробництва, інноваційну здатність підприємства та його конкурентну позицію на ринку. Успішна адаптація до цих змін передбачає інвестиції не лише в обладнання, а й у людський капітал — перекваліфікацію зварювальників у програмістів роботів, створення мультидисциплінарних команд, які поєднують знання в сфері матеріалознавства, автоматизації, IT та інженерії [5].

В електронній та енергетичній промисловості використання роботів забезпечує ультраточне зварювання компонентів, що критично важливо для мікроелектроніки, акумуляторних систем та елементів ВДЕ (відновлюваних джерел енергії). Завдяки автоматизації вдається уникнути пошкодження чутливих деталей і підвищити якість з'єднання, що особливо важливо у виробництві електромобілів та сонячних батарей [1, 4].

Ще один важливий аспект – економічна доцільність. Попри значні початкові інвестиції, окупність роботизованих зварювальних систем відбувається в межах 12–24 місяців, що підтверджується практикою середніх виробників (наприклад, Raymath) [4]. Додатково скорочуються витрати на переробку, брак, оплату понаднормових годин і страхові внески. Автоматизація також дозволяє уникати дорогавартісних зупинок виробництва – у випадку General Motors це врятувало компанію від понад 100 інцидентів простою [4].

Очікується, що надалі ключову роль відіграватимуть технології інтеграції роботів у єдину цифрову екосистему підприємства. Це передбачає зв'язок з ERP, MES, PLM-системами, що дозволяє здійснювати моніторинг в реальному часі, прогнозне обслуговування, аналіз ефективності та коригування стратегії виробництва на основі даних [1, 5].

У найближчі роки слід очікувати активного поширення роботів третього покоління — здатних навчатися у змінному середовищі, адаптуватися до варіативної геометрії деталей, виконувати зварювання у складних просторових положеннях, зокрема на будівельних майданчиках, у суднобудуванні чи нафтогазових об'єктах [5].

Підсумовуючи, можна стверджувати: роботизоване зварювання перетворюється на один з головних інструментів підвищення ефективності, безпеки та гнучкості виробничих процесів. Його впровадження є не лише реакцією на поточні виклики, а елементом стратегічного оновлення промисловості, що формує підґрунтя для сталого розвитку, цифрової трансформації та конкурентоздатності в умовах глобальної конкуренції.

У довгостроковій перспективі очікується повна автономізація зварювальних процесів у рамках інтелектуального виробництва (Smart Factory), де роботизовані зварювальні системи не лише виконуватимуть технологічну операцію, а й самостійно прийматимуть рішення, навчатися на основі накопичених даних, співпрацюватимуть з іншими машинами та системами в реальному часі.

Це вимагає, з одного боку, активної участі держави у стимулюванні модернізації підприємств (через гранти, пільгове оподаткування, програми підготовки кадрів), а з іншого – готовності бізнесу до інвестицій у довгострокову трансформацію. Роль науково-освітніх установ у цьому процесі важко переоцінити, адже саме вони є джерелом інновацій, технічної експертизи та підготовки нового покоління інженерів.

Таким чином, роботизоване зварювання вже сьогодні несе значний потенціал для забезпечення технологічної незалежності, підвищення ефективності національного виробництва та інтеграції української промисловості у глобальні ланцюги постачання. Його подальший розвиток має базуватись на синергії інженерного досвіду, сучасних ІТ-рішень та стратегічного бачення майбутнього промисловості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. An overview of robot applications in automotive industry / M. Bartoš et al. Transportation research procedia. 2021. Vol. 55. P. 837–844. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.052>.
2. Research review and future directions of key technologies for welding robots in the construction industry / H. Bu et al. Buildings. 2024. Vol. 14, no. 8. P. 2261. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14082261>.
3. TOP 5 global robotics trends 2025. Home of Welding. URL: <https://www.home-of-welding.com/news/top-5-global-robotics-trends-2025-4966>.
4. Multi-Axis spot welding robot decade long trends, analysis and forecast 2025-2034. Comprehensive Market Research & Forecast Analysis | Data Insights Market. URL: <https://www.datainsightsmarket.com/reports/multi-axis-spot-welding-robot-75781> (date of access: 21.05.2025).
5. Kang Y., Chen R. Welding robot automation technology based on digital twin. Frontiers in mechanical engineering. 2024. Vol. 10. URL: <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1367690>.

Цимбал Богдан Михайлович, доктор наук з державного управління, доцент, професор кафедри охорони праці та екологічної безпеки, Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, tsembalbogdan@ukr.net, доцент кафедри автоматизації, електро- та роботехнічних систем факультету автоматизації виробництва та цифрових технологій, ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА", м. Запоріжжя.

Молочков Денис Євгенійович, доктор філософії, старший викладач кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя.

Abstract

The article presents an analytical review of the transformation of industrial welding in the context of automation, in particular the introduction of robotic systems in 2020–2025. The key problems of traditional manual welding are identified and it is shown how robotics solves them by increasing productivity, accuracy, safety and economic efficiency. Examples of practical implementation of welding robots in production are considered, taking into account modern technological trends - artificial intelligence, digital twins and cobots.

Keywords: robotic welding, automation, productivity, cobots, digital transformation, occupational safety.

Tsymbal Bohdan Mykhailovych, Doctor of Science in Public Administration, Associate Professor, Professor of the Department of Occupational Health and Environmental Safety, National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, tsembalbogdan@ukr.net, Associate Professor of the Department of Automation, Electrical and Robotic Systems, Faculty of Production Automation and Digital Technologies, Limited Liability Company “METINVEST POLYTECHNICA TECHNICAL UNIVERSITY”, Zaporizhzhia.

Molochkov Denys Yevheniiiovych, Doctor of Philosophy, Senior Lecturer at the Department of Integrated Welding Technologies and Structural Modeling, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, d.molochkov@triada-welding.com