

Н. О. ГОРОХІВСЬКИЙ

аспірант кафедри машинобудування
Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені Степана Гжицького
ORCID: 0009-0004-8644-7053

В. М. ВЛАСОВЕЦЬ

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри машинобудування
Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені Степана Гжицького
ORCID: 0000-0002-6657-6761

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ У РОБОТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ

Стаття присвячена дослідженню сучасних підходів до забезпечення якості обробки складнопрофільних деталей за допомогою роботизованих виробничих систем, зосереджуючись на інноваційному процесі інтелектуального роботизованого формування. В статті було розглянуто інтеграцію сенсорних систем, штучного інтелекту та зворотного зв'язку сил для адаптивної обробки деталей у реальному часі, що дозволяє досягти високої геометричної точності без додаткових етапів калібрування. У контексті переходу до інтелектуального виробництва, де зростає потреба у високоточній обробці складнопрофільних деталей для авіаційної, космічної та оборонної промисловостей, роботизовані виробничі системи набувають ключового значення завдяки їхній здатності забезпечувати гнучкість, адаптивність і високу якість обробки. Застосовувалися методи офлайн-програмування та алгоритми штучного інтелекту для планування траєкторій і кореляції між силами та геометрією. Метою дослідження є дослідження інтелектуальних процесів роботизованого формування для обробки складнопрофільних деталей, що забезпечує адаптивну реакцію на мінливість матеріальних властивостей. Наукова новизна полягає в обґрунтуванні використання інтелектуального процесу iRoRoFo, який інтегрує випрямлення на основі валків у цикл формування, використовуючи зворотний зв'язок сил для визначення геометрії в реальному часі без оптичних вимірювань. Запропоновано сенсорне рішення, що базується на алгоритмах штучного інтелекту, для обробки складних залежностей між силовими даними та геометричними параметрами, що є новаторським для роботизованих систем. Розроблений процес iRoRoFo продемонстрував здатність адаптивно коригувати геометрію деталей у реальному часі, забезпечуючи відповідність проектним параметрам. Використання силового зворотного зв'язку дозволило усунути потребу в складних оптичних системах, а інтеграція штучного інтелекту забезпечила точну кореляцію між виміряними силами та результуючою геометрією. Результати підтверджують перспективність підходу для обробки складнопрофільних деталей, відкриваючи можливості для масштабування в поточних промислових умовах.

Ключові слова: роботизовані виробничі системи, складнопрофільні деталі, інтелектуальна обробка, офлайн-програмування, сенсорний контроль, адаптивне керування.

N. O. HOROKHIVSKYI

Postgraduate Student at the Department of Mechanical Engineering
Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine
and Biotechnologies of Lviv
ORCID: 0009-0004-8644-7053

V. M. VLASOVETS

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Mechanical Engineering
Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine
and Biotechnologies of Lviv
ORCID: 0000-0002-6657-6761

ANALYSIS OF MODERN APPROACHES TO QUALITY ASSURANCE OF COMPLEX PARTS
IN ROBOTIC PRODUCTION SYSTEMS

The article is devoted to the study of modern approaches to ensuring the quality of processing of complex parts using robotic manufacturing systems, focusing on the innovative process of intelligent robotic molding. The article considered the integration of sensor systems, artificial intelligence and force feedback for adaptive processing of parts in real time, which allows achieving high geometric accuracy without additional calibration stages. In the context of the transition to intelligent manufacturing, where the need for high-precision processing of complex parts for the aviation, space and defense industries is growing, robotic manufacturing systems are gaining key importance due to their ability to provide flexibility, adaptability and high quality processing. Offline programming methods and artificial intelligence algorithms were used to plan trajectories and correlate forces and geometry. The aim of the study is to study intelligent processes of robotic molding for processing complex parts, which provides an adaptive response to the variability of material properties. The scientific novelty lies in the justification of the use of the intelligent iRoRoFo process, which integrates roll-based straightening into the forming cycle, using force feedback to determine the geometry in real time without optical measurements. A sensor solution based on artificial intelligence algorithms is proposed to process complex dependencies between force data and geometric parameters, which is innovative for robotic systems. The developed iRoRoFo process demonstrated the ability to adaptively adjust the geometry of parts in real time, ensuring compliance with design parameters. The use of force feedback eliminated the need for complex optical systems, and the integration of artificial intelligence provided an accurate correlation between the measured forces and the resulting geometry. The results confirm the promising approach for processing complex-profile parts, opening up opportunities for scaling in current industrial conditions.

Key words: robotic manufacturing systems, complex parts, intelligent machining, offline programming, touch control, adaptive control.

Постановка проблеми

Інтенсифікація розвитку машинобудівної галузі формує актуальне питання забезпечення високої якості механічної обробки складнопрофільних деталей, що потребує застосування передових технологій, здатних адаптуватися до складної геометрії та змінних умов виробництва. Із зростанням вимог до точності, функціональності й експлуатаційної надійності деталей, зумовлених високими стандартами сучасної інженерії, виникає необхідність у впровадженні нових технологічних підходів, які б забезпечували не лише стабільну якість продукції, але й ефективне використання матеріальних, часових та енергетичних ресурсів.

У традиційному виробничому процесі значна увага приділяється створенню масових партій деталей із незмінною геометрією, що передбачає використання важкого, часто дорогого обладнання та складних інструментів. Проте сучасні виклики, серед яких домінують зростання індивідуалізації продукції, високий рівень конкуренції та необхідність адаптації до мінливих вимог ринку, вимагають від підприємств гнучкості в організації механічної обробки деталей. У цьому контексті надзвичайно актуальним стає впровадження роботизованих виробничих систем, які здатні забезпечити належний рівень якості обробки, зберігаючи при цьому гнучкість, продуктивність та технологічну надійність процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сьогодні певна частина навкових робіт Єпіфанова І. [2], Січіліано Б., Ш'явікко Л., Віллані Л., Оріоло Г. [15] акцентує увагу на перевагах візуального сервоуправління як одного з ефективних засобів адаптивного керування, що забезпечує підвищену гнучкість, точність позиціонування, стійкість до зовнішніх перешкод, зокрема шумів сенсорів та недоліків калібрування, а також дає змогу оперативно реагувати на зміни у навколишньому виробничому середовищі.

Попри ефективність зазначеної методики, її практичне застосування у сфері точного складання або обробки складнопрофільних деталей стикається з певними викликами, зокрема недостатнім рівнем точності позиціонування, що особливо критично при роботі з малими зазорами між компонентами. У зв'язку з цим, в публікаціях авторства Македон В., Байлова О. [3], Яковенко І., Пермяков О., Ільїн Д., Басова Є., Горбулик В. [6], було акцентовано увагу на важливості поєднання візуального керування з технологіями контролю сили контакту, як на основі класичних пасивних механізмів, таких як елементи з віддаленим центром податливості (RCC), так і завдяки впровадженню активних систем, зокрема імпедансного керування в декартовому просторі.

Дослідницькі роботи Джао С., Ван Х., Чжан С. [10], Райлат М., Франко Е., Елмоакет Х., Алмтірін Н., Аль-Рефаї Г. [14] пропонують широкий спектр стратегій вирівнювання та складання деталей, що варіюються від простих, але ефективних алгоритмів без моделі, до складних рішень із використанням онлайн-моніторингу контактного стану. В контексті обробки складнопрофільних деталей, де кожна поверхня потребує індивідуального підходу, значна увага приділяється офлайн-плануванню, яке дозволяє, на основі попереднього аналізу CAD-моделі, згенерувати набір оптимізованих траєкторій та параметрів відповідності. Певна маса наукових праць, як то Новіков Ф. [5] та Лікардо Дж. Т., Дом'ян М., Ореховачки Т. [11] фокусується на дослідженні інтегрованих підходів, де машинне бачення поєднується зі зворотним силовим зв'язком та адаптивними алгоритмами, що сприяє підвищенню точності, стабільності й ефективності при виконанні обробних та складальних операцій.

Формулювання мети дослідження

Мета статті – дослідити та обґрунтувати сучасні підходи до покращення якості обробки складнопрофільних деталей роботизованими системами, зокрема через інтелектуальні алгоритми, сенсорний контроль, офлайн-програмування та адаптацію до умов цифрової промисловості.

Викладення основного матеріалу дослідження

В умовах переходу до інтелектуального виробництва роботизовані системи механічної обробки демонструють новий рівень технологічної досконалості, що досягається завдяки інтеграції промислових роботів, багатоканальних сенсорних модулів, машинного навчання та хмарних аналітичних платформ. Такі системи здатні самостійно сприймати інформацію про навколишнє виробниче середовище, оцінювати параметри обробки в реальному часі, прогнозувати зміну технологічних умов та адаптувати траєкторії обробки без втручання оператора [1, с. 50]. Виділені позиції відкривають нові перспективи для обробки складнопрофільних деталей, де традиційні методи втрачають свою ефективність через обмеження у гнучкості, повторюваності або точності (табл. 1).

Таблиця 1

Перспективні технології і процеси роботизованої обробки складнопрофільних деталей

Технологія/Процес	Опис	Перспективи розвитку
1. Інтелектуальне програмування	Використання ПЗ для автоматизованого створення програм обробки складних деталей	Розробка адаптивного ПЗ із застосуванням ШІ для оптимізації траєкторій і зменшення часу програмування
2. Точне калібрування	Забезпечення високої точності позиціонування роботів через калібрування систем	Удосконалення методів автоматичного калібрування з використанням сенсорів і зовнішніх систем відстеження
3. Планування траєкторії	Оптимізація руху інструменту для підвищення ефективності обробки	Впровадження технологій обробки з двома роботами та планування на основі динамічної жорсткості
4. Керування силою обробки	Регулювання зусиль для забезпечення якості поверхні та мінімізації вібрацій	Розвиток адаптивного керування імпедансом для фінішної обробки складних деталей
5. Компенсація вібрацій	Зменшення регенеративних і модальних вібрацій під час обробки	Створення детальних моделей вібрацій із модальним зв'язком і стратегій активного поглинання вібрацій
6. Мобільна робототехніка	Використання мобільних роботів для обробки великих деталей	Інтеграція SLAM і співпраця кількох роботів для обробки складних конструкцій
7. Високоточне шліфування	Роботизоване шліфування та полірування великих деталей із контролем припуску	Розвиток онлайн-вимірювань і програмного забезпечення для обробки хмар точок із слабкими ознаками
8. Оптимізація жорсткості	Посилення технологічної системи через допоміжну підтримку та позиціонування	Впровадження методів прогнозування помилок і компенсації на основі сенсорів у реальному часі
9. Адитивне та субтрактивне виробництво	Інтеграція адитивних і субтрактивних процесів у роботизованих системах	Розробка реконфігурованих функціональних блоків для обробки тонкостінних деталей
10. Моніторинг у реальному часі	Контроль стану обробки та компенсація відхилень під час роботи	Впровадження архітектури передачі даних і демпфіруючого обладнання для комплексної оптимізації

Джерело: сформовано на основі [7, 16].

У цьому контексті все більшого значення набуває використання роботизованих виробничих систем, які демонструють високу здатність до масштабування, простоту реконфігурації та інтеграцію з інтелектуальними технологіями управління, зокрема в умовах багатороботної співпраці. Саме роботизовані системи здатні забезпечити ефективну координацію декількох виконавчих механізмів у межах одного технологічного процесу, що відкриває перспективи для створення комплексних платформ, здатних одночасно виконувати функції обробки, вимірювання, моніторингу та автоматичного контролю якості (рис. 1).



Рис. 1. Інтелектуальна система контролю якості обробки складнопрофільних деталей із використанням роботизованої камери IntACom [9]

Особливе значення роботизовані системи набувають у галузях, де домінує виготовлення деталей з високими вимогами до геометричної точності та чистоти поверхні при одночасній потребі в індивідуалізованому підході до кожного виробу як, наприклад, в авіаційній, космічній або оборонній промисловості. У таких випадках традиційні методи механічної обробки не завжди спроможні забезпечити належний рівень якості, особливо при наявності нерівномірних припусків, складних контурів або нестандартних форм. Інтеграція технологій комп'ютерного зору, сенсорних систем вимірювання сили та машинного навчання у структуру роботизованих виробничих комплексів дозволяє створювати інтелектуальні системи, які здатні виконувати обробку в автономному режимі, із самостійним визначенням параметрів, плануванням траєкторії, оцінкою результатів і коригуванням дій у реальному часі [12, с. 52].

Наголос у сучасних дослідженнях, присвячених обробці складнопрофільних деталей за допомогою роботизованих систем, зміщується у бік забезпечення високого рівня інтелектуалізації, здатності до самонавчання та швидкої адаптації до змінних виробничих умов. Однак, поряд із перевагами, такі системи все ще стикаються з низкою технологічних викликів, зокрема пов'язаних із недостатньою жорсткістю конструкції, залежністю динамічних характеристик від положення в просторі та труднощами стабілізації траєкторії при обробці деталей складної геометрії. Вирішення цих проблем потребує комплексного підходу до оптимізації параметрів конструкції роботів, удосконалення алгоритмів управління рухом, точного калібрування систем, а також застосування новітніх методів прогнозування та компенсації коливань, які виникають у процесі обробки [4, с. 81]. У процесі забезпечення високої точності та якості обробки складнопрофільних деталей важливою передумовою ефективної роботи роботизованих виробничих систем є точне планування траєкторій руху виконавчих механізмів, що реалізується, зокрема, під час попередньої перевірки геометрії поверхонь. Хоча однією з можливих процедур налаштування шляхів сканування є використання навчального пульта керування роботом, такий підхід виявляється надзвичайно трудомістким і неефективним при роботі з деталями складної геометричної конфігурації. Натомість застосування офлайн-програмування (OLP) дозволяє значно прискорити цей процес, мінімізувати помилки, а також досягти вищого ступеня автоматизації та повторюваності виробничих дій (рис. 2).

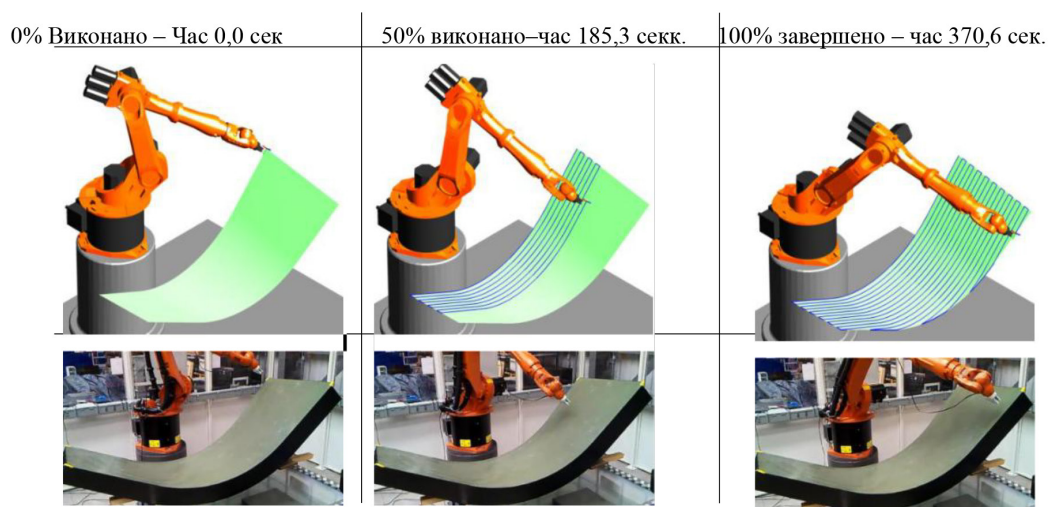


Рис. 2. Віртуальна роботизована комірка з деталлю складної геометрії та згенерованими траєкторіями обробки [8]

Оптимальним варіантом вважається застосування програмних рішень, які забезпечують інтеграцію CAD-моделі деталі у віртуальне середовище для визначення зон контролю, після чого відповідне програмне забезпечення автоматично формує оптимальні траєкторії руху для інструментів або сенсорів роботизованої системи. Реалізація офлайн-програмування може здійснюватися як за допомогою вже наявного комерційного ПЗ для моделювання та програмування, так і через створення власних алгоритмів побудови шляхів з урахуванням специфіки геометрії деталей. Такі цифрові платформи дозволяють сформувати віртуальну виробничу комірку, яка включає в себе як роботизовані маніпулятори, так і модель деталі, що підлягає обробці [17].

Головним функціональним компонентом програмного забезпечення є можливість імпортувати геометричні дані в форматі STL, після чого запускається процедура обробки CAD-моделі, що передбачає перенесення координатної сітки деталі у простір сканування та її узгодження з системою координат скануючих траєкторій. Завантажені 3D-моделі далі проходять етап сегментації поверхні, в ході якого система ідентифікує окремі поверхні деталі, об'єднуючи грані з близькими координатами в логічні групи (рис. 3).

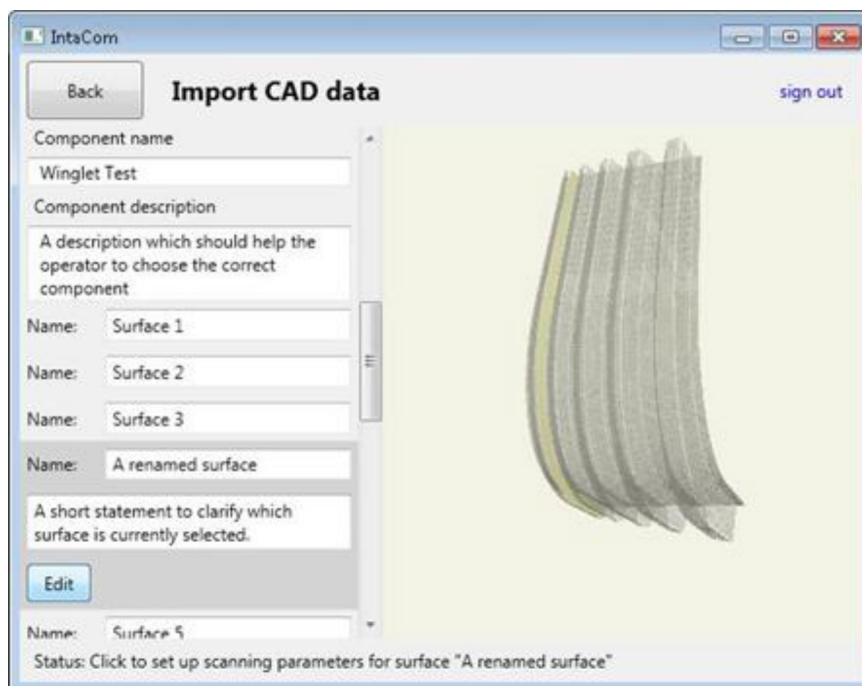


Рис. 3. Інтерфейс імпорту геометричних даних CAD-моделі для побудови траєкторій обробки складнопрофільної деталі [8]

Подібний варіант поділу досягається за допомогою двофазного алгоритму: на першому етапі формується індексований список унікальних координат вузлів та їх прив'язка до граней, а на другому вже виконується рекурсивна побудова груп граней, пов'язаних через спільні вузли. В результаті цього процесу формується структурована геометрична модель із чітко визначеними поверхнями, кожна з яких може бути використана як окрема область для проведення сканування або подальшої механічної обробки [5, с. 167]. Таке технічне рішення формує засади для підвищення якості сканування поверхонь, і також ще значно оптимізувати час на підготовку технологічних операцій, що особливо важливо в умовах роботи з індивідуалізованими або дрібносерійними замовленнями.

Подальший збір технологічних даних реалізується шляхом синхронізованої взаємодії між координованими сигналами зворотного зв'язку від роботизованих виконавчих пристроїв та інформацією, отриманою від сенсорів ультразвукового контролю. Злагоджена робота цих джерел інформації вимагає стабільної та високопродуктивної обчислювальної платформи, оскільки будь-яка затримка у передачі сигналів може призвести до втрати ділянок даних, а отже і до зниження загальної якості обробки й контролю [11].

У контексті забезпечення якості обробки складнопрофільних деталей при використанні роботитів, певну увагу приділемо адаптації технологічних процесів до мінливості властивостей матеріалів, зокрема профілю залишкових напруг у металопрокатних заготовках, який може значно варіюватися від однієї деталі до іншої і є складним для прогнозування до початку обробки. Для вирішення цієї проблеми розробляється інноваційний процес інтелектуального роботизованого формування (iRoRoFo), який передбачає здатність системи оперативного реагувати на поведінку матеріалу конкретної деталі в реальному часі, що дозволяє досягти високої точності геометричних параметрів без необхідності додаткових етапів калібрування (рис. 4).

На відміну від традиційних методів формування валками, які зазвичай базуються на жорстко фіксованих параметрах і потребують завершального геометричного виправлення, роботизовані системи з високим ступенем свободи вимагають розробки стратегій динамічної компенсації відхилень безпосередньо під час процесу, що забезпечує інтеграцію етапу випрямлення на основі валків у загальний цикл формування, спрямований на досягнення кінцевої геометрії, визначеної проектними кресленнями.

Ключовою особливістю цього підходу є використання алгоритмів штучного інтелекту для обробки складних даних, зокрема для кореляції між вимірними силами та результуючою геометрією деталі, що є важливим через неможливість прямого аналітичного розрахунку таких залежностей. У рамках дослідження розроблено сенсорне рішення, яке базується на зворотному зв'язку сил, отриманих від роботизованої системи, для визначення геометрії деталі на будь-якому етапі виробництва без переривання процесу та без використання складних оптичних вимірювальних систем [18]. Експерименти проводилися на тонких сталевих листах із заданою синусоїдальною геометрією, що дозволило оцінити ефективність запропонованого методу.

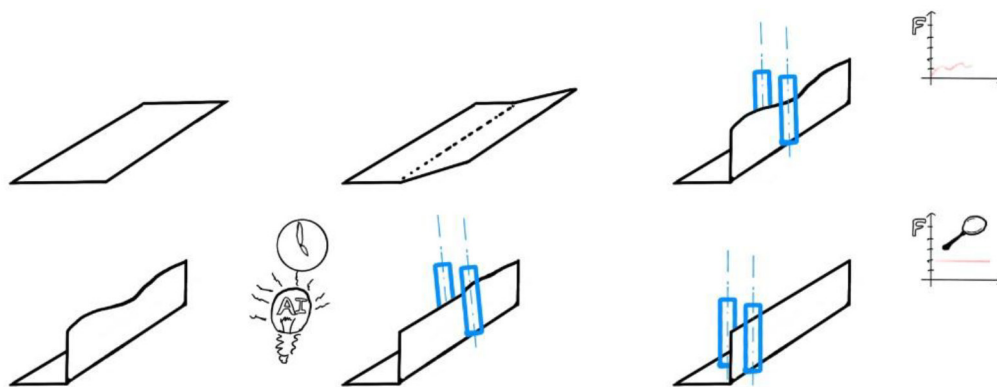


Рис. 4. Етапи реалізації iRoRoFo-процесу в системі роботизованої обробки складнопрофільних деталей [15]

У процесі iRoRoFo формування листового металу здійснюється за допомогою роботизованого кінцевого ефектора, оснащеного двома конічними валками, які забезпечують поступове формування деталі, тоді як сили, що діють на фланець робота, безперервно реєструються для подальшого аналізу. Після завершення чергового етапу формування система розраховує необхідні коригування геометрії на основі зібраних даних, які застосовуються на фінальному кроці обробки, що дозволяє досягти високої відповідності цільовим параметрам (рис. 5) [10].

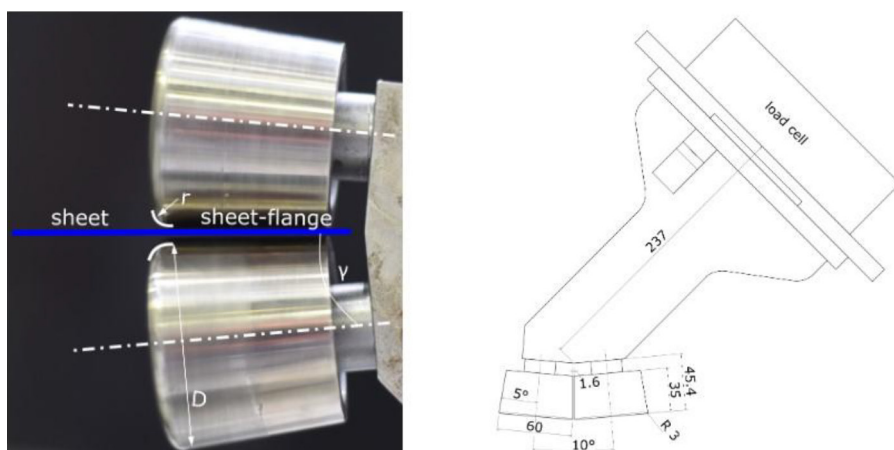


Рис. 5. Структурна схема роботизованого кінцевого ефектора для високоточної обробки складнопрофільних деталей [13]

Для розробки цього методу геометрія деталі вимірюється зовнішньою системою, яка слугує основою для створення сенсорного рішення, що спирається виключно на силові дані. Також, визначимо, що для забезпечення якості обробки складнопрофільних деталей за допомогою роботизованих виробничих систем особливу увагу привертають технології автоматизованого ультразвукового контролю, що дозволяють здійснювати високоточну діагностику внутрішньої структури матеріалів під час або після механічної обробки. Серед існуючих методів одним із найбільш базових є технологія з використанням спеціального тримача у вигляді виделки, на кінцях якої закріплено ультразвукові випромінювачі із розпилювальною системою, що забезпечує зволоження зони контролю. Для контролю складнопрофільних поверхонь, що мають просторово криволінійну структуру, виникає потреба у застосуванні більш складних систем, які передбачають синхронізовану взаємодію щонайменше двох роботизованих маніпуляторів. У цьому випадку один робот виконує функцію носія передавального ультразвукового зонда, а інший – приймального, при цьому обидва пристрої повинні рухатися по заданих траєкторіях, розташованих точно один навпроти одного (рис. 6) [19, с. 31–32].

Для забезпечення коректного проходження ультразвукових хвиль осі передавального і приймального зондових систем мають бути не лише січними, а й максимально співвісними, що потребує надзвичайно точного узгодження положення обох роботів. Залежно від типорозміру та конструкційних характеристик роботизованих маніпуляторів, похибка допустимого відхилення у позиціонуванні зазвичай коливається в межах одиниць міліметра, а допустимий кутовий розбіг у коаксіальності не повинен перевищувати декількох градусів.

Таким чином, сучасні підходи до забезпечення якості обробки складнопрофільних деталей передбачають тісну інтеграцію цифрових, сенсорних та робототехнічних технологій у єдину інтелектуальну систему, здатну адаптивно та надійно реалізовувати складні виробничі завдання.



Рис. 6. Роботизована клітина з синхронізованими маніпуляторами для неруйнівного ультразвукового контролю складнопрофільних деталей [9]

Висновки

Досліджено функціональні можливості інтеграції промислових роботів, систем комп'ютерного бачення, сенсорних модулів (зокрема ультразвукових і силовимірювальних датчиків) та алгоритмів машинного навчання в єдину інтелектуальну систему. Ця система здатна безперервно аналізувати параметри технологічного процесу, передбачати його зміни та автоматично коригувати траєкторії руху інструментів без втручання оператора. Проаналізовано перспективні напрями розвитку ключових технологій, спрямованих на підвищення якості обробки деталей складної форми. Особлива увага приділена таким аспектам, як точне калібрування, планування траєкторій, адаптивне регулювання зусиль, компенсація вібрацій, а також застосування мобільних роботів і систем моніторингу в реальному часі. Оцінено ефективність поєднання офлайн-програмування з САД-даними як основного інструменту для швидкої перебудови обробної системи в умовах серійно-одиночної чи індивідуалізованої виробництва.

Розроблено концепцію інтелектуального формування iRoRoFo, яка дозволяє в режимі реального часу адаптувати зусилля і параметри обробки до особливостей конкретної деталі, без потреби у попередньому калібруванні. Це значно підвищує точність і стабільність отриманих геометричних характеристик без застосування складних оптичних систем контролю. Запропоновано нове сенсорне рішення, засноване на аналізі силового зворотного зв'язку, що дозволяє визначати форму деталі прямо в процесі обробки, оперативного коригувати технологічні параметри та уникати втрат точності, викликаних зміною залишкових напружень або неточністю позиціонування. Також запропоновано оптимізовану архітектуру взаємодії кількох роботизованих маніпуляторів, які одночасно виконують ультразвуковий неруйнівний контроль поверхонь складного профілю. При цьому забезпечується висока точність співвідношення ультразвукових зондів та мінімально допустиме відхилення в міліметровому й кутовому діапазонах.

Список використаної літератури

1. Громовий О. А., Виговський Г. М., Балицька Н. О. Шляхи удосконалення процесу обробки плоских поверхонь деталей фрезеруванням. *Технічна інженерія*. 2020. № 2(86). С. 48–53. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-48-53](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-48-53)
2. Спіфанова І. М. Вплив використання сучасних технологій на ефективність діяльності машинобудівних підприємств країни. *Економіка та суспільство*. 2025. № 72. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-7>
3. Македон В. В., Байлова О. О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2023. Випуск 47. С. 16–26. DOI: [10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3](https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3)
4. Македон В. В., Холод О. Г., Ярмоленко Л. І. Модель оцінки конкурентоспроможності високотехнологічних підприємств на засадах формування ключових компетенцій. *Академічний огляд*. 2023. № 2(59). С. 75–89. DOI: [10.32342/2074-5354-2023-2-59-5](https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-2-59-5)

5. Новіков Ф. В. Технологічне забезпечення високоякісної та високоточної механічної обробки : монографія. Дніпро : ЛІРА, 2024. 460 с.
6. Яковенко І. Є., Пермяков О. А., Ільїн Д. О., Басова Є. В., Горбулик В. І. До проблем автоматизації дільниці механічної обробки деталей з полістиролу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні*. 2024. № 1(9). С. 30–39. DOI: [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.1\(9\).03](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.1(9).03)
7. Abdolmohammadi T., Richter-Trummer V., Ahrens A., Richter K., Alibrahim A., Werner M. Virtual sensor-based geometry prediction of complex sheet metal parts formed by robotic rollforming. *Robotics*. 2023. Vol. 12, no. 2. p. 33. <https://doi.org/10.3390/robotics12020033>
8. Campilho R. D. S. G., Silva F. J. G. Industrial process improvement by automation and robotics. *Machines*. 2023. Vol. 11, no. 11. p. 1011. <https://doi.org/10.3390/machines11111011>
9. Cooper I., Nicholson I., Yan D., Wright B., Liaptsis D., Mineo C. Development of a fast inspection system for complex composite structures – The IntACom project. *Proceedings of the 5th International Symposium on NDT in Aerospace*. 2013. November 13–15. Singapore. https://www.ndt.net/article/aero2013/content/papers/45_Cooper.pdf
10. Jiao S., Wang H., Xia L., Zhang S. Research on trajectory planning of 6-DOF cutting-robot in machining complex surface. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 220. p. 06003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822006003>
11. Licardo J. T., Domjan M., Orehovački T. Intelligent robotics—A systematic review of emerging technologies and trends. *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 3. p. 542. <https://doi.org/10.3390/electronics13030542>
12. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). p. 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>
13. Papavasileiou A., Michalos G., Makris S. Quality control in manufacturing – review and challenges on robotic applications. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2024. Vol. 38, no. 1. p. 79–115. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2024.2314789>
14. Ryalat M., Franco E., Elmoaqet H., Almtireen N., Al-Refai G. The integration of advanced mechatronic systems into Industry 4.0 for smart manufacturing. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 19. p. 8504. <https://doi.org/10.3390/su16198504>
15. Schulz A., Queißer J. F., Ishihara H., Asada M. Transfer learning of complex motor skills on the humanoid robot Affetto. *Proceedings of the 2018 Joint IEEE 8th International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob)*. 2018. p. 72–77. <https://doi.org/10.1109/DEVLRN.2018.8761031>
16. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: Modelling, Planning and Control. *London: Springer*, 2010. 181 p. https://people.disim.univaq.it/~costanzo.manes/EDU_stuff/Robotics_Modelling,%20Planning%20and%20Control_Sciavicco_extract.pdf
17. Younis H., Bwaliez O. M., Garibeh M. H., Sundarakani B. Empirical study of robotic systems implementation to corporate performance in manufacturing sector. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2024. Advance online publication. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-02-2024-0070>
18. Zhen M., Lizhe Q., Yunquan S., Min X. Research on robotic measurement path planning for complex surface workpieces. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1820, no. 1. p. 012072. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1820/1/012072>
19. Zhu Z., Tang X., Chen C., Peng F., Yan R., Zhou L., Li Z., Wu J. High precision and efficiency robotic milling of complex parts: Challenges, approaches and trends. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2021. Vol. 35, no. 2. p. 22–46. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.12.030>

References

1. Gromovyi O. A., Vyhovskyi H. M., Balytska N. O. (2020). Shliakhy udoskonalennia protsesu obrobky ploskikh poverkhon' detaley frezeruvanniam [Ways to improve the process of flat surface machining by milling]. *Tekhnichna inzheneriia*, no. 2(86), pp. 48–53. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-48-53](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-48-53) [in Ukrainian].
2. Epifanova I. M. (2025). Vplyv vykorystannia suchasnykh tekhnolohii na efektyvnist' diial'nosti mashynobudivnykh pidpryemstv krainy [Impact of the use of modern technologies on the efficiency of the activities of the country's engineering enterprises]. *Ekonomika ta suspilstvo*, no. 72. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-7> [in Ukrainian].
3. Makedon V. V., Bailova O. O. (2023). Planuvannya i orhanizatsiya vprovadzhennya syfrovyykh tekhnolohiy v diyal'nist' promyslovykh pidpryemstv [Planning and organizing the implementation of digital technologies in the activities of industrial enterprises]. *Scientific Bulletin of Kherson State University. Series "Economic Sciences"*, no. 47, pp. 16–26. DOI: [10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3](https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3) [in Ukrainian].
4. Makedon V. V., Kholod O. H., Yarmolenko L. I. (2023). Model' otsinky konkurentospromozhnosti vysokotekhnolohichnykh pidpryemstv na zasadakh formuvannya klyuchovykh kompetentsiy [The model of assessing the competitiveness of high-tech enterprises based on the formation of key competencies]. *Akademichnyy ohlyad*, no. 2(59), pp. 75–89. DOI: [10.32342/2074-5354-2023-2-59-5](https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-2-59-5) [in Ukrainian].

5. Novikov F. V. (2024). Tekhnolohichne zabezpechennia vysokoiaakisnoi ta vysokotochnoi mekhanichnoi obrobky: monohrafiia [Technological support of high-quality and high-precision mechanical processing: monograph]. Dnipro : LIRA. [in Ukrainian].
6. Yakovenko I. Ye., Permiakov O. A., Il'in D. O., Basova Ye. V., Horbulyk V. I. (2024). Do problem avtomatyzatsii dilnytsi mekhanichnoi obrobky detaley z polistyrolu [On the problems of automation of the mechanical processing area of polystyrene parts]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni*, no. 1(9), pp. 30–39. [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.1\(9\).03](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.1(9).03). [in Ukrainian].
7. Abdolmohammadi T., Richter-Trummer V., Ahrens A., Richter K., Alibrahim A., & Werner M. (2023). Virtual sensor-based geometry prediction of complex sheet metal parts formed by robotic rollforming. *Robotics*, no. 12(2), pp. 33. <https://doi.org/10.3390/robotics12020033>
8. Campilho R. D. S. G., & Silva F. J. G. (2023). Industrial process improvement by automation and robotics. *Machines*, no. 11(11), pp. 1011. <https://doi.org/10.3390/machines11111011>
9. Cooper I., Nicholson I., Yan D., Wright B., Liaptsis D., & Mineo C. (2013). Development of a fast inspection system for complex composite structures – The IntACom project. In *Proceedings of the 5th International Symposium on NDT in Aerospace (November 13–15, Singapore)*. https://www.ndt.net/article/aero2013/content/papers/45_Cooper.pdf
10. Jiao S., Wang H., Xia L., & Zhang S. (2018). Research on trajectory planning of 6-DOF cutting-robot in machining complex surface. *MATEC Web of Conferences*, no. 220, pp. 06003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822006003>
11. Licardo J. T., Domjan M., & Orehovački T. (2024). Intelligent robotics – A systematic review of emerging technologies and trends. *Electronics*, no. 13(3), pp. 542. <https://doi.org/10.3390/electronics13030542>
12. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 2(13(128)), pp. 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>
13. Papavasileiou A., Michalos G., & Makris S. (2024). Quality control in manufacturing – review and challenges on robotic applications. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, no. 38(1), pp. 79–115. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2024.2314789>
14. Ryalat M., Franco E., Elmoaqet H., Almtireen N., & Al-Refai G. (2024). The integration of advanced mechatronic systems into Industry 4.0 for smart manufacturing. *Sustainability*, no. 16(19), pp. 8504. <https://doi.org/10.3390/su16198504>
15. Schulz A., Queißer J. F., Ishihara H., & Asada M. (2018). Transfer learning of complex motor skills on the humanoid robot Affetto. In *Proceedings of the 2018 Joint IEEE 8th International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob)* (pp. 72–77). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DEVLRN.2018.8761031>
16. Siciliano B., Sciacivco L., Villani, L., & Oriolo G. (2010). Robotics: Modelling, Planning and Control. *Springer London*. https://people.disim.univaq.it/~costanzo.manes/EDU_stuff/Robotics_Modelling,%20Planning%20and%20Control_Sciavicco_extract.pdf
17. Younis H., Bwaliez O. M., Garibeh M. H., & Sundarakani B. (2024). Empirical study of robotic systems implementation to corporate performance in manufacturing sector. *International Journal of Productivity and Performance Management*, Advance online publication. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-02-2024-0070>
18. Zhen M., Lizhe Q., Yunquan S., & Min, X. (2021). Research on robotic measurement path planning for complex surface workpieces. *Journal of Physics: Conference Series*, no. 1820(1), pp. 012072. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1820/1/012072>
19. Zhu Z., Tang X., Chen C., Peng F., Yan R., Zhou L., Li Z., & Wu J. (2021). High precision and efficiency robotic milling of complex parts: Challenges, approaches and trends. *Chinese Journal of Aeronautics*, no. 35(2), pp. 22–46. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.12.030>