

С. Г. КАТРИЧ

аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0006-7964-693X

Д. О. ДМИТРИЄВ

професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8200-351X

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗД ДРУКУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ У МАШИНОБУДУВАННІ ТА РОБОТОТЕХНІЦІ

В статті розглянуто сучасний стан машинобудування з позиції зростаючих потреб швидкого виготовлення складних і індивідуалізованих конструктивних елементів в робототехніці. Обґрунтовано недоліки традиційних методів таких як механічна обробка, обробка тиском та лиття з точки зору їх обмежень щодо оперативності розробки і варіативності конструкційних рішень складних деталей в приводах та виконавчих елементів промислових роботів маніпуляторів. Зазначено, що адитивні технології тривимірного друку дозволяють подолати ці обмеження, виконати реалізацію складних інженерних концепцій та створення принципово нових типів машин, для розвитку робото-технічної галузі.

На основі аналізу сучасних наукових досліджень низки авторів відзначено впровадження високошвидкісних адитивних процесів як ключового напрямку розвитку сучасного машинобудування, зокрема в сфері робототехніки. Наведено особливості застосування 3D-друку в життєвому циклі виробу від етапу формування концепту до підготовки масового виробництва. Проаналізовано масштаби використання 3D-друку і невирішені технічні задачі якими супроводжуються адитивні технології пов'язані із вибором матеріалів, забезпеченням необхідних механічних характеристик надрукованих елементів та оптимізацією процесів їх постобробки. Особливу увагу в роботі приділено виявленню та систематизації особливостей застосування адитивних технологій для виготовлення деталей у машинобудуванні та робототехніці, а також узагальнення практичних результатів і визначення перспектив подальшого розвитку цієї технології. Детально вивчено основні напрямки використання 3D-друку, зокрема швидке прототипування, виготовлення складно-конфігураційних компонентів, виробництво технологічної оснастки та елементів роботизованих систем. Наведено приклади створення функціональних прототипів із застосуванням високотехнологічних матеріалів та окреслено перспективи тривимірного друку металевих деталей. Окремо проаналізовано сучасні технологічні підходи, включаючи інтеграцію багатокординатних роботизованих комплексів, що забезпечують формування складної геометрії без використання підтримувальних структур і дають змогу виготовляти великогабаритні елементи за один виробничий цикл.

Ключові слова: 3D-друк, адитивні технології, машинобудування, робототехніка, прототипування, композитні матеріали.

S. G. KATRICH

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics
and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0006-7964-693X

D. O. DMYTRIEV

Professor at the Department of Automation, Robotics
and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8200-351X

THE SPECIFICS OF APPLYING 3D PRINTING TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING COMPONENTS IN MECHANICAL ENGINEERING AND ROBOTICS

The current state of mechanical engineering from the perspective of the growing needs for rapid manufacturing of complex and individualized structural elements in robotics was examined. The limitations of traditional methods, such as machining, forming, and casting, have been justified with respect to their constraints on development speed and the

variability of design solutions for complex components in drives and actuators of industrial robotic manipulators. It has been noted that additive 3D printing technologies enable these limitations to be overcome, allowing the implementation of complex engineering concepts and the creation of fundamentally new types of machines, contributing to the advancement of the robotics industry.

Based on the analysis of recent scientific studies by various authors, the introduction of high-speed additive processes has been highlighted as a key direction in the development of modern mechanical engineering, particularly in robotics. The features of 3D printing application throughout the product lifecycle, from concept formation to preparation for mass production, was described. The extent of 3D printing utilization and unresolved technical challenges associated with additive technologies have been analyzed, including material selection, ensuring the required mechanical properties of printed elements, and optimization of post-processing procedures. Special attention has been paid to the identification and systematization of the features of additive technology application for component manufacturing in mechanical engineering and robotics, as well as to the generalization of practical results and the definition of prospects for further technology development. Major areas of 3D printing use have been studied in detail, including rapid prototyping, production of complex-configuration components, manufacturing of tooling, and elements of robotic systems. Examples of functional prototype creation using high-performance materials have been provided, and the prospects for 3D printing of metallic components have been outlined. Contemporary technological approaches, including the integration of multi-axis robotic complexes enabling the formation of complex geometries without support structures and allowing large-scale elements to be produced in a single manufacturing cycle, was separately analyzed.

Key words: 3D printing, additive manufacturing, mechanical engineering, robotics, prototyping, composite materials.

Постановка проблеми

Технологія 3D-друку стає важливою складовою сучасного машинобудування та робототехніки. Вона забезпечує гнучкість у проектуванні, скорочує терміни розробки і дозволяє створювати складні деталі без традиційної оснастки. У машинобудуванні її використовують для прототипування, виготовлення оснастки та малосерійних компонентів. У робототехніці 3D-друк сприяє модульності, зменшенню маси конструкцій і швидкій адаптації рішень, вирішує потребу у швидкому створенні складних та індивідуалізованих деталей [1]. Традиційні технології обробки металів (лиття, кування (прокатка), термічна обробка) часто не забезпечують достатньої швидкості розробки та швидкому виготовленню складних конструкцій, оскільки потребують спеціалізованого металургійного обладнання, мають технологічні складнощі, складний процес механічної обробки, високий процент відходів [11]. Адитивні технології (3D-друк) дозволяють долати ці обмеження: вони надають можливість виготовляти деталі складної форми за один цикл, створюючи якісно нові вироби та сприяючи суттєвому розвитку у машинобудуванні [6]. Кількість досліджень у галузі 3D друку та матеріалів для нього в різних країнах світу показує, що впровадження адитивних технологій є одним із найперспективніших напрямів розвитку різних галузей промисловості [5]. Водночас масове використання адитивних технологій у виробництві стикається з низкою проблем: вибором матеріалів для друку, необхідністю забезпечувати високі механічні властивості надрукованих деталей та їх наступну обробку [12]. Ці питання потребують глибокого дослідження і визначають мету даної роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукові публікації, патенти, матеріали науково-технічних конференцій за останні п'ять років зосереджено на розширенні функціональних можливостей 3D-друку за рахунок інтеграції промислових роботів [4,10] та розробці пристроїв тривимірного друку металами [13]. Відомо, що традиційна адитивна система налагоджена на побудову об'єктів шар за шаром в одній орієнтації, що призводить до анізотропії властивостей матеріалу та зниження міцності деталі. Автори у власних дослідженнях [4] виділяють п'ять ключових можливостей, які відкриває поєднання робототехніки з АМ: багатовимірне друкування (multi-directional), конформне нанесення матеріалу, вбудоване складання префабрикованих компонентів, непідтримуване (supportless) друкування і масштабне друкування великих елементів. Багатоосьові роботизовані системи забезпечують високу гнучкість і просторову свободу, що дозволяє формувати оптимізовані складні геометрії, наносити матеріал по нерівних поверхнях та створювати великогабаритні деталі в одному циклі. Дані технології розширюють сферу застосування АМ за рахунок зниження потреби у підтримках і можливості друку великих непризначених конструкцій. Багато галузей практично демонструють переваги 3D-друку, зокрема, 3D-принтери використовують для швидкого виготовлення запасних частин та деталей оснастки на місці, що скорочує залежність від довгих ланцюгів постачань [9]. Використання 3D-принтерів у робототехніці демонструє нові можливості: наприклад, відкритий гуманоїдний робот Berkeley Humanoid Lite спроектовано з численних модульних надрукованих деталей, що знизило собівартість платформи до \$5,000 та полегшило заміну зношених модулів [14]. Завдяки цьому лабораторні та навчальні роботи зі 3D-друком набувають поширення у застосуванні. Аналіз літературних джерел [1-5] виявляє переваги 3D-друку: комплексність форм, автоматизація, швидкість, індивідуалізація і водночас вказує на потребу в подальших дослідженнях матеріалознавчих особливостей та оптимізації технологічних процесів.

Формулювання мети дослідження

Метою цього дослідження є виявлення та систематизація особливостей використання технології 3D-друку у виготовленні деталей для машинобудування та робототехніки, а також узагальнення результатів її практичного впровадження й визначення перспектив подальшого розвитку.

Викладення основного матеріалу дослідження

У машинобудуванні найбільшого поширення набули такі технології: FDM (Fused Deposition Modeling), SLA (Stereolithography), SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting) та DMLS (Direct Metal Laser Sintering), також розроблена нова вітчизняна електронно-променева xBeam 3D metal printing технологія [15].

Технологія FDM базується на екструзії термопластичної нитки через нагрітий екструдер, який накладає шари матеріалу відповідно до 3D-моделі. Матеріалом для друку є термопластичні полімери: PLA, ABS, PETG, TPU, а також інженерні полімери нейлон, полікарбонат і композити з наповненням із вуглецевого волокна або металу [2]. Застосування FDM у машинобудуванні охоплює переважно швидке прототипування, виготовлення пристосувань, тестових зразків або оснастки.



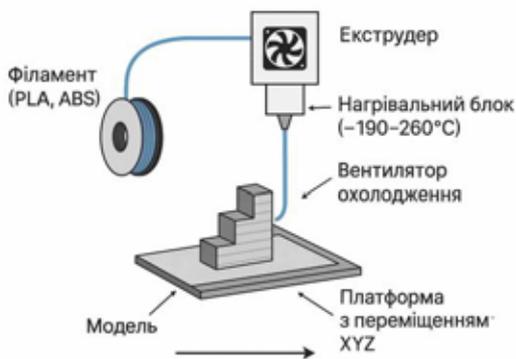
а)



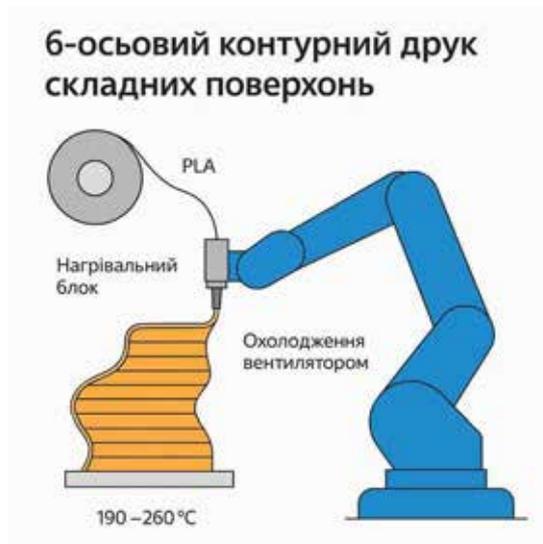
б)

Рис. 1. Приклади деталей надрукованих з PETG-CF матеріалу (а), деталі з композитних філаментів з вуглецевим та скловолокном (б)

На рис. 2,б наведено принцип адитивного нанесення матеріалу за допомогою 6-осьового роботизованого маніпулятора. Такий підхід дозволяє створювати об'єкти зі складною топографією без необхідності в додаткових опорних структурах. Насадки слідує криволінійній геометрії, забезпечуючи рівномірне нанесення та структурну цілісність. Такі системи уже застосовуються в авіабудуванні, будівництві друк бетонних або полімерних елементів та при створенні великогабаритних об'єктів та технічних платформ.



а)



б)

Рис. 2. Базовий принцип роботи FDM-друку (а), 6-осьовий маніпулятор для контурного друку(б)

Найбільш передові технології 3D-друку наведено в таблиці 1. На сьогодні в Україні використовуються для безпосереднього створення металевих деталей. Порошки титану, сталі, алюмінію або кобальтових сплавів плавляються точково лазером, що дозволяє отримати щільні вироби з високою міцністю та точністю. Такі методи часто застосовуються в авіаційній, автомобільній, медичній та оборонній промисловості [6].

Таблиця 1

Порівняння технологій 3D-друку

Критерій	FDM	SLA/DLP	SLS	SLM/DMLS
Точність друку	Низька–середня ($\pm 0,1-0,3$ мм)	Висока ($\pm 0,025-0,1$ мм)	Середня–висока ($\pm 0,1-0,2$ мм)	Дуже висока ($\pm 0,02-0,1$ мм)
Міцність виробів	Помірна (особливо вздовж осі побудови)	Низька–помірна (крихкі смоли)	Висока (пористість помірна)	Дуже висока (аналог металу)
Швидкість друку	Висока (залежить від шару та моделі)	Середня (обмежена об'ємом ванни)	Середня	Низька (тривалий друк)
Вартість обладнання	Низька (\$300–\$10 000)	Середня (\$2 000–\$20 000)	Висока (\$50 000+)	Дуже висока (\$250 000+)
Доступність матеріалів	PLA, ABS, PETG, TPU, інж. полімери	Фотополімери	ПА12, ПА6, армовані полімери	Титан, алюміній, сталь, сплави
Сфера застосування	Прототипи, макети, побутові вироби	Ювелірні вироби, медицина, мікродеталі	Корпуси, шарніри, функціональні деталі	Авіація, авто, оборона, медицина

3D-друк перестав бути інструментом для створення прототипів сьогодні його активно застосовують на всіх етапах життєвого циклу продукту: від початкового проєктування до виготовлення готових деталей у малосерійному або індивідуальному виробництві. Цей підхід є ключовим компонентом концепції цифрового виробництва, яке об'єднує CAD-моделювання, симуляції, адитивне виготовлення і цифрову логістику.

Однією зі сфер використання 3D-друку є створення функціональних та геометричних прототипів, які дозволяють оперативного перевірити конструктивні рішення, здійснити візуальну або ергономічну оцінку деталі. Це значно скорочує цикл розробки продукції, особливо на початкових стадіях, де зміни в конструкції найчастіше [16]. Надруковані вироби повністю замінюють металічні аналоги у середньонавантажених механізмах [17].

У виробництві або при виготовленні унікальних деталей наприклад: заміна зношених частин старого обладнання, які більше не виробляються, виготовлення змінних вставок, кондукторів, фіксаторів, шаблонів, тимчасові технологічні елементи, що використовуються на етапі складання [2]. Це дозволяє уникнути тривалого циклу закупівлі й виробництва стандартних компонентів.

Маса компонентів робота критично впливає на його ефективність, витрати енергії та швидкість реакції. Застосування 3D-друку забезпечує легкі конструкції, що включають внутрішні решітчасті або пустотілі структури. Використання спеціалізованих CAD-систем з топологічною оптимізацією дозволяє генерувати форми, які зберігають необхідну міцність, але при цьому зменшують вагу деталі на 30–60%.

За допомогою 3D-друку:

- проєктуються корпуси з каналами для кабелів або посадочними місцями під компоненти;
- в деяких випадках застосовують друк провідними матеріалами або вставки з металевих контактів;
- створюють герметичні або пило- та вологозахищені оболонки [8].

За допомогою 3D-друку можливе не лише фізичне створення компонентів, а й швидка ітерація та вдосконалення прототипів. Це дозволяє реалізовувати підхід “fail fast – learn fast” (швидка помилка-швидке виправлення), особливо важливий у стартапах і наукових лабораторіях.

Традиційні 3D-принтери працюють у тривимірному просторі, але переважно з обмеженням по вертикальній (Z) осі. Сучасні дослідження ведуть до інтеграції 6-осьових роботизованих рук як платформ для адитивного нанесення матеріалу. Переваги цього підходу:

- можливість друку по нерівних або криволінійних поверхнях;
- безпорне формування без потреби друку підтримуючих структур;
- реалізація контурного або конформного друку нанесення шарів, які повторюють складну форму базової поверхні [3].

Новітні наукові розробки спрямовані на створення багатоматеріальних (композитних, армованих) систем, де в межах однієї деталі поєднуються:

- тверді та еластичні ділянки наприклад, корпус і ущільнювач;
- провідні шари для електроніки;
- магнітні або теплопровідні включення.

Таблиця 2

Інноваційні напрями 3D-друку, що перейшли від експериментальних розробок до промислового застосування

<i>Напрямок інновації</i>	<i>Стан на експериментальному етапі</i>	<i>Стан після промислового впровадження</i>	<i>Приклади застосування / компаній</i>
Металевий 3D-друк для робототехніки	Використання переважно для прототипів	Серійне виготовлення конструктивних частин роботів	Boston Dynamics, ABB, KUKA
Багатоматеріальний полімерний друк	Низька точність і лабораторні зразки	Робочі гнучкі манипулятори і м'які захвати	Festo, Soft Robotics Inc.
Друк великих конструкцій (LFAM)	Демонстраційні експерименти	Оснастка, матриці, каркаси обладнання	BigRep, BAAM, MasterPrint
Високотемпературні полімери (PEEK/PEKK/Ultem)	Складний контроль умов друку	Функціональні вузли роботів та машин	igus, Schunk
Топологічна оптимізація + AM	Теоретичні дослідження	Серійні деталі складної геометрії	Airbus, GE Aviation
Адитивно виготовлена електроніка (AME)	Експериментальні схеми	Вбудовані сенсори та 3D-електроніка	Nano Dimension
Друк з безперервним вуглеволокном	Демонстраційні елементи	Силові конструкції, що замінюють метал	Markforged, Anisoprint
Багатокомпонентні друковані роботи	Академічні прототипи	Комерційні роботизовані платформи	Berkeley Humanoid Lite
Вбудовані канали в деталях	Концептуальні моделі	Функціональні пневмо- та рідинні канали	Роботи для harsh-environment
Гібридне виробництво (AM + CNC)	Лабораторні установки	Серійне виготовлення великогабаритних деталей	DMG MORI, Mazak

Запропоновано (рис. 3,а) принципову схему роботизованого інтелектуального 3D-принтеру для комбінованого друку. В центрі прямокутного чотиригранного каркасу 1 розташований нерухомий робочий стіл 2 з деталлю, що друкується 3. На чотирьох вертикальних стійках каркасу 1 розташовано незалежні програмно-керовані приводи поступального руху 4, які шарнірно з'єднані штангами 5 з рухомою платформою, що містить друкарську головку 6 та позиціонується в робочій зоні уздовж трьох координат X, Y, Z. В поперечному перетині прямокутного каркасу 1 розташовано кільцеву напрямну 7, що має здатність програмно-керованого руху вертикально уздовж координати Z спареними приводами поступального руху 8, що працюють одночасно уздовж вертикальних стійок каркасу 1. На кільцевій напрямній 7 змонтовано незалежні програмно-керовані приводи поступового руху 9, які шарнірно-зв'язані штангами 10 з манипулятором із захоплювачем 11, що позиціонується завдяки приводам поступового руху 9 в робочій зоні укладання шарів по двом координатам X та Y. Оpozитно до механізмів позиціонування манипулятора із захоплювачем 11 на кільцевій напрямній 7 змонтовано незалежні програмно-керовані приводи поступового руху 12, які шарнірно-зв'язані штангами 13 з локальним пристроєм підігріву/охолодження 14, що позиціонується завдяки приводам поступового руху 12 в робочій зоні укладання шарів по двом координатам X та Y. В свою чергу приводи поступового руху 9 і 12 можуть позиціонувати пристрій підігріву/охолодження 14 та манипулятор із захоплювачем 11 по кільцевій напрямній 7 навколо осі Z в системі координат деталі на 360 градусів. Приводи 8 рухають кільцеву напрямну вертикально впродовж вертикальних стійок каркасу, таким чином робоча зона має циліндричну форму.

Для забезпечення постійного зворотного зв'язку в режимі реального часу передаються дані про температуру та геометричні параметри в інтелектуальну систему числового програмного керування від двох тепловізорів 15 і двох просторових датчиків 16, що розміщені в основі каркасу з двох боків на рівні деталі, яка друкується. Тепловізори 15 і просторові датчики 16 розташовано окремо таким чином щоб отримати дані по координаті X та Y в робочій зоні роботизованого інтелектуального 3D-принтеру. Друкарська головка 6 формує шари виробу, пристрій локального підігріву/охолодження 13 коригує температурне поле в зоні друку, манипулятор 11 із захоплювачем може здійснювати локальні операції з переміщення додаткових елементів таких як укладання армованих елементів в дефектні області, очищення робочої області і інше.

Запропоновано (рис. 3, б, в) принципову схему роботи нового принтера, де 1-робоча зона для 3D друку і 2 – для механічної постобробки, робочий стіл 3 з підігрівом, деталь 4, стійки каркасу 5, приводи лінійного руху 6, 7, крокові двигуни 8, 9, штанги постійної довжини 10, 11, рухома платформа 12, на якій розташовано головку для друку 13. Робоча зона 1 має активну або пасивну термокамеру 14, стінки якої розташовано між стійками каркасу 5. Робоча зона 2 є відкритою і призначена для механічної пост обробки надрукованої деталі або проміжної обробки елементів деталі 4 під час друку, містить стійки каркасу 15, 16, окремі приводи лінійного руху 17, 18 і відповідні ним крокові двигуни 19, 20, штанги постійної довжини 21, 22 шарнірно з'єднані з приводами лінійного руху 17, 18 відповідно та рухомою платформою 23, на якій розташовано інструментальний шпіндель 24. В робочій зоні 2 розташовано магазин інструментів для механічної обробки 25 та манипулятор заміни інструменту 26

в шпинделі 24. Переміщення деталі 4 із робочої зони 1 після циклу друку в робочу зону 2 для механічної обробки відбувається за допомогою пристрою обертання 27 робочого столу 3. Механічна обробка деталі 4 в робочій зоні 2 відбувається інструментальним шпинделем 24 на рухомій платформі 23 знизу у вертикальному положенні. Для надійного закріплення деталі в робочій зоні 2 можуть бути використані самоцентруючі машинні лещата 28. З технологічної точки зору багатофункціональний 3D-принтер може об'єднувати окремі переходи 3D друку та механічної постобробки на одній деталі або виконувати окремо операції 3D друку та механічної постобробки для різних деталей 4. Таким чином забезпечується повний цикл комплексної автоматизованої обробки деталей складної геометрії включаючи переходи та операції механічної постобробки.

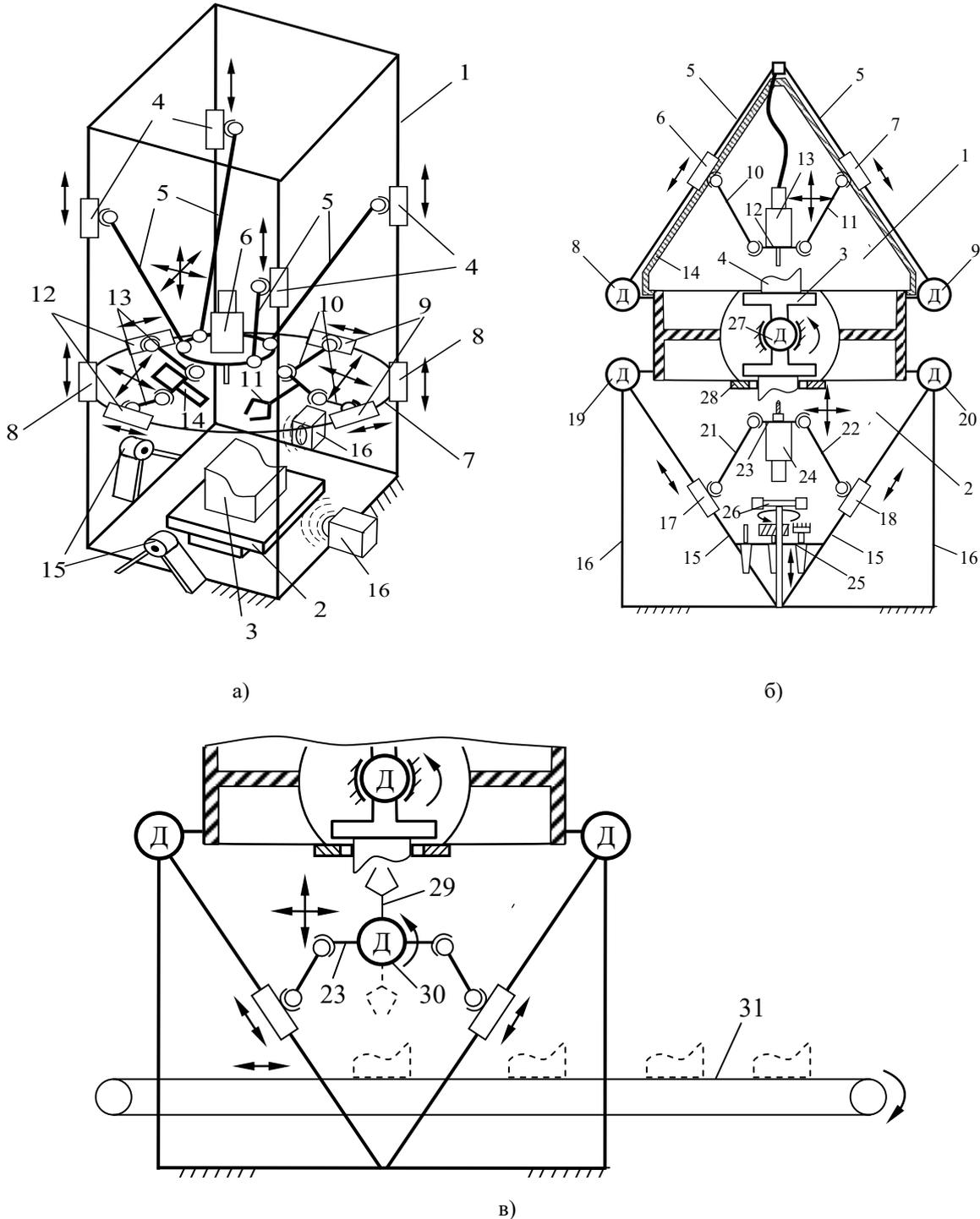


Рис. 3. Принципова схема роботизованого інтелектуального 3D принтера для комбінованого друку (а), принципова схема багатофункціонального 3d-принтера з можливістю пост обробки (б, в)

Висновки

Застосування адитивних технологій значно підвищує гнучкість і швидкість інженерного циклу, дозволяючи створювати легкі, міцні та геометрично складні конструкції, які є недоступними або економічно неефективними для традиційних методів виробництва. Наведено нові технічні рішення на рівні принципів схем 3D-принтерів за рахунок вдосконалення кінематичних властивостей самонавчального пристрою для комбінованого друку об'єктів, а саме забезпечення синхронного керування впливу кількох різних рухомих локальних пристроїв в одній робочій зоні під час пошарового формування складних виробів, розширення функціональних можливостей за рахунок поєднання кінематичних рухів різних пристроїв, усунення температурних деформацій, підвищення якості друку складних виробів шляхом локального теплового регулювання та взаємодії з маніпулятором, оптимізація робочої зони. Наступною пропозицією є компоновка багатofункціонального 3D-принтера для забезпечення повного циклу комплексної автоматизованої обробки деталей складної геометрії включаючи переходи та операції механічної постобробки, що досягається розділенням робочих зон і виконавчих органів 3D друку та механічної постобробки в межах каркасу стійок несучої основи із застосуванням приводів виконавчих органів у вигляді механізмів паралельної структури та поворотного пристрою переміщення робочого столу з деталлю між робочими зонами.

Список використаної літератури

1. Zhou L., Miller J., Vezza J., Mayster M., Raffay M., Justice Q., Al Tamimi Z., Hansotte G., Sunkara L. D., Bernat J. Additive manufacturing: A comprehensive review // *Sensors* (Basel, Switzerland). 2024. Vol. 24, No. 9. P. 2668. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24092668>. 1
2. Поліщук О. С., Поліщук А. О., Лісевич С. П., Залізецький А. М., Мельник В. І. Виготовлення виробів та деталей методом 3D-друку з композитних ниток з високим вмістом металу. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. № 3. С. 104–110. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-309-3-104-110.
3. Рибак А. І., Шевченко І. В. Застосування адитивних технологій у процесі проектування виробів машинобудування. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2021. № 1(20). С. 85–91.
4. Bhatt P. M., Malhan R. K., Shembekar A. V., Yoon Y. J., Gupta S. K. Expanding capabilities of additive manufacturing through use of robotics technologies: A survey. *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 31. Art. 100933. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100933.
5. Brasil A. L. A., Martinez A. C. P. A Systematic Review of Robotic Additive Manufacturing Applications in Architecture, Engineering, and Construction. *Buildings*. 2025. Vol. 15, № 18. Art. 3336. DOI: 10.3390/buildings15183336.
6. Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams C. B., Wang C. C. L., Shin Y. C., Zhang S., Zavattieri P. D. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*. 2015. Vol. 69. P. 65-89. DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.001.
7. Gibson I., Rosen D. W., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. New York: Springer, 2015. 498 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3.
8. Horváth L., Váradi K., Szalay T. Toolpath planning for large-scale FDM 3D printing: Strategies and implementation. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 64. P. 1280-1290. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.02.039.
9. SPEE3D. Expeditionary Manufacturing Unit [Електронний ресурс]. 2025. Режим доступу: <https://www.spee3d.com/product/emu/>
10. Самонавчальний 3D-принтер для комбінованого друку об'єктів : пат. UA 154212 U / Дудукалов Ю. В., Глушкова Д. Б., Сорокін В. Ф., Демченко С. В. Зареєстр. 19.10.2023. "Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій".
11. Єфременко Б. В., Журнаджи В. І., Зайчук Н. П., Шимчук С. П., Чабак Ю. Г., Петришинець І., Єфременко В. Г. Мікробудова та властивості сталі AISI 316L біомедичного призначення, виготовленої методом LPBF-друку // Наукові нотатки: міжвузівський збірник наукових праць. Луцьк, 2022. № 73. DOI: 10.36910/775.24153966.2021.72.13.
12. Цибуленко В. О., Воронцов Б. С. Забезпечення контролю якості для традиційного і адитивного виробництва // Матеріали XXIV Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (28–29 листопада 2024 р., Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. DOI: 10.20535/2409-7160.2023.XXIII.278009.
13. Ковальчук Д. В., Мельник В. Г., Мельник І. В., Тугай Б. А. Спосіб виготовлення тривимірних об'єктів і пристрій для його реалізації : пат. UA 112682 С2 Україна. заявл. 10.10.2016 ; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19. 6 с.
14. University of California, Berkeley. Berkeley engineers develop customizable 3D-printed robot for tech newbies [Електронний ресурс] // *Berkeley Engineering*. Червень 2025. Режим доступу: <https://engineering.berkeley.edu/news/2025/06/berkeley-engineers-develop-customizable-3d-printed-robot-for-tech-newbies/> (дата звернення: 21.11.2025).
15. Ковальчук Д. В., Мельник В. Г., Мельник І. В., Тугай Б. А. Технологія xBeam 3D Metal printing на шляху до промислового виробництва // Сучасна електрометалургія. 2020. № 3. ISSN 2415-8445.
16. Зінченко Д. Ю. Можливості гібридних технологій друку для виробництва функціональних прототипів. *Тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. "Інновації в промисловому виробництві"*. Київ, 2023. С. 67–69.

17. Automotive Manufacturing Solutions. From prototype to production: Bringing 3D printed jigs and fixtures in-house [Електронний ресурс]. 2018. Режим доступу: <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/equipment-and-technology-providers/from-prototype-to-production/533007>

References

1. Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L. D., & Bernat, J. (2024). Additive manufacturing: A comprehensive review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24(9), 2668. <https://doi.org/10.3390/s24092668>
2. Polishchuk, O. S., Polishchuk, A. O., Lisevych, S. P., Zalizetskyi, A. M., & Melnyk, V. I. (2022). Vyhotovlennia vyrobiv ta detalei metodom 3D-druku z kompozytnykh nytok z vysokym vmistom metalu [Manufacturing of products and parts by 3D printing from composite filaments with high metal content]. *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho Universytetu*, 3, 104–110. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-104-110>
3. Rybak, A. I., & Shevchenko, I. V. (2021). Zastosuvannia adytyvnykh tekhnolohii u protsesi proektuvannia vyrobiv mashynobuduvannia [Application of additive technologies in the design of mechanical engineering products]. *Visnyk Mashynobuduvannia ta Transportu*, 1(20), 85–91.
4. Bhatt, P. M., Malhan, R. K., Shembekar, A. V., Yoon, Y. J., & Gupta, S. K. (2019). Expanding capabilities of additive manufacturing through use of robotics technologies: A survey. *Additive Manufacturing*, 31, 100933. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100933>
5. Brasil, A. L. A., & Martinez, A. C. P. (2025). A systematic review of robotic additive manufacturing applications in architecture, engineering, and construction. *Buildings*, 15(18), 3336. <https://doi.org/10.3390/buildings15183336>
6. Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
7. Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
8. Horváth, L., Váradi, K., & Szalay, T. (2021). Toolpath planning for large-scale FDM 3D printing: Strategies and implementation. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 1280–1290. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.039>
9. SPEE3D. (2025). *Expeditionary manufacturing unit*. <https://www.spee3d.com/product/emu/>
10. Dudukalov, Yu. V., Hlushkova, D. B., Sorokin, V. F., & Demchenko, S. V. (2023). Samonavchal'nyi 3D-prynter dlia kombinovanoho druku ob'iektiv [Self-learning 3D printer for combined printing of objects] (Patent UA 154212 U). Ukrainskyi Natsionalnyi Ofis Intelktualnoi Vlasnosti ta Innovatsii.
11. Yefremenko, B. V., Zurnadzi, V. I., Zaichuk, N. P., Shymchuk, S. P., Chabak, Yu. H., Petryshynets, I., & Yefremenko, V. H. (2022). Mikrobudova ta vlastyvoli stali AISI 316L biomedychnoho pryznachennia, vyhotovlenoi metodom LPBF-druku [Microstructure and properties of AISI 316L biomedical steel produced by LPBF printing]. *Naukovi Notatky*, 73. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2021.72.13>
12. Tsybulenko, V. O., & Vorontsov, B. S. (2024). Zabezpechennia kontroliu yakosti dlia tradytsiinoho i adytyvnoho vyrobnytstva [Ensuring quality control for traditional and additive manufacturing]. In *Proceedings of the XXIV International Scientific and Technical Conference "Progressive Engineering, Technology and Education"* (pp. 278009). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2023.XXIII.278009>
13. Kovalchuk, D. V., Melnyk, V. H., Melnyk, I. V., & Tuhai, B. A. (2016). Sposib vyhotovlennia tryvymirnykh ob'iektiv i prystroi dlia yoho realizatsii [Method of manufacturing three-dimensional objects and device for its implementation] (Patent UA 112682 C2).
14. University of California, Berkeley. (2025, June). Berkeley engineers develop customizable 3D-printed robot for tech newbies. *Berkeley Engineering*. <https://engineering.berkeley.edu/news/2025/06/berkeley-engineers-develop-customizable-3d-printed-robot-for-tech-newbies/>
15. Kovalchuk, D. V., Melnyk, V. H., Melnyk, I. V., & Tuhai, B. A. (2020). Tekhnolohiia xBeam 3D Metal printing na shliakhu do promyslovoho vyrobnytstva [xBeam 3D Metal printing technology on the way to industrial production]. *Suchasna Elektrometalurhiia*, 3. ISSN 2415-8445.
16. Zinchenko, D. Yu. (2023). Mozhlyvosti hibrydnykh tekhnolohii druku dlia vyrobnytstva funktsional'nykh prototypiv [Possibilities of hybrid printing technologies for the production of functional prototypes]. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Innovations in Industrial Production"* (pp. 67–69). Kyiv.
17. Automotive Manufacturing Solutions. (2018). From prototype to production: Bringing 3D printed jigs and fixtures in-house. <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/equipment-and-technology-providers/from-prototype-to-production/533007>

Дата першого надходження рукопису до видання: 12.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 09.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025