

ДОДАТОК А

Апробація наукових результатів дослідження

УДК 621.914

ВПРОВАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИХ ВАРСТАТІВ З ЧПК В РОЗУМНЕ ВИРОБНИЦТВО

О. О. Зибенко

Харківський національний університет радіоелектроніки
Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14
E-mail: oleksandr.zybenko@nure.ua

Анотація: системи ЧПК (числове програмне керування) відіграють надзвичайно важливу роль у керуванні електроерозійними верстатами (EDM) та процесами їх обробки. Дотепер існуючі системи ЧПК не забезпечують достатньої відкритості, яка б дозволяла дослідникам та інженерам розширювати свої можливості та функціональні можливості у відповідь на зростаючі вимоги інтелектуального виробництва; з іншого боку, перетворення машини EDM, виготовленої малими та середніми верстатобудівниками, на розумну виробничу систему ніколи не було легкою роботою. Для вирішення проблем і подолання труднощів, які блокують шлях до інтелектуального виробництва, у цій статті розглядається платформа ЧПУ з відкритою архітектурою для верстатів EDM. Ця платформа використовує найсучасніші технології для реалізації апаратного та програмного забезпечення без шкоди для обмежень застарілих технологій.

Ключові слова: автоматизація, ЧПК, електроерозійний верстат, інтелектуальне виробництво.

IMPLEMENTATION OF CNC EDM IN THE SMART PRODUCTION

O. Zybenko

Kharkiv National University of Radio Electronics
Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av., 14
E-mail: oleksandr.zybenko@nure.ua

Annotation: CNC (computer numerical control) systems play an ultimately important role in controlling EDM (electrical discharge machining) machine tools and their machining processes. Till now, existing CNC systems do not offer sufficient openness that supports researchers and engineers to expand their capabilities and functionalities in response to the increasing demands of smart manufacturing; on the other hand, transforming an EDM machine made by small and medium-sized machine tool builders, into a smart manufacturing system has never been an easy job. To address the issues and overcome the difficulties which block the way towards smart manufacturing, this paper proposes an open architecture CNC platform for EDM machine tools. This platform utilizes state-of-the-art technologies in the implementation of the hardware and software without compromising the constraints of obsolete techniques.

Key words: automation, CNC, EDM, smart manufacturing.

Системи ЧПК (числового програмного керування) відіграють надзвичайно важливу роль у керуванні електроерозійними верстатами та процесами їхньої обробки. До цього часу існуючі системи ЧПК не пропонують достатньої відкритості, яка б дозволила дослідникам та інженерам розширювати їх можливості та функціональність у відповідь на зростаючі вимоги інтелектуального виробництва; з іншого боку, перетворення електроерозійного верстата, виготовленого малими та середніми виробниками, в інтелектуальну виробничу систему ніколи не було легкою справою. Для вирішення цих питань і подолання труднощів, які стоять на шляху до інтелектуального виробництва, в цій статті розглядається варіант відкритої архітектури ЧПК для електроерозійних верстатів. З точки зору практикуючого фахівця, відкритість і стандартизація є ключовими факторами, які дозволяють людям з академічних кіл

і промисловості вносити знання своєї галузі для збагачення екосистеми розумного виробництва.

Як одна з найбільших рушійних сил економіки, обробна промисловість в Україні відігравала домінуючу роль у виробництві великої кількості товарів для клієнтів у всій країні та у всьому світі протягом останніх десятиліть. Тому модернізація обробної промисловості в цілому в найближчі десять років має велике значення для країни та її виробничих підприємств.

Оскільки інтелектуальна виробнича система [1] або промисловість 4.0 [2, 3] з'явилась над горизонтом у відповідь на зростаючі вимоги диверсифікованих ринкових потреб, підкреслюючи конкурентоспроможність виробничих галузей, в останні роки було досягнуто консенсусу, що обробна промисловість повинна наздогнати темпи швидкого розвитку нової промислової революції на чолі з розумним виробництвом або промисловість 4.0. Як потужний метод виробництва, електроерозійна обробка (EDM - Electric discharge machining) і її верстати постійно розвиваються разом з іншими виробничими технологіями у відповідь на швидку зміну виробничої парадигми.

Через те, що більшість виробників електроерозійних верстатів є малими та середніми компаніями, вони, як і більшість підприємств, прагнуть вижити, долаючи серйозні виклики, такі як зростання вартості робочої сили, модернізація технологій обробки, впровадження цифрової системи управління, тощо [4-7]. Відсутність інвестицій і людських ресурсів стає величезною перешкодою, яка блокує рух малих та середніх виробників верстатів на шляху до розумного виробництва. Наприклад, системи числового програмного керування (ЧПК) відіграють надзвичайно важливу роль у виконанні таких критично важливих завдань, як керування рухом верстата, управління процесом обробки, реагування на різні запити інтегрованої виробничої системи, а також відповідна інтеграція з роботами та іншими робочими одиницями для виконання завдань обробки в повністю автоматизованому режимі. Верстати, доступні на нашому ринку, були розроблені майже 20 років тому із застарілою апаратною та програмною архітектурою. Їх майже неможливо модернізувати, просто додаючи більш сучасні функціональні можливості та розширені функції в стару систему ЧПК, яка була створена та залишилася майже незмінною з моменту створення.

Замість того, щоб покладатися на безнадійну еволюцію існуючих старих систем із закритими структурами, винахід повністю нової системи ЧПК шляхом використання новітніх технологій на основі сучасної архітектури для ефективного забезпечення верстатів сучасними функціональними можливостями, необхідними для інтелектуального виробництва або індустрії 4.0, є дійсно кращим вибором без шкоди для обмежень застарілих систем. З іншого боку, все більше і більше нових технологій, таких як штучний інтелект (AI), 5G, інтернет речей (IoT), великі дані, кіберфізичні системи (CPS) тощо, швидко розвиваються і впроваджуються в передові виробничі системи для роботи поверх і/або разом з системами ЧПК, тим самим збагачуючи можливості всієї виробничої системи. Як наслідок, нові системи ЧПК повинні бути масштабованими та адаптивними, щоб відповідати вимогам диверсифікованої конфігурації виробничої системи.

Порівняно зі звичайними виробничими системами, розумна виробнича система працює з більшою автономією, сприймаючи/збираючи великі дані, контролюючи процеси обробки, діагностуючи несправності та навчаючись покращувати свою продуктивність обробки. Як «мозок» виробничої системи, контролер машини, включаючи систему ЧПК, отримує інструкції з керування траєкторією або послідовністю, а також інформацію від датчиків і надсилає керуючі сигнали виконавчим механізмам і пристроям після розрахунків і прийняття рішень відповідно до заданих правил і законів управління. Сучасний контролер машини також працює як вузол в IoT, спілкуючись з іншими терміналами для обміну інформацією та віддаленого виконання операцій.

Паралельно з розвитком виробничих систем, технології обробки також розвиваються у відповідь на виклики, такі як мікро/нано виробництво, свердління малих отворів, складна обробка порожнин із поганим доступом до інструменту та обробка матеріалів, які важко

обробляти. Рішення цих проблем були значно обмежені через дорогу та повільну розробку прототипів машин та їх контролерів. Контролери, датчики або приводи з надзвичайними властивостями, такими як надзвичайно висока роздільна здатність, надзвичайно малий розмір або надзвичайно низька затримка, неминуче потрібні для таких виробничих систем, але вони постачаються лише кількома компаніями з погано підтримуваними стандартними інтерфейсами, як в апаратному, так і в програмному забезпеченні, для з'єднання між контролерами машини та зовнішніми пристроями. Такі погано підтримувані інтерфейси, у свою чергу, призвели до відсутності широко підтримуваних рішень системної інтеграції. Таким чином, розробникам виробничих систем доводиться будувати нову систему практично з нуля для кожного випадку, щоб подолати різні виробничі проблеми.

У результаті, хоча і системи керування машиною, і технології виробництва значно просунулися за останні десятиліття, розрив між ними також збільшився, що ускладнює налаштування контролера машини для задоволення нових вимог, висунутих передовими виробничими технологіями, такими як можливості швидшого та надійного обчислення, широкого зв'язку, обробки великих даних та об'єднання датчиків тощо. Деякі передові застосування електроерозійної обробки, такі як багатоосьова електроерозійна обробка турбінних лопаток і робочих коліс, свердління отворів для охолодження без зворотного удару, а також повністю автоматизоване інтелектуальне виробництво, оснащене електроерозійною обробкою, залежать від складних функцій сучасних контролерів верстатів. Їх можна абстрагувати як можливості позиційно-залежного керування процесом, мультисистемної взаємодії, адаптивного розподілу ресурсів у часі та просторі, широкого діапазону підключення, а також адаптивності.

Під час процесів механічної обробки не всі параметри можна підтримувати постійними. Це пояснюється тим, що стан деяких процесів обробки є нелінійним, змінним у часі та навіть стохастичним та/або хаотичним. Бульбашки та уламки, що утворюються під час розрядів, рухаються вздовж міжелектродного проміжку, який занурений у діелектричну робочу рідину, що підвищує ймовірність виникнення шкідливої дуги та короткого замикання, коли електрод інструменту занурюється всередину заготовки. Тому дії з видалення уламків і бульбашок повинні змінюватися залежно від положення електрода, щоб підтримувати нормальну швидкість розряду на якомога вищому рівні. Тому, на відміну від різальних верстатів, швидкість подачі на кожному сегменті траєкторії для електроерозійних верстатів не визначається простим введенням значення F-коду (швидкість подачі) перед виразом G-коду (рух), а постійно регулюється відповідно до стану розряду в зазорі.

З іншого боку, для планування кінематики верстата такі параметри руху, як швидкість, прискорення і ривок, попередньо розраховуються і оптимізуються на кожному сегменті траєкторії. Це типовий процес, залежний від положення, встановлення і зміна параметрів якого жорстко пов'язані з певним положенням, а не з часом; крім того, сервоуправління шириною зазору і багатоосьове одночасне управління в електроерозійних верстатах, різання під кутом і різання на різну висоту в електроерозійних верстатах, управління виходом і проникненням в електроерозійних верстатах для швидкого свердління малих отворів, а також багато інших - все це хороші приклади процесів, залежних від положення. Ця категорія процесів обробки вимагає особливого механізму управління, в якому кожна подія або дія запускається і вимірюється в певному положенні, а не в певний момент часу. Іншими словами, все синхронізується за положенням уздовж траєкторії, щоб забезпечити бажану продуктивність процесу обробки. Ось чому звичайні системи ЧПК, призначені для різальних верстатів, не можуть бути безпосередньо використані для керування електроерозійними верстатами.

У звичайних системах ЧПК не так просто змінити будь-який параметр процесу в межах одного рядка G-коду руху, наприклад, G01, G02 і G03. Команда встановлення параметра процесу, наприклад, F, яка встановлює швидкість подачі, в одному рядку з G-кодом руху, може бути виконана тільки до або після початку руху, і вона залишається незмінною до тих

під, поки не буде встановлена іншою командою. Якщо параметр процесу потрібно змінити під час руху, єдиний спосіб - розбити команду G-коду руху на два або більше сегментів команд і встановити параметри процесу відповідно до кожного сегмента команди руху. Це може призвести до зниження ефективності та надійності планування подачі, оскільки кількість G-кодів для передбачення обмежена. Таким чином, буде важко реалізувати імпровізовані швидкі багатокоординатні рухи, такі як стрибки інструменту в багатокоординатному електроерозійному верстаті. Для того, щоб здійснювати позиційно-залежне керування процесом під час обробки з ефективним плануванням подачі, необхідно перевизначити формат даних як для траєкторії руху інструменту, так і для параметрів процесу.

Типова інтелектуальна виробнича одиниця виконує механічну обробку, обробку деталей, зміну інструменту, транспортування, вимірювання, тощо автоматично, без ручних операцій. Мультисистемна взаємодія - це ключ до 100% автоматизації та самовдосконалення. Наприклад, при швидкому електроерозійному свердлінні отворів для охолодження, ідентифікація леза, лазерне вимірювання тривимірного профілю леза, адаптивне планування траєкторії, автоматична генерація G-коду, адаптивне свердління, автоматична обробка деталей, заміна інструментальних електродів, заміна напрямних електродів, а також контроль якості виконуються в рамках співпраці між чотирма 6-координатними електроерозійними свердлильними верстатами, одним 6-координатним електроерозійним прохідним верстатом, одним лазерним верстатом для лазерного вимірювання тривимірного профілю леза, двома 6-координатними промисловими роботами, а також системою ідентифікації RFID (радіочастотних ідентифікаторів) і шістьма транспортерами. На додаток до співпраці на рівні системи, співпраця між різними пристроями також відіграє важливу роль у вивченні та застосуванні передових виробничих технологій. На рівні пристрою для точного моніторингу, вимірювання та управління процесом обробки контролер верстата часто повинен співпрацювати із зовнішніми пристроями для активації або зчитування сигналів. Наприклад, для спостереження за станом зазору під час електроерозійної обробки перед зоною обробки можна встановити високошвидкісну камеру для спостереження. Щоб отримати взаємозв'язок між зображеннями, зробленими камерою, і положенням інструменту на верстаті, зображення повинні надходити з точними часовими мітками від контролера верстата.

Збирати дані і запускати рухи або дії синхронно між кожною окремою традиційною виробничою системою і зовнішнім пристроєм не зовсім просто, оскільки кожна система має власне визначення внутрішнього формату даних і мітки часу. Не всі системи ЧПК для верстатів мають інтерфейси для зв'язку з іншими зовнішніми пристроями. Дані, які можна збирати та обмінюватися, також обмежені, що ще більше ускладнює співпрацю із зовнішніми системами.

В останні роки масштаби та складність технічних характеристик продукту, параметрів процесу обробки та сигналів зазвичай розширюються в міру розвитку технологій виробництва, що призводить до зростання складності апаратного та програмного забезпечення систем обробки. Однак, оскільки обчислювальне навантаження на контролер стає все важчим, обчислення в кожному завданні можуть сповільнюватися, а загальне споживання енергії контролером зростає. Також, іноді через обмеження розмірів і/або вартості, апаратне забезпечення контролера не завжди може бути оснащено високою конфігурацією. Межі між реальним і нереальним часом, синхронним і асинхронним, онлайн і офлайн, централізованим і розподіленим значною мірою залежать від часових і просторових обмежень, створених користувачами та доступними апаратними системами.

Деякі завдання в режимі реального часу, такі як інтерполяція траєкторії інструменту, планування/оптимізація швидкості подачі та обробка сигналів, потребують виконання протягом мілісекунд або навіть коротших періодів. Синхронні завдання, такі як переміщення по кількох осях, автоматичне налаштування параметрів процесу та збір даних, вимагають суворого дотримання часових позначок контролера. Онлайн завдання, такі як моніторинг і керування процесом обробки в EDM, не можуть бути виконані повністю до початку процесу

обробки. Бажано максимально спростити завдання в режимі реального часу, синхронні та онлайн завдання в системі, щоб полегшити навантаження на ЦП. Застаріла монолітна/централізована архітектура також може бути замінена масштабованою та розподіленою архітектурою завдяки швидкому зростанню пропускної здатності мережі.

Розумна виробнича система потребує великих даних для навчання. Під "великими" мається на увазі не тільки кількість, але й розмірність. Для того, щоб збирати різні типи даних великої розмірності, датчики повинні бути підключені до контролера верстата за принципом "підключи і працюй" з невеликою кількістю перетворювачів сигналів і мінімальними налаштуваннями. Для обробки заготовки шляхом виконання команд, виконавчі механізми, такі як двигуни, насоси, генератори імпульсів і перемикачі, також повинні бути підключені до контролера верстата і обмінюватися даними за допомогою цифрових сигналів. [7,8]

У звичайних виробничих системах для підключення зовнішніх пристроїв в контролері верстата є лише кілька типів інтерфейсів, що робить його досить незручним для вибору компонентів на етапі розробки системи. Різні дані зазвичай передаються за допомогою специфічних протоколів, і, таким чином, функція аналізу даних повинна адаптуватися до різних форматів даних. Бажано використовувати в інтелектуальних виробничих системах широко підтримувані інтерфейси зі стандартними протоколами, щоб адаптуватися до швидко мінливих вимог від різних виконавчих механізмів і датчиків, починаючи від нанорозмірних до макромасштабних, від наносекунд до секунд, від кіберпростору до фізичного світу. Хоча на прикладному рівні допускається використання формату даних, визначеного користувачем, дані, що передаються на фізичному та каналному рівні протоколу зв'язку, повинні бути у стандартизованих форматах для усунення складних перетворень між різними протоколами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lee, J., Kao, H.-A. & Yang, S., 2014. Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. *Procedia Cirp*, 16, 3-8.
2. Frank, A. G., Dalenogare, L. S. & Ayala, N. F., 2019. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26.
3. Machado, C. G., Winroth, M. P. & Ribeiro da Silva, E. H. D., 2020. Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, 58, 1462-1484.
4. Correa, J. E., Toombs, N. & Ferreira, P. M., 2017. A modular-architecture controller for CNC systems based on open-source electronics. *Journal of Manufacturing Systems*, 44, 317-323.
5. Spena, P. R., Holzner, P., Rauch, E., Vidoni, R. & Matt, D. T., 2016. Requirements for the Design of flexible and changeable Manufacturing and Assembly Systems: a SME-survey. *Procedia Cirp*, 41, 207-212.
6. Bejlegaard, M., Brunoe, T. D., Bossen, J., Andersen, A.-L. & Nielsen, K., 2016. Reconfigurable manufacturing potential in small and medium enterprises with low volume and high variety: pre-design evaluation of RMS. *Procedia Cirp*, 51, 32-37.
7. Nevliudov, I., Razumov-Fryziuk, I., Yevsieiev, V., Nikitin, D., Blyzniuk, D., & Strelets, R. (2022). Cost estimation of photopolymer resin for 3D exposure of circuit boards. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(2(64)), 43–49. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256538>
8. Моделі та методи кіберфізичних виробничих систем в концепції Industry 4.0 : монографія / І. Ш. Невлюдов, В. В. Євсєєв, А. О. Андрусевич, С. С. Максимова ; – Oktan Print – Prague. 2023. – 321 с.

Науковий керівник: Разумов-Фризюк Євгеній Анатолійович, доцент кафедри КІТАМ, кандидат технічних наук, ХНУРЕ

УДК 37.013.32

ІННОВАЦІЇ ТА ДОСЯГНЕННЯ В ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ: ФОРМУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА

О.О. Зибенко

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: oleksandr.zybenko@nure.ua

Анотація: Серед виробничих технологій, що розвиваються, технологія електроерозійної обробки (ЕЕО) виділяється як ключовий елемент у сфері комп'ютерно-інтегрованих процесів. Ця технологія, відома своєю точністю та універсальністю, відіграє вирішальну роль у формуванні сучасних методологій виробництва. Цей огляд має на меті пролити світло на останні досягнення та інновації в ЕЕО, наголошуючи на їх інтеграції з автоматизованим виробництвом і проектуванням, а також на їх вплив на майбутнє промислового виробництва.

Ключові слова: електроерозійна обробка, комп'ютерно-інтегроване виробництво, точне машинобудування, передові технології виробництва.

INNOVATIONS AND ADVANCEMENTS IN ELECTRICAL DISCHARGE PROCESSING: SHAPING THE FUTURE OF COMPUTER-INTEGRATED MANUFACTURING

O. Zybenko

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av., 14

E-mail: oleksandr.zybenko@nure.ua

Annotation: In the evolving landscape of manufacturing technology, electrical discharge machining (EDM) stands out as a pivotal element in the realm of computer-integrated processes. This technology, renowned for its precision and versatility, plays a crucial role in shaping modern manufacturing methodologies. This review aims to shed light on the recent advancements and innovations in EDM, emphasizing their integration with computer-aided manufacturing and design, and their implications for the future of industrial production.

Key words: electrical discharge machining, computer-integrated manufacturing, precision engineering, advanced manufacturing technologies.

Технологія електроерозійної обробки (ЕЕО), яка бере початок у середині 20 століття, зазнала значних змін, щоб відповідати вимогам точного машинобудування. За своєю суттю ЕЕО передбачає використання електричних розрядів для обробки твердих металів і сплавів, якими інакше важко маніпулювати. Ця технологія знайшла свою нішу в різних галузях, починаючи від аерокосмічної та закінчуючи мікроелектронікою, завдяки своїй здатності створювати складні конструкції з надзвичайною точністю.

Шлях ЕЕО від нішевої техніки до наріжного каменю сучасного виробництва відзначений постійними інноваціями та інтеграцією з системами автоматизованого проектування (CAD) і автоматизованого виробництва (CAM). Цей симбіоз розкрив нові можливості у виробництві, створивши більш складні, точні та ефективні виробничі процеси.

Електроерозійна обробка за останні роки зазнала значних інновацій. Ці досягнення не тільки розширили можливості ЕЕО, але й сферу її застосування в різних галузях

промисловості. Розглянемо деякі з найбільш значущих останніх досягнень в електроерозійній обробці.

- Високоточна ЕЕО: останні інновації зосереджені на підвищенні точності ЕЕО. Удосконалення алгоритмів керування та конструкції верстатів дозволило досягти більш точних допусків і чистоти поверхні. Це особливо корисно в таких галузях, як аерокосмічна промисловість і виробництво медичного обладнання, де точність має першорядне значення.

- Інтеграція з системами CAD/CAM: Інтеграція електроерозійних верстатів з системами автоматизованого проектування (CAD) і автоматизованого виробництва (CAM) змінила правила гри. Ця інтеграція дозволяє безперешкодно переходити від проектування до виробництва, зменшуючи кількість помилок і підвищуючи ефективність. Вдосконалене програмне забезпечення тепер дозволяє більш точно моделювати процес електроерозійної обробки, прогножуючи потенційні проблеми ще до початку обробки.

- Автоматизовані процеси електроерозійної обробки: Автоматизація в електроерозійній обробці значно підвищила продуктивність і узгодженість. Наприклад, автоматичні пристрої для зміни інструменту зменшують час простою та підвищують швидкість виробництва. Інтеграція робототехніки в системи електроерозійної обробки дозволяє виконувати операції без нагляду або з мінімальним наглядом, що є значним зрушенням у порівнянні з традиційно трудомістким процесом.

- Екологічні інновації: Останні досягнення спрямовані на те, щоб зробити ЕЕО більш стійкою до впливу на довкілля. Інновації включають зниження енергоспоживання та розробку більш екологічних діелектричних рідин, які мінімізують вплив на навколишнє середовище без шкоди для продуктивності.

- Різноманітність матеріалів та адаптивність: Удосконалення технології електроерозійної обробки розширило сферу її застосування до ширшого спектру матеріалів. Інновації в матеріалах електродів і параметрах процесу дозволяють електроерозійній обробці ефективно працювати з різними металами і сплавами, що робить її універсальним інструментом у виробничому секторі.

Кожне з цих досягнень не тільки являє собою стрибок вперед у технології електроерозійної обробки, але й підкреслює динамічний характер виробничих процесів в епоху цифрової інтеграції та сталого розвитку.

Теоретичні досягнення в електроерозійній обробці найкраще зрозуміти через практичне застосування. Нижче представлено добірку тематичних досліджень і прикладів, які висвітлюють трансформаційний вплив останніх інновацій в електроерозійній обробці в різних галузях промисловості.

- Виробництво аерокосмічних компонентів: Провідна аерокосмічна компанія нещодавно впровадила високоточний електроерозійний верстат для виробництва складних компонентів двигунів. Підвищена точність дозволила створювати компоненти зі складною геометрією і жорсткими допусками, раніше недосяжними для традиційних методів обробки. Ця інновація не лише покращила продуктивність двигунів, але й сприяла підвищенню паливної ефективності та зменшенню викидів.

- Виробництво медичного обладнання: У медичному секторі виробник ортопедичних імплантатів використовував автоматизовані процеси електроерозійної обробки для підвищення продуктивності при збереженні стандартів якості. Автоматизація електроерозійної обробки дозволила точно створювати складні форми імплантатів, що призвело до кращих результатів лікування пацієнтів і більш ефективних хірургічних процедур.

- Виготовлення інструментів та штампів на замовлення: Виробник інструментів і штампів продемонстрував інтеграцію електроерозійної обробки з CAD/CAM-системами для виробництва індивідуальних штампів для автомобільної промисловості. Можливість прямого

357

перекладу файлів дизайну в інструкції з обробки зменшила кількість помилок і значно скоротила терміни виробництва.

– Екологічно чистий електроерозійний верстат у виробництві електроніки: Компанія з виробництва електроніки продемонструвала використання екологічно чистих інновацій в електроерозійній обробці. Використовуючи сучасні діелектричні рідини та енергоефективні верстати, компанія змогла зменшити свій вплив на навколишнє середовище, зберігаючи при цьому високі стандарти якості у виробництві електронних компонентів.

– Адаптація електроерозійної обробки для нових матеріалів: Науково-дослідна установа дослідила використання електроерозійної обробки для обробки композитних матеріалів, які все частіше застосовуються у високопродуктивному обладнанні. Дослідження показало, як модифікація параметрів електроерозійної обробки дозволила ефективно та якісно обробляти ці складні матеріали, відкриваючи нові можливості в матеріалознавстві та інженерії.

Ці приклади не лише демонструють універсальність та ефективність останніх досягнень електроерозійної обробки, але й підкреслюють вирішальну роль цієї технології у розширенні меж сучасного виробництва.

Досягнення в електроерозійній обробці мають далекосяжні наслідки для обробної промисловості та інших галузей. Розглянемо ширший вплив цих інновацій та те, як вони змінюють ландшафт виробництва та дизайну.

– Підвищення точності та ефективності виробництва: Підвищення точності та ефективності, спричинене досягненнями в електроерозійній обробці, значно підвищило стандарти виробництва. Особливо виграли такі галузі, як аерокосмічна та медична, де точність має вирішальне значення. Можливість виробляти складну геометрію з високою точністю призвела до появи більш надійних і високопродуктивних продуктів.

– Сприяння кастомізації та гнучкості: Інтеграція електроерозійних верстатів з системами CAD/CAM і досягнення в області автоматизації дозволили підвищити індивідуальність і гнучкість виробництва. Така адаптивність має вирішальне значення на сучасному ринку, де все більшим попитом користуються персоналізовані та адаптовані продукти.

– Сприяння сталому розвитку виробничих практик: Екологічні інновації в електроерозійній обробці, такі як енергоефективні верстати та покращені діелектричні рідини, сприяють більш стійким виробничим практикам. Цей зсув не лише корисний для довкілля, але й відповідає зростаючому глобальному акценту на сталості промислових процесів.

– Розширення матеріальних горизонтів: Здатність електроерозійної обробки ефективно обробляти ширший спектр матеріалів розширила сферу її застосування. Ця адаптивність відкриває нові можливості в матеріалознавстві, дозволяючи досліджувати і використовувати нові матеріали в різних галузях промисловості.

– Наслідки для робочої сили і навчання: З розвитком і автоматизацією технологій електроерозійної обробки зростає потреба у кваліфікованих кадрах, здатних експлуатувати й обслуговувати ці складні системи. Така еволюція вимагає оновлення навчальних програм з виробничих та інженерних дисциплін.

– Вплив на майбутні технологічні розробки: Постійні інновації в області ЕЕО створюють основу для майбутніх технологічних розробок у виробництві. У міру розвитку технології ЕЕО вона, ймовірно, стимулюватиме подальший прогрес у суміжних галузях, сприяючи створенню середовища для постійного вдосконалення та інновацій.

Цей вплив демонструє, що досягнення в галузі ЕЕО - це не лише технологічний прогрес, а й зміна парадигми підходу до виробництва, що впливає на ефективність, сталість та інновації.

Попри те, що досягнення в галузі ЕЕО стали трансформаційними, вони також ставлять нові виклики та створюють основу для майбутніх напрямків досліджень і розробок. Розглянемо

перешкоди, з якими наразі стикаються у сфері електроерозійної обробки, а також шляхи, якими можуть піти майбутні інновації.

– Технологічні обмеження: Незважаючи на прогрес, в електроерозійній обробці все ще існують технологічні обмеження, особливо щодо швидкості обробки та обробки дуже складної геометрії. Тривають дослідження, спрямовані на підвищення швидкості процесів електроерозійної обробки без шкоди для точності та якості поверхні.

– Проблеми з матеріалами: Оскільки діапазон матеріалів, що використовуються в промисловості, розширюється, перед електроерозійною обробкою постає завдання адаптації до цих нових матеріалів, кожен з яких має унікальні властивості та вимоги до обробки. Майбутні дослідження в галузі електроерозійної обробки повинні бути зосереджені на розробці універсальних методів, які можуть ефективно обробляти широкий спектр матеріалів, включаючи сучасні композитні матеріали та суперсплави.

– Екологічні проблеми: Незважаючи на значний прогрес у підвищенні екологічності електроерозійної обробки, все ще існують проблеми, пов'язані з використанням діелектричних рідин та споживанням енергії. Майбутні інновації повинні бути зосереджені на розробці більш стійких процесів електроерозійної обробки, включаючи використання альтернативних, екологічно чистих діелектриків та енергоефективних технологій.

– Інтеграція з новими технологіями: Інтеграція ЕЕО з новими технологіями, такими як штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання (МН), є одночасно і викликом, і можливістю. ШІ та МН можуть революціонізувати ЕЕО завдяки оптимізації параметрів обробки та прогнозуванню результатів, але інтеграція цих технологій в існуючі фреймворки ЕЕО є складним завданням.

– Дефіцит кваліфікованої робочої сили: з розвитком технологій ЕЕО зростає потреба у кваліфікованих технічних спеціалістах та інженерах, які розуміються як на технічних, так і на обчислювальних аспектах ЕЕО. Усунення цього розриву в навичках має вирішальне значення для подальшого розвитку і застосування технології ЕЕО.

– Майбутні напрямки досліджень: Майбутні дослідження в галузі ЕЕО, найімовірніше, будуть зосереджені на підвищенні ефективності процесів, розширенні можливостей матеріалів, інтеграції з цифровими технологіями та вирішенні проблем впливу на довкілля. Ці напрямки досліджень не лише сприятимуть розвитку технології, але й утримуватимуть її на передовій виробничих інновацій [1-5].

Вивчення останніх досягнень в електроерозійній обробці показує, що це динамічна технологія, яка розвивається і має вирішальне значення для майбутнього комп'ютерно-інтегрованих виробничих процесів. Ці інновації, від високоточної обробки до інтеграції з системами CAD/CAM, автоматизації, екологічності та адаптивності матеріалів, значно розширили можливості та сфери застосування електроерозійної обробки.

Ці досягнення не лише підвищили ефективність і точність у таких галузях, як аерокосмічна промисловість і виробництво медичних приладів, а й відкрили нові можливості для кастомізації та сталих виробничих практик. Представлені дослідження підкреслюють практичне значення цих інновацій, демонструючи їхній трансформаційний вплив у різних галузях.

Однак шлях розвитку електроерозійної обробки не позбавлений викликів. Технологічні обмеження, матеріальні виклики, екологічні проблеми та інтеграція з новими цифровими технологіями є сферами для постійних досліджень і розробок. Вирішення цих проблем має вирішальне значення для підтримання імпульсу інновацій у сфері ЕЕО та забезпечення її постійної актуальності у виробничому ландшафті.

Забігаючи наперед, можна сказати, що майбутнє ЕЕО пов'язане з подальшим розвитком, зокрема, з підвищенням ефективності процесів, розширенням можливостей використання

матеріалів та інтеграцією зі штучним інтелектом і машинним навчанням. Ці розробки не лише вдосконалять технологію ЕЕО, але й сприятимуть розширенню сфери виробництва, встановлюючи нові стандарти точності, універсальності та стійкості.

На завершення слід зазначити, що досягнення в галузі електроерозійної обробки є значним стрибком вперед у виробничих технологіях. Сприймаючи ці інновації, треба також усвідомлювати що попереду ще багато досліджень, розробок та адаптацій, які обіцяють захоплююче майбутнє для ЕЕО та її застосування в різних галузях промисловості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Arif U., Ali Khan I., Hassan F. Green and sustainable electric discharge machining: a review. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2022. P. 1–75. URL: <https://doi.org/10.1080/2374068x.2022.2108599> (date of access: 23.11.2023).

2. Improvement of process performance of powder mixed electrical discharge machining by optimisation -A Review / S. Singh et al. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2021. P. 1–31. URL: <https://doi.org/10.1080/2374068x.2021.1945300> (date of access: 23.11.2023).

3. Kumar D., Bajpai V., Singh N. K. Nano electrical discharge machining – the outlook, challenges, and opportunities. *Materials and Manufacturing Processes*. 2021. P. 1–35. URL: <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1905832> (date of access: 23.11.2023).

4. Recently evaluated Electrical Discharge Machining (EDM) process performances: A research perspective / D. Gouda et al. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 44. P. 2087–2092. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.180> (date of access: 23.11.2023).

5. Shabgard M. R., Gholipour A., Baseri H. A review on recent developments in machining methods based on electrical discharge phenomena. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 87, no. 5-8. P. 2081–2097. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8554-z> (date of access: 23.11.2023).

Науковий керівник: *Разумов-Фризюк Євгеній Анатолійович, доцент кафедри КІТАМ, кандидат технічних наук, ХНУРЕ.*

УДК 681.5:004.89

РОЗУМНИЙ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИЙ ВЕРСТАТ

Зибенко О.О.

Науковий керівник – к.т.н., доц. Разумов-Фризиук Є.А.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. КІТАМ,
м. Харків, Україна

тел. +38(095) 872-36-93, e-mail: oleksandr.zybenko@nure.ua.

Wire EDM is a time-consuming process that requires several costly consumables, such as wire, filters, and deionization resin. By using a developed model, such as intelligent software, which is based on machining history and sensor inputs, we can predict the status and future capacity of consumables and worn parts, and therefore avoid machine downtimes. The implementation of a predictive model for estimating the lifetime of consumables and worn parts is a significant step towards the automation of wire EDM machines.

Сучасна обробна промисловість переживає важливу трансформацію, яку називають четвертою революцією. Вона характеризується тим, що машини мають певний інтегрований рівень «інтелекту», який дозволяє їм автономно контролювати свої процеси та спілкуватися з навколишнім середовищем. Ці інтелектуальні машини оснащені безліччю датчиків і здатні забезпечувати якість продукції, шляхом коригування дій, як наприклад самооптимізація параметрів процесу. Вони можуть відстежувати свій власний статус і виявляти фактичні або майбутні несправності та звернутися до служби технічного обслуговування або замовити заміну витратних матеріалів, а також виконувати самодіагностику та налаштовувати себе відповідно до завдань обробки. У виробничому середовищі з декількома підключеними машинами, вони можуть вибирати найоптимальніші завдання з точки зору якості та кількості, враховуючи їхню потужність.

Електроерозійні верстати, зокрема дротяні, вже мають високу комп'ютеризацію та безліч датчиків, які контролюють різні фізичні параметри процесу. Ці машини також дуже чутливі до змін параметрів через знос деталей машини, або термін експлуатації витратних компонентів, таких як фільтри, деіонізаційна смола, вода тощо. Насправді, сучасні електроерозійні верстати працюють до 8000 годин на рік, а головне завдання оператора полягає в заміні зношених частин та витратних матеріалів протягом дня, щоб забезпечити безперебійну роботу машини вночі або у вихідні дні. Інтелектуальне управління технічним обслуговуванням в рамках Індустрії 4.0 відіграє важливу роль у скороченні витрат, запобігаючи простою або ремонту машин [1]. У даний час, щоб уникнути поломок верстата під час роботи без обслуговуючого персоналу, часто зношувані частини та витратні матеріали, такі як фільтри або деіонізаційна смола, «про всякий випадок» замінюються ще до досягнення

максимального терміну служби. Витрати на витратні матеріали та деталі, що швидко зношуються, легко можуть перевищити інвестиційну вартість верстата через короткий період (наприклад, 1-2 роки роботи). На жаль, досі не існує простого методу та алгоритму прогнозування терміну служби витратних матеріалів і деталей, що зношуються, і вже через короткий період механічної обробки, наприклад алюмінію, може знадобитися заміна фільтрів. Однак користувачі електроерозійних верстатів мають величезний попит на надійні моделі прогнозування, як для зменшення витрат шляхом найкращого використання витратних ресурсів, так і для уникнення поломки машини.

Щоб побудувати таку модель прогнозування, потрібне фундаментальне розуміння фізики та хімії, пов'язаної з процесом електроерозійної обробки. Щоб адаптувати існуючі загальні моделі, наприклад, падіння тиску на фільтри до конкретного завдання електроерозійної обробки, необхідно проводити експериментальні вимірювання параметрів моделі. Розроблена модель повинна бути здатна відстежувати фактичний стан витратних матеріалів і прогнозувати строк їх служби для виконання запланованих завдань обробки. Своєчасне вимірювання параметрів під час поточної обробки дозволить оновлювати прогнози та оптимізувати параметри моделі з метою її покращення[2].

Отже, розумні електроерозійні верстати можуть бути важливим елементом в системі Індустрії 4.0, яка має на меті підвищення ефективності та продуктивності виробництва. За допомогою автоматизації та використання інноваційних технологій, електроерозійна обробка може стати більш точною та ефективною, що дозволить виробництву бути конкурентоспроможним та успішним в умовах існуючої ринкової конкуренції.

Список використаних джерел:

1. Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
2. Wälder, G., Fulliquet, D., Foukia, N., Jaquenod, F., Lauria, M., Rozsnyo, R., Lavazais, B., & Perez, R. (2018). Smart wire EDM machine. *Procedia CIRP*, 68, 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.032>

ДОДАТОК Б

Графічний демонстраційний матеріал

