

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти Другий (магістерський)

Моделювання процесів виготовлення деталей роботизованого виробництва з використанням технологій 3D-друку
(тема)

Виконав:
здобувач II року навчання,
групи КТРСМ-23-2

Ключко О.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 174 Автоматизація
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютеризовані та
робототехнічні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Безкоровайний В. В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____

Кафедра _____ КІТАР _____

Рівень вищої освіти _____ Другий (магістерський) _____

Спеціальність 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і повна назва)

Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Комп'ютеризовані та робототехнічні системи _____
(шифр і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)
«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Ключку Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання процесів виготовлення деталей роботизованого виробництва з використанням технологій 3D-друку

затверджена наказом по університету від 25.11.2024 №1239 Ст.

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 22.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 3D-принтери; IBM-сумісний персональний комп'ютер; кількість принтерів для одночасної роботи – до 10.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі. _____

4.1 Вступ. _____

4.2 Огляд і аналіз сучасного стану адитивних технологій. _____

4.3 Визначення переваг та недоліків адитивного виробництва. _____

4.4 Аналіз вимог до системи. _____

4.5 Розробка програмного забезпечення. _____

4.6 Розробка та тестування системи управління 3D-принтерами. _____

4.7 Охорона праці. _____

4.8 Висновки. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний матеріал у вигляді презентації (10–15 аркушів формату А4).

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання та аналіз завдання	09.09.2024	Виконано
2	Огляд проблеми моделювання 3D-друку на виробництві	23.09.2024	Виконано
3	Аналіз технологій та матеріалів 3D-друку	07.10.2024	Виконано
4	Розробка моделей і алгоритмів управління	14.10.2024	Виконано
5	Розробка програмного забезпечення	28.10.2024	Виконано
6	Тестування програмного забезпечення	04.11.2024	Виконано
7	Удосконалення системи управління	11.11.2024	Виконано
8	Підготовка публікацій	25.11.2024	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки	28.12.2024	Виконано
10	Подання роботи керівнику	31.12.2024	Виконано
11	Підготовка презентації	31.12.2024	Виконано
12	Перевірка роботи на плагіат	02.01.2025	Виконано
13	Рецензування роботи	08.01.2025	Виконано
14	Попередній захист	19.01.2025	Виконано
15	Подання роботи до комісії	29.01.2025	Виконано

Дата видачі завдання 2 вересня 2024 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Безкоровайний В. В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

03.01.2025 р.

ZXC

Ключко О.В.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 73 с., 2 табл., 37 рис., 3 дод., 33 джерела.

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ДЕТАЛЬ, МОДЕЛЮВАННЯ, 3D-ДРУК, ЯКІСТЬ ВИРОБІВ.

Об'єкт дослідження – процес управління кількома 3D-принтерами.

Предмет дослідження – методи організації одночасної роботи кількох 3D-принтерів через систему автоматизованого керування.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення ефективності виробничих процесів шляхом розробки системи одночасного керування кількома 3D-принтерами на основі сучасних інформаційних технологій.

Методи дослідження – системний аналіз, теорія управління, комп'ютерне моделювання, сучасні інформаційні технології.

Розроблено систему керування кількома 3D-принтерами з використанням Python-скриптів та віртуальних СОМ-портів, здійснено інтеграцію з програмним забезпеченням Pronterface для виведення результатів роботи та тестування системи шляхом моделювання передачі G-кодів через віртуальні СОМ-порти.

Галузь застосування розробки – системи автоматизації виробничих процесів, навчальні лабораторії, промислові підприємства, які використовують 3D-друк. Упровадження результатів сприяє підвищенню ефективності виробництва та зменшенню екологічного навантаження шляхом раціонального використання матеріалів та енергії.

Результати кваліфікаційної роботи апробовано у тезах доповіді на всеукраїнській науково-практичній конференції [1].

Отримані результати роботи можна віднести до пункту 9.4 Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура».

ABSTRACT

Explanatory note: 73 p., 2 table, 37 figure, 3 appendix, 33 sources.

ADDITIVE TECHNOLOGIES, PARTS, MODELING, 3D PRINTING, PRODUCT QUALITY.

The object of research is the process of managing several 3D printers.

The subject of research is methods of organizing the simultaneous operation of several 3D printers through an automated control system.

The purpose of the qualification work is to increase the efficiency of production processes by developing a system for simultaneous control of several 3D printers based on modern information technologies.

Research methods – system analysis, control theory, computer modeling, modern information technologies.

A control system for several 3D printers was developed using Python scripts and virtual COM ports, integration with Pronterface software was implemented to display the results of work and test the system by modeling the transmission of G-codes through virtual COM ports.

The field of application of the development is production process automation systems, training laboratories, industrial enterprises that use 3D printing. The implementation of the results contributes to increasing production efficiency and reducing environmental impact through the rational use of materials and energy.

The results of the qualification work were approved in the abstracts of the report at the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference [1].

The obtained results of the work can be attributed to paragraph 9.4 of Sustainable Development Goals 9 “Industry, Innovation and Infrastructure”.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	8
Вступ.....	9
1 Огляд і аналіз сучасного стану адитивних технологій.....	11
1.1 Системи автоматизації та комп'ютерно-інтегровані технології.....	11
1.2 Комп'ютерно-інтегровані технології на виробництві.....	12
1.3 Історія розвитку переваги та недоліки адитивного виробництва	13
1.4 Матеріали та сфери застосування 3D-друку в промисловості.....	17
1.5 Висновки до першого розділу	25
2 Якість виробів адитивного виробництва	27
2.1 Основні показники якості виробів адитивного виробництва.....	27
2.2 Методи контролю якості виробів адитивного виробництва	30
2.3 Геометрична точність виробів адитивного виробництва	32
2.4 Формування захисних покриттів на поверхні виробів адитивного виробництва.....	45
2.5 Висновки до другого розділу.....	53
3 Розробка та тестування системи управління 3d-принтерами.....	54
3.1 Аналіз вимог до системи.....	54
3.2 Розробка програмного забезпечення.....	56
3.3 Тестування роботи системи	57
3.4 Висновки до третього розділу	61
4 Охорона праці.....	62
Висновки	67
Перелік джерел посилання	70
Додаток А Апробація наукових результатів дослідження	74
Додаток Б Лістинг коду програми.....	82
Додаток В Демонстраційний матеріал у вигляді презентації.....	84

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АБС – акрилонітрил-бутадієн-стирол.

КВ – комп'ютерне виробництво.

КІА – комп'ютерний інженерний аналіз.

КІТ – комп'ютерно-інтегровані технології.

КП – комп'ютерне проектування.

САС – системи автоматизованого складання.

ЦСО – цифрова світлова обробка.

ММН – моделювання методом наплавлення.

ПРГ – поліетилентерефталат-гліколь.

PLA – Polylactic Acid.

SKB – Student Design Bureau.

SLA – Stereolithography.

SLM – Selective Laser Melting.

SLS – Selective Laser Sintering.

XRCT – X-ray Computed Tomography.

ВСТУП

Характерною рисою сучасних виробничих технологій є широке впровадження адитивних технологій, зокрема 3D-друку. Це стало можливим завдяки стрімкому розвитку інформаційних технологій, здешевленню електроніки та обладнання для тривимірного друку. Застосування 3D-принтерів у виробничих процесах дозволяє скорочувати витрати часу на розробку та виготовлення продукції, мінімізувати відходи матеріалів, а також значно спростити виготовлення складних геометричних форм.

Ефективність використання 3D-принтерів багато в чому залежить від організації процесів управління ними, особливо коли мова йде про одночасну роботу кількох пристроїв. Традиційні підходи до керування обмежуються індивідуальним підключенням до кожного принтера, що створює значні труднощі для масштабування та автоматизації. Ця проблема є особливо актуальною для підприємств, які використовують 3D-друк як основний виробничий інструмент.

У сучасних умовах виникає потреба у розробці систем автоматизованого керування кількома 3D-принтерами, що забезпечать їхню синхронну роботу. Такий підхід дозволяє підвищити продуктивність виробництва та мінімізувати втрати через помилки в налаштуванні обладнання.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності процесу організації роботи кількох 3D-принтерів шляхом розробки системи автоматизованого керування на основі сучасних інформаційних технологій.

Об'єкт дослідження – процес організації одночасної роботи кількох 3D-принтерів.

Предмет дослідження – методи автоматизованого керування 3D-принтерами.

Методи дослідження: системний аналіз, теорія автоматизованого управління, методи програмування, інструменти моделювання віртуальних СОМ-портів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз сучасного стану технологій автоматизованого керування 3D-принтерами;
- розробити методику організації одночасної роботи кількох 3D-принтерів;
- обрати програмні засоби та алгоритми для реалізації системи;
- створити програму для передачі G-кодів на кілька принтерів;
- провести тестування роботи системи;
- оцінити ефективність розробленої системи.

Результатом кваліфікаційної роботи є система автоматизованого керування кількома 3D-принтерами, яка дозволяє забезпечити їхню синхронну роботу, що сприяє підвищенню продуктивності виробництва та ефективності використання обладнання.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано тези доповіді у матеріалах Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених (Додаток А) [1].

Кваліфікаційна робота оформлена відповідно до вимог [2] та згідно стандартів [3-4].

1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Системи автоматизації та комп'ютерно-інтегровані технології

Системи автоматизації та комп'ютерно-інтегровані технології (КІТ) відіграють ключову роль у сучасному виробництві, зокрема у поєднанні з технологіями 3D-друку. Ці системи охоплюють програмне та апаратне забезпечення, яке автоматизує виробничі процеси, забезпечуючи точність, швидкість і контроль на всіх етапах виготовлення продукції. Інтеграція автоматизації дозволяє значно скоротити час виготовлення, знизити виробничі витрати та мінімізувати вплив людського фактора, що підвищує якість і стабільність кінцевого продукту.

Комп'ютерно-інтегровані технології поєднують САД (комп'ютерне проектування), САМ (комп'ютерне виробництво) та САЕ (комп'ютерний інженерний аналіз) системи, що дає змогу повністю оцифрувати весь процес створення виробу. Використання таких технологій у 3D-друку дозволяє на етапі проектування оптимізувати модель, точно розрахувати структуру та властивості виробу, а також протестувати його ще до фактичного виробництва. САМ-системи надають можливість програмувати принтери для максимально ефективного друку, регулюючи параметри процесу, щоб забезпечити точність, повторюваність та відповідність проекту.

Автоматизація контролю та обслуговування обладнання також має важливе значення в 3D-друці. Завдяки системам зворотного зв'язку та моніторингу в реальному часі можна виявляти й коригувати відхилення у процесі друку, уникати дефектів і знижувати рівень відходів. Крім того, автоматизовані системи дозволяють швидко та точно адаптувати виробничі процеси до індивідуальних потреб, що підходить для масової кастомізації та серійного виробництва з індивідуальними налаштуваннями.

1.2 Комп'ютерно-інтегровані технології на виробництві

Комп'ютерно-інтегровані технології (КІТ) є основою сучасного виробництва, об'єднуючи різні аспекти проектування, інженерії, виробництва та управління. Вони включають в себе використання комп'ютерних систем для автоматизації і оптимізації процесів, що дозволяє підприємствам підвищити ефективність, точність і швидкість виконання завдань. Основні компоненти КІТ – це системи САД (комп'ютерного проектування), САМ (комп'ютерного виробництва), САЕ (комп'ютерного інженерного аналізу) і САС (систем автоматизованого складання), які працюють у тісній інтеграції, забезпечуючи повний цикл виробничих операцій.

На етапі проектування системи САД дозволяють інженерам створювати цифрові 3D-моделі виробів, що дає змогу не лише візуалізувати кінцевий продукт, а й тестувати його на міцність, стійкість і інші ключові параметри. Виробничий процес реалізується за допомогою САМ-систем, які забезпечують управління обладнанням та оптимізують послідовність операцій. Це дозволяє автоматично переносити проекти з етапу проектування до виробництва, скорочуючи час на підготовку до роботи та мінімізуючи ймовірність помилок (рис. 1.1) [6].

САЕ-системи дають змогу інженерам проводити розрахунки та аналізи ще на етапі проектування. Це дозволяє зменшити кількість фізичних прототипів і тестів, виявляючи можливі слабкі місця конструкції заздалегідь, що в результаті значно знижує витрати і підвищує якість кінцевого продукту. Системи автоматизованого складання (САС) використовуються на завершальному етапі, забезпечуючи точну та швидку збірку компонентів, що особливо важливо в умовах масового виробництва.

Комп'ютерно-інтегровані технології також сприяють інтеграції всієї виробничої інформації в єдину систему, що дозволяє ефективно керувати процесами, швидко реагувати на зміни та адаптувати виробничі лінії. Це стає

можливим завдяки концепціям "розумного виробництва" і "Інтернету речей" (IoT), які забезпечують зв'язок між обладнанням та його віддалений контроль.

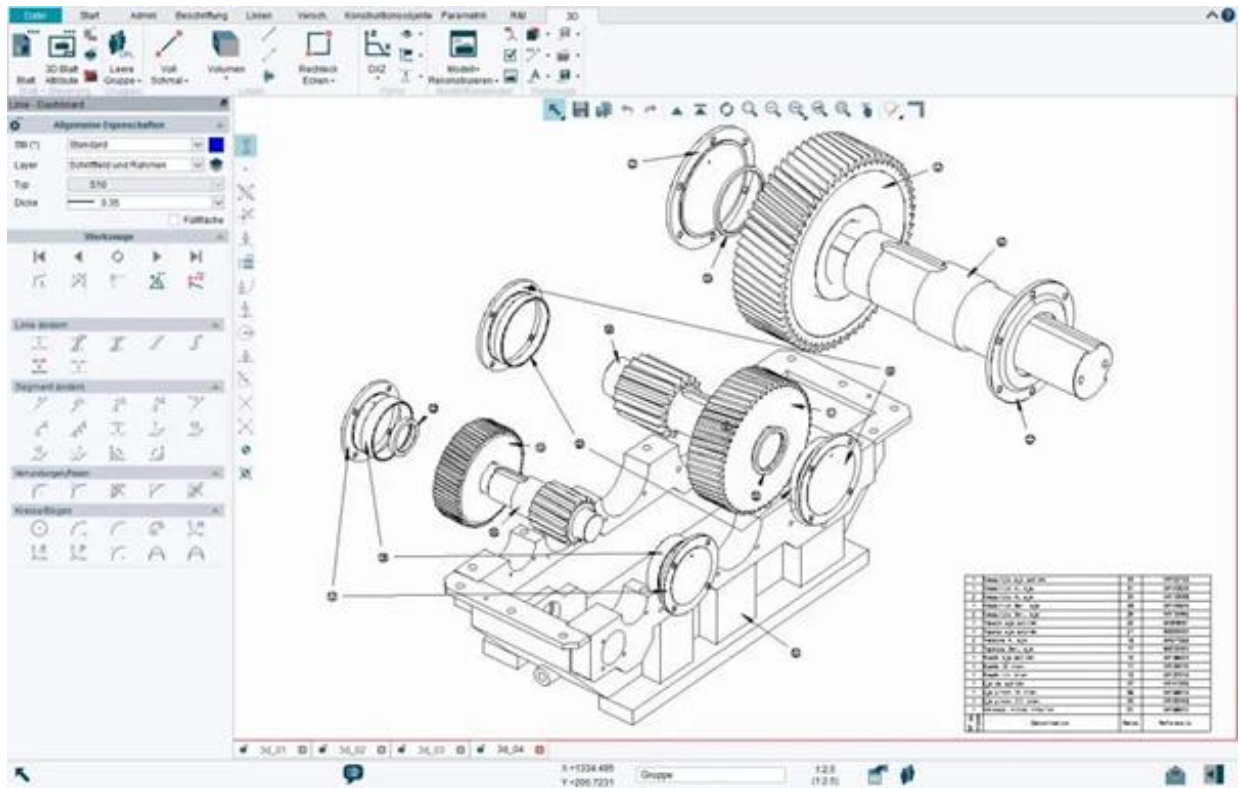


Рисунок 1.1 – Приклад роботи програми CAD

Всі ці компоненти КІТ разом дозволяють створити єдиний інформаційний простір, де можна відстежувати кожен етап виробництва, забезпечуючи прозорість, прогнозованість та надійність роботи.

1.3 Історія розвитку переваги та недоліки адитивного виробництва

Технології 3D-друку, також відомі як адитивне виробництво, мають відносно коротку, але вражаючу історію, яка починається в 1980-х роках. За цей час вони пройшли шлях від лабораторних експериментів до широкого впровадження у різних сферах, включаючи промисловість, медицину та навіть побут.

Перші експерименти з адитивними технологіями почалися у 1980-х роках. У 1981 році японський дослідник Хідео Кодама створив прототип технології для виробництва тривимірних об'єктів за допомогою полімерного матеріалу, який тверднув під впливом ультрафіолетового світла. Винахід Хідео Кодами вважається одним із перших прообразів сучасних технологій 3D-друку, але через брак фінансування він не зміг завершити розробку (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Хідео Кодама

У 1990-х роках дослідники розробили інші методи 3D-друку, що розширило потенціал технології та привернуло увагу промисловості. Одним із таких методів став Fused Deposition Modeling (FDM) або моделювання методом наплавлення, винайдений Скоттом Крапом у 1989 році. Цей метод дозволяв створювати об'єкти шляхом наплавлення термопластика, що проходить через гарячу екструдерну головку і застигає в процесі нанесення шарів. FDM став популярним у промисловому виробництві завдяки доступності матеріалів і низькій вартості обладнання.

Іншою важливою технологією, розробленою у цей час, була Selective Laser Sintering (SLS) – селективне лазерне спікання, що базується на використанні лазера для спікання порошкового матеріалу. Ця технологія забезпечила можливість створення більш міцних та складних деталей, що стало перевагою для промислового використання (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Скотт Крамп

Адитивне виробництво, або 3D-друк, кардинально змінило спосіб створення фізичних об'єктів, дозволяючи виготовляти деталі безпосередньо з цифрової моделі. Це відкриває широкі можливості для виробництва складних структур, проте має свої обмеження. Розглянемо основні переваги та недоліки адитивного виробництва, що визначають його застосування [6].

До переваг адитивного виробництва можна віднести швидке прототипування. 3D-друк дає змогу швидко створювати прототипи для тестування та вдосконалення дизайну. Зменшення часу на розробку дозволяє скоротити загальні витрати на проект і прискорює вихід продукту на ринок. Складна геометрія і дизайн. Технологія дозволяє виготовляти деталі зі складною геометрією, яка недоступна для традиційних методів виробництва. Можливість друку структур із внутрішніми порожнинами, решітками та іншими складними формами розширює дизайн можливості інженерів. Індивідуалізація та персоналізація. Виробництво дозволяє налаштовувати кожну деталь за потребою, що є особливо важливим у медицині, де кожен імплант має бути унікальним.

Задоволення потреб індивідуального замовлення без значного збільшення вартості, особливо для виготовлення кастомізованих продуктів. Зменшення відходів матеріалу. Адитивне виробництво є ефективним з точки зору витрати матеріалів, оскільки матеріал подається тільки там, де він необхідний. Мінімізація відходів, що призводить до зниження матеріальних

витрат та впливу на навколишнє середовище, особливо у порівнянні зі знімними методами обробки. Зниження витрат на виробничі інструменти. Для 3D-друку не потрібно виготовляти спеціальні форми, пресформи чи інші інструменти.

Економія на інструментальних витратах робить адитивне виробництво особливо вигідним для малого серійного або одноразового виробництва. Можливість локалізованого виробництва. 3D-принтери можна встановити безпосередньо біля місць використання продуктів, що дозволяє створювати продукцію на місці. Зменшення логістичних витрат і часу на доставку, що може бути важливим для віддалених регіонів або при терміновому замовленні. Економія на складуванні. Можливість виробляти продукцію "на вимогу" зменшує потребу в зберіганні готових виробів. Зниження витрат на складські приміщення та логістику, а також можливість підтримувати менші запаси.

До недоліків адитивного виробництва можна віднести обмеження в масштабі виробництва. 3D-принтери мають обмежений робочий об'єм, тому виготовлення великих деталей може бути складним і затратним. Для виготовлення великих об'єктів може знадобитися збірка з декількох частин, що підвищує складність і вартість. Висока вартість матеріалів. Матеріали для 3D-друку, особливо високоякісні або спеціалізовані, можуть бути значно дорожчими за традиційні. Підвищення вартості виробництва, особливо для промислових металів та біосумісних матеріалів, робить 3D-друк недоступним для деяких проєктів.

Вимоги до постобробки. Після друку багато виробів потребують додаткової обробки для досягнення необхідної якості поверхні або міцності. Постобробка займає додатковий час і збільшує загальну вартість виробництва. Механічні властивості та обмеження якості. У деяких випадках деталі, виготовлені на 3D-принтері, мають меншу міцність порівняно з деталями, виготовленими традиційними методами. Обмеження у використанні для критичних конструкцій або деталей, які піддаються високим навантаженням. Швидкість виробництва для масового виробництва. Адитивне виробництво є

значно повільнішим порівняно з литтям чи штампуванням для великих обсягів продукції. Для масового виробництва 3D-друк може бути неефективним через тривалий час на виготовлення кожної одиниці продукції. Обмеження у виборі матеріалів. Не всі матеріали можуть бути використані для 3D-друку, а деякі технології друку працюють лише з певними видами матеріалів (наприклад, фотополімери для SLA або пластики для FDM). Обмежений вибір матеріалів може обмежити можливості застосування 3D-друку у різних галузях.

Технологічні обмеження та точність. Незважаючи на розвиток технологій, досягнення високої точності та гладкості поверхні досі є складним завданням для деяких методів. Деякі види 3D-друку не можуть досягти високої деталізації або якісної поверхні, що обмежує їх застосування у галузях, де потрібна висока точність.

1.4 Матеріали та сфери застосування 3D-друку в промисловості

У технології 3D-друку використовується широкий спектр матеріалів, які варіюються залежно від методу друку, вимог до міцності, точності та умов експлуатації готового виробу. Матеріали для 3D-друку поділяються на кілька основних категорій: пластики, метали, фотополімери, композитні матеріали та біоматеріали. Кожен тип має свої особливості, переваги і недоліки, що робить його придатним для різних застосувань.

Пластики є найбільш поширеними матеріалами для 3D-друку, особливо у технологіях FDM (наплавлення) та SLS (лазерне спікання). Їх популярність зумовлена доступністю, невисокою вартістю та простотою використання. PLA (полілактид), наприклад, є біорозкладним пластиком на основі рослинної сировини. Він відрізняється низькою температурою плавлення та простотою друку, проте має низьку теплостійкість і ламкість. ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол) – більш міцний і теплостійкий пластик, проте для друку ним потрібна підігрівна платформа, а сам процес супроводжується виділенням неприємного запаху. PETG (поліетилентерефталат-гліколь) об'єднує

властивості PLA та ABS, він має високу ударну міцність і відносну гнучкість, проте трохи дорожчий і менш жорсткий (рис. 1.4) [7].

Для виготовлення високоточних і міцних деталей у промислових 3D-принтерах використовуються метали. Серед найпоширеніших матеріалів – титан, алюміній і нержавіюча сталь. Титан вирізняється легкістю, стійкістю до корозії і високих температур, що робить його ідеальним для авіаційної та медичної сфер. Алюміній є легким і корозійностійким матеріалом, який часто використовується у автомобільній та авіаційній промисловості. Нержавіюча сталь – це міцний і корозійностійкий матеріал, ідеальний для деталей машин, проте має нижчу гнучкість порівняно з іншими металами (рис. 1.5).



Рисунок 1.4 – Пластики для 3D-принтера



Рисунок 1.5 – Метали для 3D-принтера

Фотополімери використовуються у технологіях SLA (стереолітографія) та DLP (цифрова світлова обробка) і є рідкими до затвердіння під дією ультрафіолетового світла. Вони забезпечують високу деталізацію та ідеальну гладкість поверхні, але зазвичай менш міцні та теплостійкі. Інженерні фотополімери є більш міцними, підходять для функціональних деталей, однак коштують дорожче (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Фотополімерна смола для 3D-принтера

Композитні матеріали поєднують властивості базового пластику і додаткових армувальних елементів, таких як вуглецеве волокно, скловолокно або металеві порошки. Наприклад, PLA або ABS з вуглецевим волокном характеризується високою міцністю, легкістю і стійкістю до деформації. Нейлон з армуванням скловолокном також має високу міцність і жорсткість, проте потребує спеціальних умов друку (рис. 1.7).

Біоматеріали активно розвиваються в 3D-друці для застосування у біомедицині, особливо у виробництві біосумісних імплантів та каркасів для тканинної інженерії. Наприклад, гідрогелі використовуються для створення каркасів для клітинного росту, що дозволяє створювати середовище для розвитку живих тканин. Полілактид (PLA) також популярний у медицині завдяки біосумісності та можливості біорозкладу, однак його міцність та

термостійкість обмежені, що робить його непридатним для критично важливих імплантів (рис. 1.8).



Рисунок 1.7 – Композитні матеріали для 3D-принтера

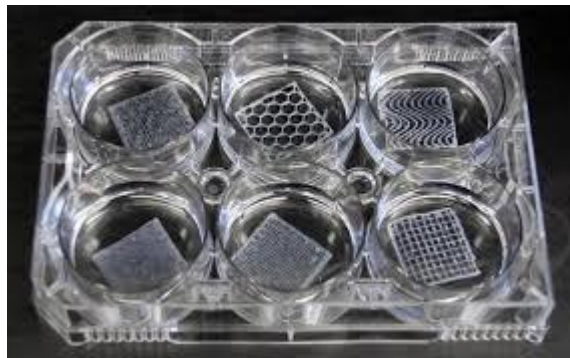


Рисунок 1.8 – Біоматеріали для 3D-принтера

Таким чином, матеріали для 3D-друку постійно розвиваються і розширюються, що дозволяє інженерам обирати оптимальний матеріал залежно від його механічних властивостей, стійкості до зовнішніх впливів, біосумісності та економічної доцільності. Залежно від обраного матеріалу, 3D-друк знаходить застосування у різних галузях, від промислового виробництва до медицини й аерокосмічної індустрії.

3D-друк широко застосовується в промисловості завдяки своїм можливостям створювати складні деталі з високою точністю та швидкістю, що

сприяє розвитку різноманітних галузей. Адитивне виробництво стало ключовою технологією для прототипування, виготовлення функціональних деталей, виробничого обладнання та навіть готових продуктів.

Авіаційна та космічна галузі є одними з основних користувачів технологій 3D-друку, оскільки ці галузі потребують міцних, легких і високоточних деталей, які витримують екстремальні умови. 3D-друк дозволяє зменшувати вагу конструкцій, оптимізуючи їх форму без втрати міцності, що є особливо важливим для літальних апаратів. Завдяки цьому знижується витрата палива та експлуатаційні витрати. Крім того, адитивні методи значно скорочують час виробництва деталей для космічних місій, що робить їх ідеальними для виготовлення унікальних або обмежених серій компонентів (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Космічна галузь 3D-друк

В автомобілебудуванні 3D-друк застосовується як для створення прототипів, так і для виробництва запчастин. Це дозволяє значно прискорити процес розробки нових моделей і знизити витрати на виробництво. Крім того, завдяки технологіям адитивного виробництва можна виробляти індивідуальні деталі для класичних автомобілів, які більше не випускаються серійно. В автомобільній індустрії також активно розвивається виготовлення деталей для високопродуктивних двигунів та кузовних елементів (рис. 1.10) [8].



Рисунок 1.10 – Автомобілебудування 3D-друк

У медицині 3D-друк використовується для створення імплантів, протезів, а також спеціалізованих хірургічних інструментів. Індивідуальний підхід до кожного пацієнта стає можливим завдяки скануванню та виготовленню імплантів, які ідеально підходять для конкретної анатомії. 3D-друк також використовується для створення моделей органів пацієнтів, які допомагають лікарям краще підготуватися до складних операцій. У галузі біодруку технології дозволяють створювати тканини для досліджень, що потенційно може привести до вирощування органів для трансплантації (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Медицина 3D-рук

3D-друк поступово завойовує позиції і в архітектурі та будівництві, дозволяючи швидко створювати макети будівель та навіть повноцінні будівельні елементи. Будівельні 3D-принтери здатні друкувати стіни та інші структурні частини будівель з використанням бетону, що суттєво знижує витрати на трудові ресурси і скорочує терміни будівництва. Крім того, такі підходи можуть бути особливо корисними в регіонах, які постраждали від стихійних лих, де потрібне швидке відновлення житла (рис. 1.12).



Рисунок 2.12 – Архітектура та будівництво 3D-друк

У сфері промислового виробництва 3D-друк використовується для виготовлення спеціалізованого обладнання, інструментів та прес-форм. Завдяки 3D-друку можна виготовляти інструменти з високою точністю за короткий час, що дозволяє підприємствам швидко адаптуватися до змін у процесі виробництва або при переході на нові продукти. Адитивне виробництво також дає можливість виготовляти деталі складної форми, що значно спрощує конструкцію обладнання і знижує потребу у складних збірних операціях (рис. 1.13).

Технології 3D-друку стають дедалі популярнішими в секторі споживчих товарів. Це включає друк аксесуарів, ювелірних виробів, спортивного обладнання та інших персоналізованих продуктів. Завдяки можливості адаптації дизайну під вимоги клієнта, виробники можуть пропонувати продукцію, створену саме за індивідуальними замовленнями. Наприклад, в

індустрії моди 3D-друк використовують для створення унікальних ювелірних прикрас, взуття та навіть елементів одягу (рис. 1.14).



Рисунок 1.13 – Пресс форма 3D-друк



Рисунок 1.14 – Споживчі товари 3D-друк

Сфери застосування 3D-друку в промисловості продовжують розширюватися завдяки технологічним досягненням та інноваціям в матеріалах і методах друку. Ці технології забезпечують можливості для швидкого та економічно ефективного виготовлення прототипів, унікальних компонентів та навіть готової продукції, що підвищує гнучкість і конкурентоспроможність багатьох галузей. Застосування 3D-друку в авіації,

автомобілебудуванні, медицині, будівництві та виробництві свідчить про значний потенціал адитивних технологій для промисловості і в майбутньому забезпечить ще більше інноваційних рішень для складних виробничих завдань.

1.5 Висновки до першого розділу

Системи автоматизації та комп'ютерно-інтегровані технології є невід'ємною частиною сучасного 3D-друку, значно підвищуючи його ефективність, точність і гнучкість. Вони дозволяють впроваджувати інноваційні рішення у виробництві, що сприяє розвитку таких напрямків, як швидке прототипування, масова кастомізація та виробництво високоточних компонентів.

Комп'ютерно-інтегровані технології на виробництві не лише підвищують ефективність і продуктивність, а й забезпечують високу якість продукції, здатність швидко реагувати на зміни попиту та індивідуальні запити клієнтів. Цей комплекс технологій створює гнучке, адаптивне і конкурентоспроможне виробництво, яке відповідає вимогам сучасного ринку.

Адитивне виробництво має низку переваг, зокрема можливість виготовлення складних деталей з мінімальною кількістю відходів, гнучкість у проектуванні, а також швидкість і доступність при виготовленні прототипів та малих серій. Однак, ця технологія має свої обмеження, такі як висока вартість обладнання, обмежена продуктивність та не завжди відповідний рівень механічних властивостей для масового виробництва. Ці висновки підкреслюють необхідність подальшого розвитку технології та вдосконалення її економічної доцільності.

Різноманітність матеріалів, які можна використовувати у 3D-друку, значно розширилася, включаючи пластики, метали, фотополімери, композити та біоматеріали. Це дозволяє адаптувати технологію під різні потреби і вимоги галузей, проте кожен тип матеріалу має свої особливості та обмеження. Вибір

матеріалу є критично важливим для успішного застосування 3D-друку у виробництві, і розвиток нових матеріалів продовжує відкривати нові можливості для цієї технології.

3D-друк стає важливим інструментом у багатьох галузях промисловості, від авіаційної та космічної до медицини і споживчих товарів. Його застосування дозволяє скоротити час на виготовлення прототипів, створювати легкі й складні конструкції, персоналізувати вироби та оптимізувати процеси. Ці можливості сприяють зростанню економічної ефективності та конкурентоспроможності промисловості.

2 ЯКІСТЬ ВИРОБІВ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

2.1 Основні показники якості виробів адитивного виробництва

Забезпечення якості високотехнологічної продукції є важливим питанням, яке визначає конкурентоспроможність продукції та попит на неї на ринку. Це важливе питання. Як і в сучасному виробництві, основою підвищення економічної ефективності адитивного виробництва є комплексний підхід до управління якістю продукції.

Якість продукції є фізичною категорією і визначається багатьма факторами, включаючи дизайн, технологію, організацію, виробництво і контроль якості. Це фізична категорія, яка визначається. Якість продукції – це фізична категорія, що визначається низкою конструкторських, технічних, організаційних і технологічних факторів, які проявляються на всіх взаємопов'язаних етапах життєвого циклу продукції.

Обґрунтуванням взаємопов'язаності етапів життєвого циклу продукції є те, що ці характеристики якості полягає в тому, що ці характеристики якості встановлюються в процесі проектування, забезпечуються в процесі виробництва та підтримуються під час експлуатації. При створенні системи управління якістю в адитивному виробництві необхідно застосовувати методи контролю якості використовуваних матеріалів і методи оперативного технічного контролю.

Методи операційного технічного контролю, що забезпечують якість і відтворюваність технічних стадій процесу. Комплексний контроль якості та його детальне документування особливо актуальні для серійного (дрібносерійного) виробництва. стратифіковане виробництво продукції, для якої дуже важлива експлуатаційна безпека, наприклад, в автомобільній, авіаційній, медичній та інших галузях.

Під якістю продукції як результату діяльності або процесів (деталей, виробів, у тому числі виробів адитивного виробництва) розуміють сукупність

властивостей продукції, що належать до її здатності задовольняти встановлені та передбачувані певні потреби відповідно до її призначення. Ці властивості залежно від вимог споживачів можуть бути різними як за рівнем, так і за поєднанням.

До основних якісних характеристик адитивних виробів відносяться:

- міцність (статична, циклічна, втомна);
- довговічність;
- технологічність;
- сумісність;
- зносостійкість оброблених поверхонь;
- корозійна та кавітаційна стійкість;
- спеціальні властивості (відбивна здатність, теплостійкість; електропровідність, герметичність тощо);
- естетичність;
- екологічність.

Ці якісні характеристики продукту конкретно відображають його експлуатаційне призначення. Такі характеристики, як технологічність, сумісність та екологічність, разом з експлуатаційним призначенням використовуються безпосередньо на стадії виробництва і є показником техніко-економічної ефективності цієї стадії [8].

Більшість експлуатаційних характеристик таких виробів визначаються точністю геометричних параметрів робочої поверхні виробу та фізико-хімічними властивостями поверхневого шару. Визначення параметрів якості виробу, отриманого адитивним литтям, є непростим завданням. Якість виробу, отриманого методом адитивного лиття, визначається низкою факторів на різних етапах виробництва, зокрема фізико-хімічними та механічними властивостями вихідного матеріалу, технічними параметрами конкретного процесу, характеристиками лазерного випромінювання (SLA, SLS, SLM, інші методи), режимом адитивного лиття, складом атмосфери, в якій здійснюється процес (рис. 2.1) [9].

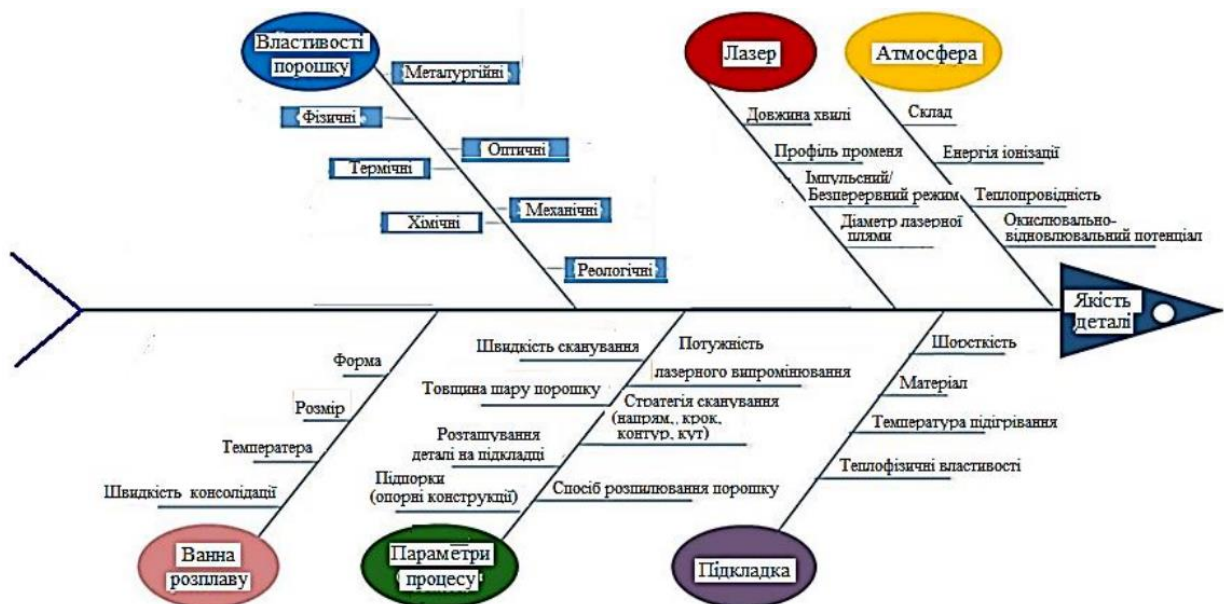


Рисунок 2.1 – Причинно-наслідкова діаграма факторів (діаграма Ісікави), що впливають на якість виробів, отримуваних селективним лазерним сплавленням (SLM)

Причинно-наслідкова діаграма Ісікави, що аналізує фактори, які впливають на якість виробів, отриманих методом селективного лазерного сплавлення (SLM), включає декілька ключових аспектів. Серед матеріальних факторів важливу роль відіграють склад порошкових матеріалів, їх гранулометричний розподіл, чистота, а також рівень вологості та можливість повторного використання.

Обладнання має значний вплив на якість, зокрема, це потужність і стабільність роботи лазера, розмір лазерного променя, стан платформи (температура, вібрації) і рівномірність системи подачі порошку. Методологія процесу, включаючи налаштування параметрів (швидкість сканування, потужність лазера, товщина шарів), стратегію укладання шарів і подальшу термообробку, також є вирішальними. Важливий людський фактор, зокрема рівень кваліфікації персоналу, точність налаштування обладнання і дотримання стандартів виробництва.

2.2 Методи контролю якості виробів адитивного виробництва

Геометрична точність поверхні виробу є одним з найважливіших показників якості виробів, виготовлених за технологією адитивного виробництва. Точність геометричних параметрів адитивного виробу – це комплексне поняття, яке включає в себе точність розмірів елементів виробу, геометричної форми і взаємного розташування елементів.

Існує досить широкий діапазон допусків на точність виробів, виготовлених різними методами адитивного виробництва. Допуски варіюються від мікрометрів (і часток мікрометрів) до часток міліметрів (табл. 2.1).

Серед методів адитивного виробництва найбільш високу точність забезпечує стереолітографія (SLA). Проте інші технології, як-от селективне лазерне спікання (SLS), селективне лазерне плавлення (SLM), моделювання методом наплавлення (FDM) та інші, також мають значний потенціал для підвищення точності. Рівень точності в адитивному виробництві визначається аналітичними й технологічними похибками, що виникають на різних етапах процесу.

Таблиця 2.1 – Характеристики точності виконання виробів у деяких способах адитивного виробництва

Спосіб адитивного виробництва	Точність виконання, мм
SLA	$\pm (0,001 \div 0,002)$
SLS	$\pm 0,05$
SLM	$\pm 0,04$
FDM	$\pm 0,2$

Аналітичні похибки зумовлені неточностями пошарового створення моделі та триангуляцією 3D CAD-моделі. Технологічні ж похибки спричинені

змінами розмірів і об'ємів матеріалу, що відбуваються внаслідок його структурних перетворень, а також можливими неточностями в роботі обладнання. Для досягнення більшої точності виробів використовуються автоматизовані системи контролю параметрів виробничого процесу в режимі реального часу. Одним із ефективних підходів є інтеграція адитивних і традиційних методів обробки матеріалів, створюючи гібридні технології, що поєднують «додавальне» та «віднімальне» формування.

Технологічні похибки, які виникають внаслідок змін у структурі матеріалу (наприклад, через усадку чи залишкові напруження), можна компенсувати масштабуванням 3D CAD-моделі. Це вимагає детального аналізу впливу параметрів виробництва на структуру та властивості матеріалу. Водночас, важливим напрямом у досягненні високої точності є застосування різноманітних методів постобробки. Комплексна стратегія для підвищення точності повинна враховувати взаємозв'язок параметрів кожного етапу процесу – від моделювання до остаточної обробки виробу. Значну роль відіграє метрологічне забезпечення, тобто використання сучасних засобів вимірювання та контролю.

Для моніторингу геометричних параметрів виробів, виготовлених за допомогою адитивних методів, використовуються різні типи вимірювальних приладів. Однак контактні вимірювальні методи часто не підходять для об'єктів складної форми або поверхонь з високою шорсткістю. Розміри наконечників контактних систем вимірювання співставні з мікрорельєфом об'єкта, що додає похибку до координатних вимірювань.

Тому для точного вимірювання складних поверхонь доцільно використовувати фотограметричні системи, лазерні сканери або їхні модифікації. Ці інструменти забезпечують високу точність, швидкість сканування та великий обсяг вимірюваної інформації. Наприклад, для перевірки геометричних параметрів виробів, виготовлених за допомогою адитивного виробництва, широко застосовуються високоточні оптико-цифрові системи сканування і портативні лазерні сканери, які дозволяють

отримувати вимірювання з точністю до ± 25 мкм навіть для складних форм (рис. 2.2).



а)



б)

а – оптико-цифрова система Iscan II (Imetric, Швейцарія);

б – система лазерного сканування FARO ScanArm (Faro, США)

Рисунок 2.2 – Вимірювальні системи, що застосовуються в адитивному виробництві

2.3 Геометрична точність виробів адитивного виробництва

У процесах адитивного виробництва, як і в традиційних технологіях, велике значення мають поверхні виробів, особливо їх поверхневі шари. Саме ці шари зазнають впливу робочих навантажень та зовнішніх факторів у процесі експлуатації.

Якість поверхні адитивно виготовлених виробів, так само як у традиційних деталях, характеризується станом поверхневого шару, який формується під впливом певних технологічних методів. Ключовими параметрами якості поверхневого шару, особливо для виробів, виготовлених методом пошарового нарощування, є:

- нерівності поверхні, особливо шорсткість;
- структура металу (розмір і форма зерен, текстура, наявність включень, густина мікро- та субмікродефектів);

- фазовий і хімічний склад;
- механічні властивості поверхневого шару, як-от мікротвердість;
- залишкові напруження (тип, характер розподілу, величина).

Ці параметри впливають на експлуатаційні характеристики виробів адитивного виробництва, зокрема на їх зносостійкість, стійкість до втоми, корозійну стійкість, вібростійкість та інші властивості.

Для оцінки якості поверхневого шару адитивних виробів використовуються різноманітні методики, як стандартні, так і адаптовані до особливостей адитивного виробництва. Одним з найважливіших показників якості поверхні є шорсткість, яка суттєво впливає на експлуатаційні властивості виробу.

Для цього критичними є точність вимірювання та можливість реєстрації різних параметрів шорсткості, що характеризують висоту, напрям довжини профілю, форму нерівностей та інші характеристики.

Одним із завдань є вимірювання шорсткості у важкодоступних місцях і на поверхнях, що орієнтовані під різними кутами відносно вектора нарощування. Як правило, для вимірювання шорсткості використовуються профілометри та профілометри-профілографи з високою роздільною здатністю, що забезпечують мінімальні похибки вимірювання.

Значення шорсткості, отримані для адитивних виробів у різних дослідженнях, суттєво різняться. Це зумовлено багатьма факторами, як-от методикою і точністю вимірювання, типом використаного обладнання, характеристиками процесу адитивного виробництва на різних установках, а також видом і рівнем постобробки.

У табл. 2.2 наведено узагальнені значення шорсткості поверхні виробів для деяких методів адитивного вирощування та після постобробки (рис. 2.3 – 2.4).

На рис. 2.3 наведено дані щодо шорсткості поверхні для різних методів адитивного виробництва та застосовуваних матеріалів.

Таблиця 2.2 – Шорсткість поверхні виробів адитивного виробництва

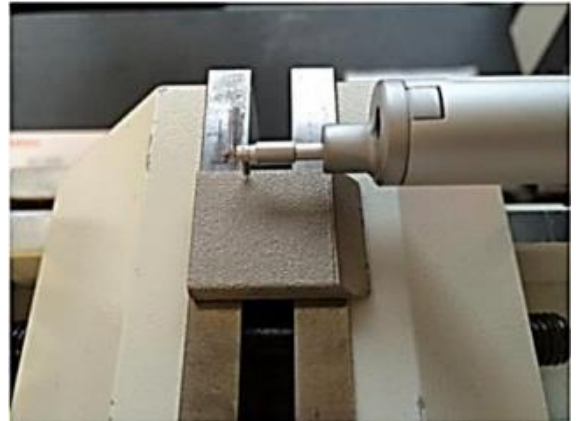
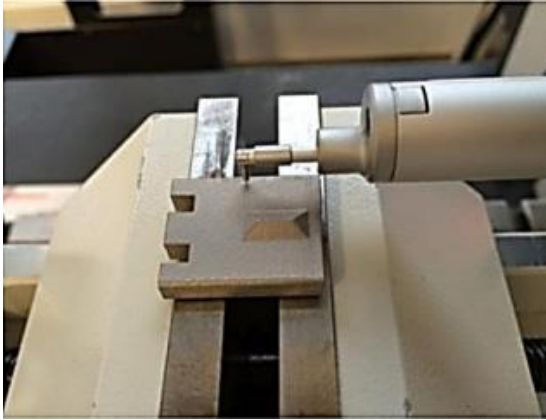
Процес адитивного виробництва	Шорсткість поверхні виробів адитивного виробництва (без застосування постпроцесу) Ra, мкм	Шорсткість поверхні після застосування постобробки (найкращі результати) Ra, мкм
SLA	2÷40	0,64
SLS	5÷35	0,8
FDM	9÷40	0,3
3DP	12÷27	–
LOM	6÷27	–
MJM	3÷30	–

Одним із ключових аспектів якості виробів, виготовлених адитивним методом, є якість поверхневого шару, зокрема його структурні параметри. Особливе значення тут мають технологічні дефекти в матеріалі, природа яких обумовлена особливостями виробничого процесу.

У виробках з металевих матеріалів, виготовлених за допомогою селективного лазерного спікання (SLS) або селективного лазерного плавлення (SLM), часто спостерігаються дефекти, такі як незавершене сплавлення шарів (розшарування), усадкова і газова пористість, мікротріщини.

У полімерних та композитних виробках адитивного виробництва типові дефекти можуть включати недостатню міжшарову адгезію, викривлення, відсутність окремих шарів, мікротріщини, а також формування мікро- та макропористості (рис. 2.5).

Для контролю цих структурних дефектів широко застосовуються методи оптичної та електронної мікроскопії (як трансмісійної, так і скануючої), а також рентгенівська дифракція і мікрорентгеноспектральний аналіз. Ці методи дозволяють точно визначити наявність і характер дефектів, що впливають на експлуатаційні властивості виробів (рис. 2.6) [10].



а)

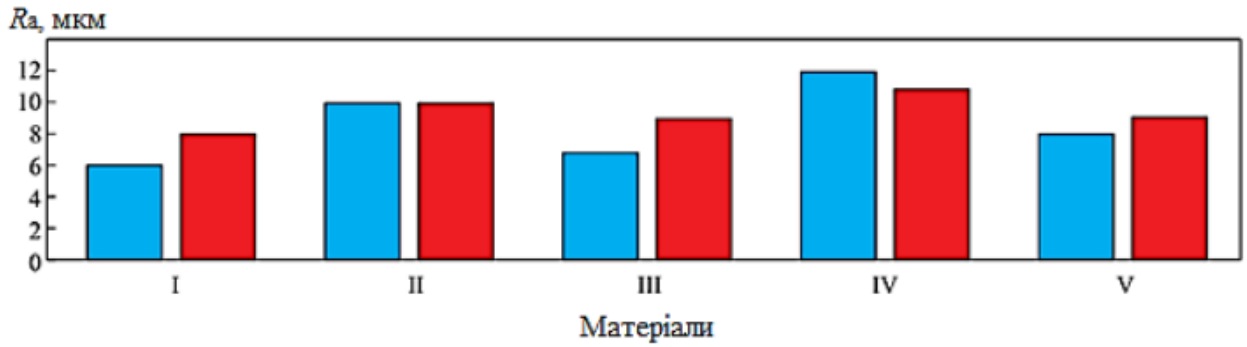


б)

а – контроль SLS-виробів профілометром;

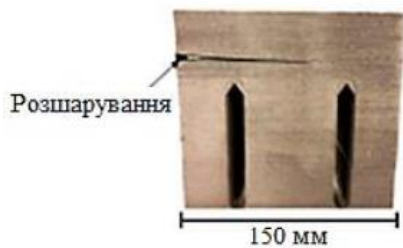
б – застосування профілометра-профілографа Surtronic 3+ (Taylor-Hobson) з діапазоном вимірювання за параметром R_a $99,9 \div 0,01$ мкм, роздільною здатністю 0,01 мкм, похибкою вимірювання $\pm 5\%$

Рисунок 2.3 – Контроль шорсткості виробів, отриманих адитивним вирощуванням

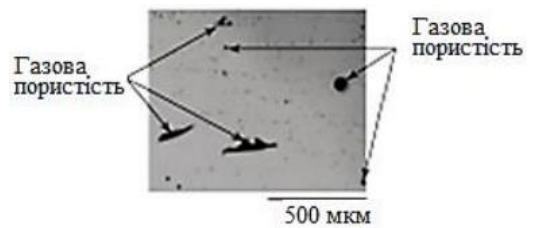


I – Al-сплави; II – Co-сплави; III – Ni -сплави; IV – Ti-сплави; V – інструментальна та нержавіюча сталь

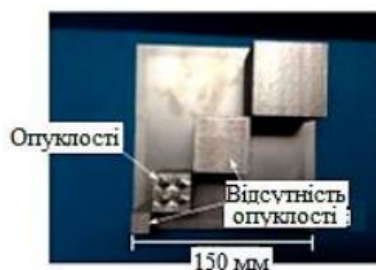
Рисунок 2.4 – Середні значення параметра шорсткості Ra поверхні виробів, що виготовляються з різних матеріалів на установках 3D друку компаній SLM Solution (синій) та EOS (червоний) при товщині шару, що спікається $\delta = 50$ мкм [12]



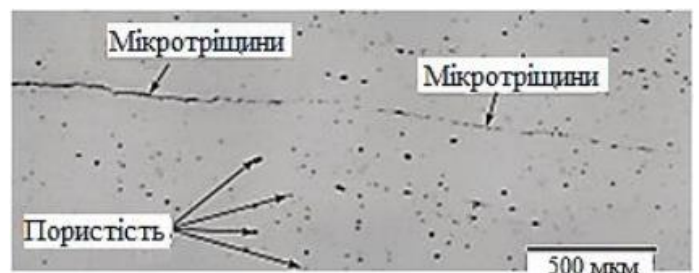
а)



б)



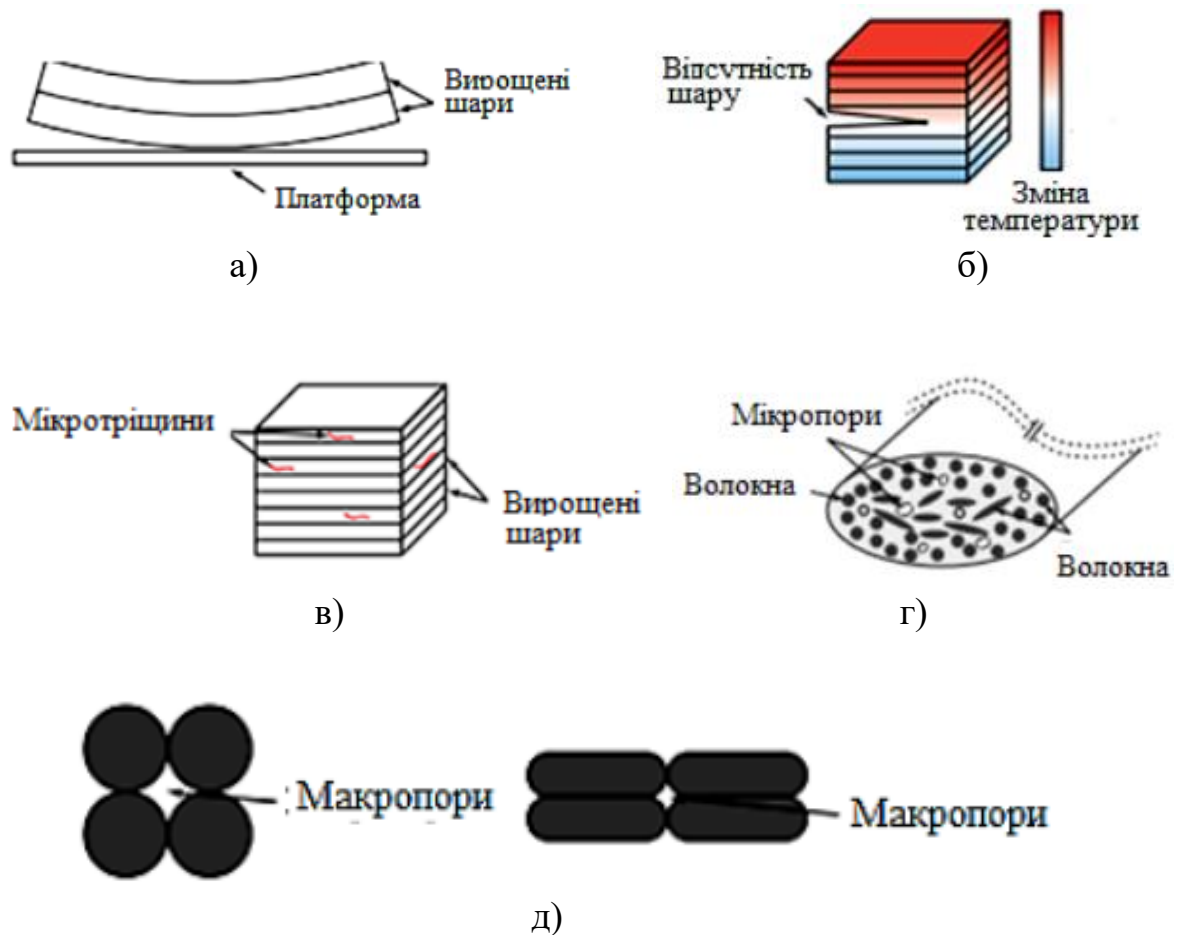
в)



г)

а – відсутність сплавлення; б – технологічна (газова) пористість; в – опуклості; г – мікротріщини

Рисунок 2.5 – Типи дефектів у металевих АВ-виробах



а – коробління; б – відсутність шару; в – мікротріщини; г – мікропори;
д – макропори

Рисунок 2.6 – Типові дефекти в полімерних та композитних виробах АВ

Однак для аналізу складних об'єктів адитивного виробництва звичайні методи контролю мають певні обмеження. Вони часто є руйнівними, що недоцільно при високій вартості матеріалів, і вимагають трудомісткої підготовки зразків, яка займає багато часу. Також ці методи не завжди ефективні для вивчення об'ємних структур виробів, а підготовка зразків може призвести до появи артефактів у поверхневих шарах.

З огляду на ці недоліки та значущість якісного контролю виробів адитивного виробництва, є потреба в розробці нових або модифікації існуючих методів аналізу, пристосованих до особливостей пошарового нарощування.

Серед найбільш перспективних неруйнівних методів, які дозволяють

виявляти як поверхневі, так і внутрішні дефекти, а також точно вимірювати геометричні параметри виробів, виділяють ультразвукову візуалізацію, нейтронну томографію та рентгенівську комп'ютерну томографію (РКТ).

Рентгенівська комп'ютерна томографія (XRCT) є одним із найзатребуваніших методів контролю якості адитивно виготовлених виробів, особливо для дослідження складних геометричних структур із внутрішніми каналами, порожнинами та ґратчастими елементами.

Метод XRCT ефективно інтегровано в процеси пошарового нарощування і він став основним інструментом для контролю якості у виробництві (рис. 2.7, 2.8).

На прикладі (рис. 2.7) показано порівняння неруйнівних методів контролю якості, які застосовуються для виявлення дефектів у виробах адитивного виробництва та для вимірювання їх параметрів. Класифікація розроблена відповідно до місця розташування дефектів і роздільної здатності методів.

Так, оптичні методи здатні забезпечити високу роздільну здатність, але дозволяють перевіряти лише поверхню [13]. Вихрострумові та ультразвукові методи підходять для виявлення дефектів на невеликій глибині, однак їх роздільна здатність зазвичай становить кілька міліметрів.

У результаті оптимальним вибором для дослідження об'ємів складних виробів є рентгенівська комп'ютерна томографія, яка забезпечує роздільну здатність від мікрометра до міліметра.

Метод рентгенівської комп'ютерної томографії (РКТ) базується на аналізі густини матеріалу об'єкта шляхом вимірювання інтенсивності рентгенівського випромінювання, що проходить крізь нього і реєструється детектором. Такий підхід дозволяє створювати тривимірну модель об'єкта, з можливістю подальшого детального перегляду будь-якого його поперечного перерізу.

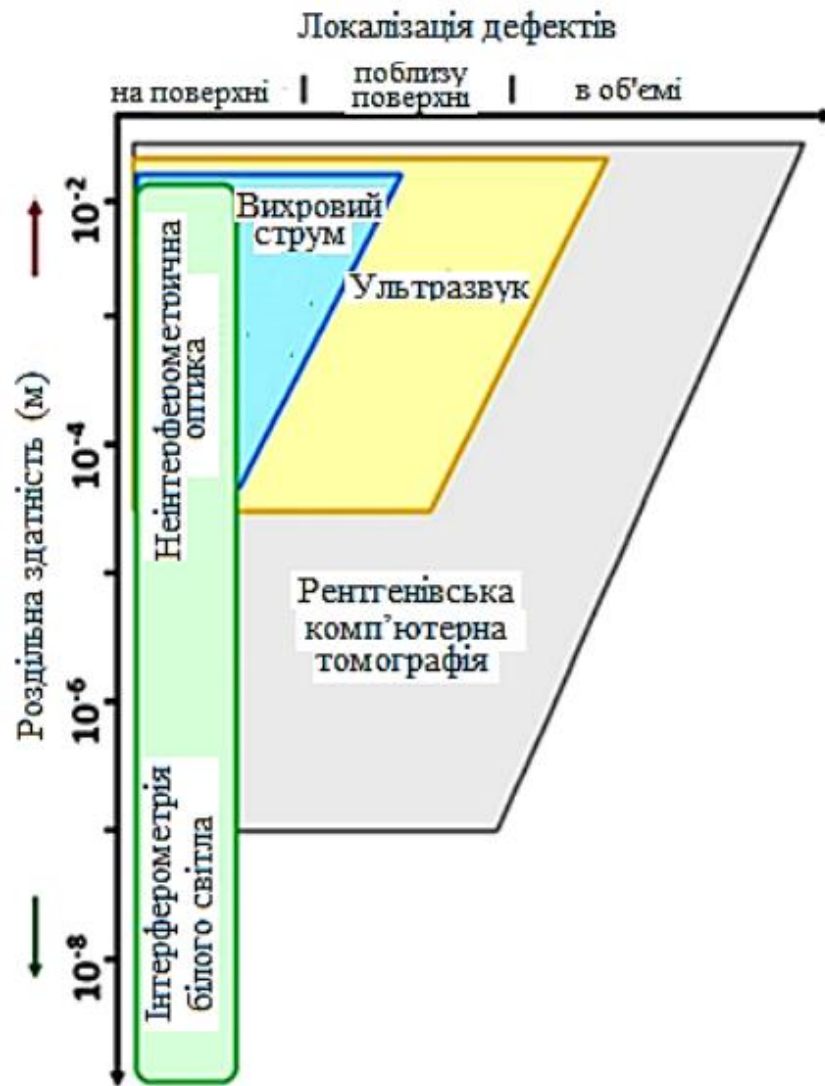
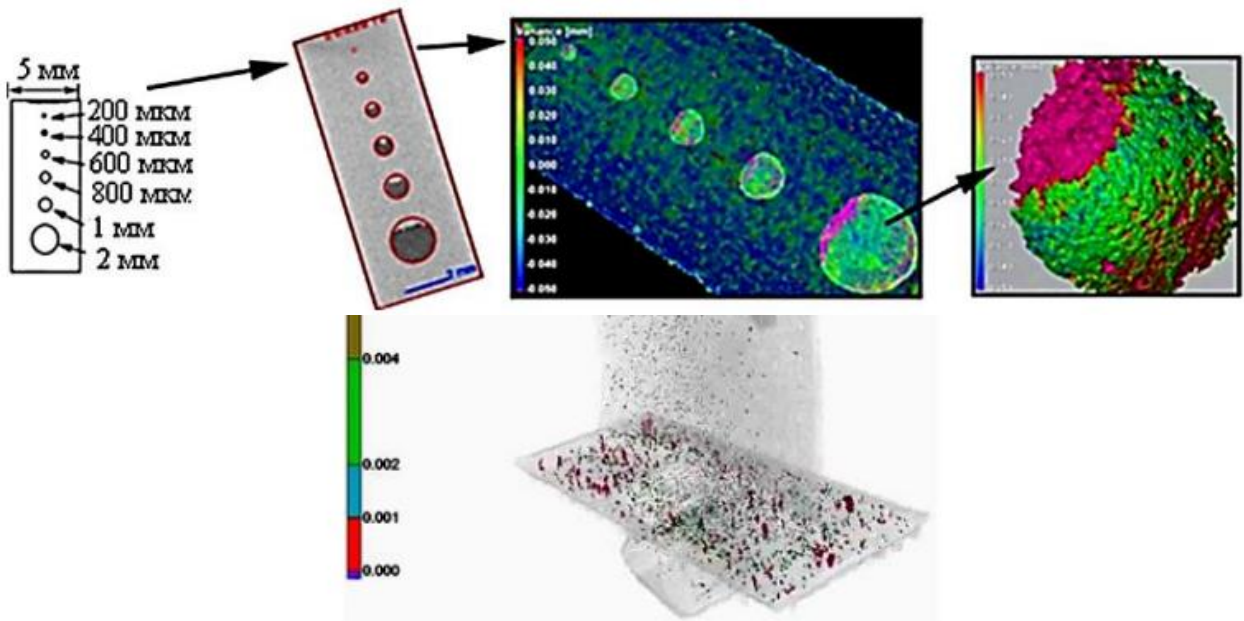


Рисунок 2.7 – Порівняння деяких існуючих методів неруйнівного контролю (залежність розташування дефектів від роздільної здатності)

Високу роздільну здатність у РКТ забезпечують мікрофокусні джерела рентгенівського випромінювання та високочутливі детектори, що дозволяють отримати точні й детальні зображення внутрішньої структури об'єкта (рис. 2.8) [14].

Тривимірне зображення, отримане методом рентгенівської томографії, дозволяє точно визначити як внутрішні, так і зовнішні розміри виробів, створених адитивним методом. Цей підхід також забезпечує можливість детального аналізу внутрішніх поверхонь і каналів, а також виявлення дефектів, таких як порожнечі, пори, тріщини чи сторонні включення [15].



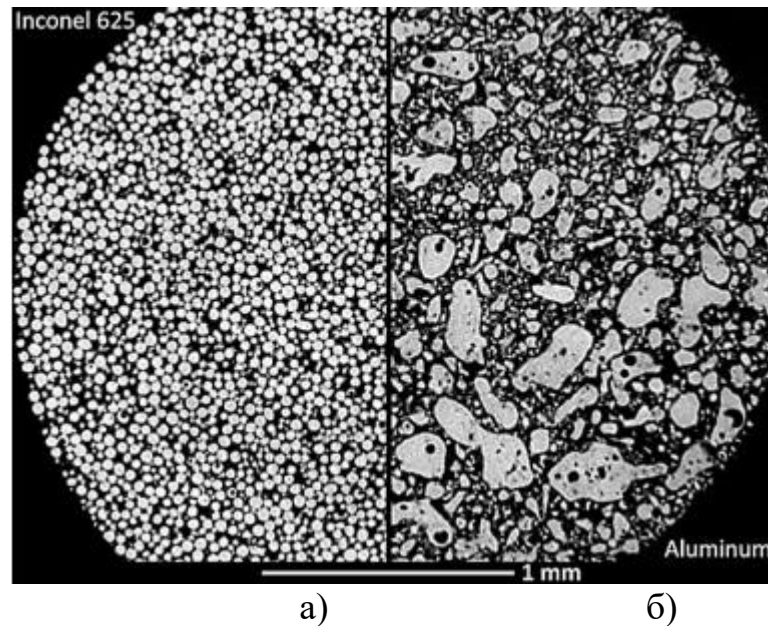
а)

б)

а – аналіз пористості турбінної лопатки з сплаву Ti-6Al-4V; б – РКТ-дослідження виробу з нікель-хромового сплаву (інконель 625) з візуалізацією відхилення геометричних розмірів виробу порівняно з номінальним розміром, тобто щодо базової/номінальної геометрії 3D CAD

Рисунок 2.8 – Застосування РКТ для контролю якості виробів АВ

Застосування рентгенівської томографії є надзвичайно ефективним не лише для оцінки готових виробів, а й для контролю якості початкових матеріалів, таких як порошкові середовища (рис. 2.9), що використовуються в адитивному виробництві. Це важливий крок для забезпечення високої якості кінцевої продукції, адже дефекти у вихідному порошковому матеріалі можуть спричинити проблеми в готових виробах. Наприклад, агломерація або неправильна форма частинок порошку можуть призвести до утворення пористості в SLS-виробах, а наявність пустот чи структурної неоднорідності в матеріалі – до появи тріщин.



- а) – нікель-хромовий сплав (Inconel 625);
 б) – порошок алюмінієвого сплаву

Рисунок 2.9 – РКТ-знімки різних порошків для SLS-процесу з візуалізацією їх дефектності

Дані, отримані за допомогою комп'ютерної томографії, дозволяють проводити віртуальні випробування виробів, моделюючи їхню поведінку в умовах, наближених до реальних. Це дає можливість визначити зони потенційного руйнування та встановити граничні навантаження в об'ємі виробу.

Крім того, комп'ютерна томографія застосовується для порівняння готового виробу з САД-моделлю, що сприяє вдосконаленню процесу та підвищенню якості проектування і виготовлення деталей адитивного виробництва (рис. 2.10) [16].



Рисунок 2.10 – Ітеративний процес оптимізації для проектування та виробництва деталей АВ на основі використання даних РКТ

Статистичний аналіз дефектів на основі результатів РКТ дозволяє моделювати вплив різних параметрів 3D-друку, таких як потужність лазера, швидкість друку та товщина шару, на характеристики готового виробу. Включення РКТ в процес адитивного виробництва сприяє впровадженню зворотного інжинірингу, що підвищує точність та якість продукції.

Контроль якості в реальному часі є надзвичайно важливим у процесі адитивного виробництва. Моніторинг *in situ*, який інтегрується безпосередньо в процес пошарового нарощування, забезпечує оперативне виявлення дефектів на ранніх етапах, що дозволяє знизити витрати на матеріали та обробку. Це вписується у загальну стратегію підвищення якості виробів АВ.

Серед методів моніторингу варто виділити високошвидкісну зйомку (CCD-камери), що дозволяє контролювати швидкоплинні процеси; пірометрію, яка вимірює середню температуру певної зони виробу; та інфрачервону термографію (ІЧТ), що дозволяє аналізувати тепловий цикл оброблюваної зони. Найефективнішим методом є інфрачервона термографія, яка відстежує температуру поверхні виробу шар за шаром, забезпечуючи контроль якості формування виробу та динаміки процесу.

Інфрачервона камера фіксує ближнє інфрачервоне випромінювання в

зоні лазерної обробки, створюючи двовимірну термограму, яка відображає розподіл температури на поверхні виробу. Оскільки температура є ключовим параметром для технологій селективного лазерного плавлення (SLS, SLM), контроль термопрофілю під час друку стає вирішальним для структурної якості виробів.

Метод інфрачервоної термографії забезпечує детальний контроль температурного профілю та виявлення дефектів, таких як пори, тріщини та порушення геометрії (рис. 2.11). Це дозволяє не лише запобігти браку, а й підтримувати точність розмірів та якість поверхні. Вбудовані в систему ІЧ-камери фіксують теплові поля в кожному шарі, що забезпечує безперервний контроль і сприяє виявленню дефектів на ранніх етапах [11].



Рисунок 2.11 – Один із варіантів інтеграції ІЧ-установок в схему SLM-процесу

Таким чином, метод ІЧТ дозволяє контролювати динаміку процесів спікання дисперсних середовищ, особливості плавлення та затвердіння розплавів (SLS, SLM, FDM), забезпечує виявлення та запобігання утворенню найбільш небезпечних дефектів виробів у процесі пошарового вирощування. На базі даних інфрачервоної термографії можливе прогнозування

особливостей формування мікроструктури, які в результаті визначають функціональні властивості виробів (рис. 2.12) [17].

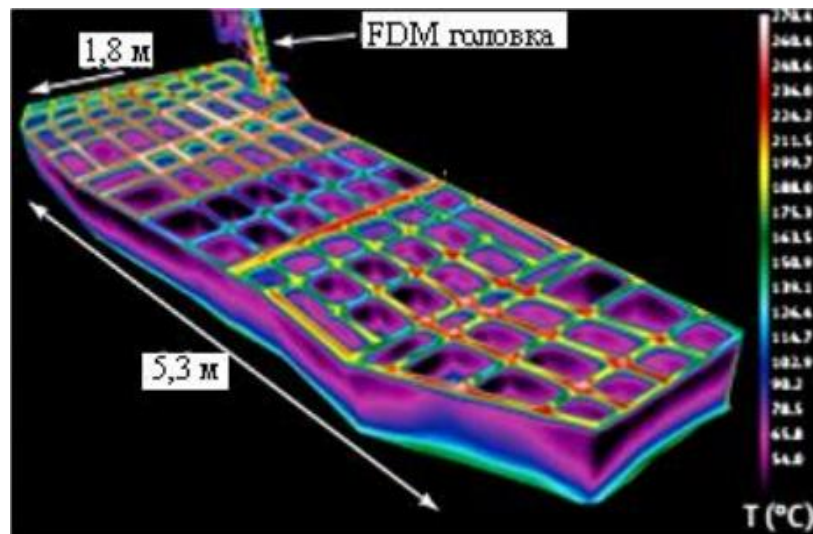


Рисунок 2.12 – Дані розподілення температурних полів для композитних АВ виробів: ІЧ-термограма для ABS/CF-полімеру, FDM (модель для виготовлення тримера пасажирського літака Boeing 777X, розміри 5,3 м × 1,8 м × 1,2 м)

У процесі оптимізації вектора параметрів технології 3D-друку α враховується множина параметрів якості виробів (деталей): роздільна здатність (Resolution) 1 k () min α → (визначається розміром шару, який може бути надрукований); точність (Accuracy) 2 k () min α → (міра того, наскільки точно друкована деталь відповідає оригінальній моделі); шорсткість поверхні (Surface Roughness) 3 k () min α → (міра нерівності поверхні деталі); міцність та витривалість (Strength and Durability) 4 k () max α → (наскільки добре друкована деталь витримує навантаження та довготривале використання); деталізація (Detailing) 5 k () min α → (відображає можливість відтворення деталей з високою точністю і збереженням найменших деталей і текстур); економічність (Economy) 6 k () min α → (витрати на виготовлення деталі) тощо [18].

2.4 Формування захисних покриттів на поверхні виробів адитивного виробництва

Зменшення шорсткості поверхні виробів, створених за допомогою адитивного виробництва, можливе завдяки технології нанесення покриттів, відомій як адитивна постобробка. Цей підхід має значні переваги, зокрема збереження механічних властивостей поверхневого шару, а також можливість застосування на виробках зі складною геометрією, що часто є проблемою для традиційних методів обробки. Актуальність цієї технології зумовлена тим, що методи пошарового синтезу не завжди гарантують необхідні експлуатаційні характеристики виробів, зокрема через обмеження у виборі матеріалів та особливості формування структури.

Нанесення покриттів відіграє ключову роль у модифікації поверхонь адитивних виробів, охоплюючи різноманітні процеси для покращення якості та функціональності. Ці процеси спрямовані на перетворення напівфабрикатів на готові вироби, які відповідають заданим вимогам. Покриття можуть підвищувати естетичність деталей, забезпечувати потрібну поверхневу якість або додавати функціональні властивості, такі як міцність, твердість, хімічна стійкість чи електропровідність.

Одним із ключових етапів постобробки є підготовка поверхні до нанесення покриття, що впливає на такі параметри, як суцільність, адгезія та захисні властивості. Цей процес передбачає видалення органічних забруднень, жирів, оксидів і дефектів, а також активування поверхні. Видалення забруднень і активація можуть виконуватися як у межах одного технологічного циклу, так і окремо. Зазвичай це сприяє підвищенню енергетичного рівня поверхні, що поліпшує її адгезійні властивості.

Існує низка методів підготовки поверхні, що включають механічні (струменево-абразивна обробка, полірування), хіміко-термічні, електрофізичні, а також вплив світловими потоками. Кінцевий вибір методу залежить від призначення покриття, яке може бути декоративним, захисним

або функціональним. Декоративні покриття усувають видимі дефекти, додають естетичності та використовуються в побутових виробках, ювелірній і медичній галузях.

Захисні покриття створені для протидії зовнішнім факторам, таким як знос, корозія, температурні чи радіаційні впливи. Вони можуть бути зносостійкими, корозійностійкими, теплостійкими, водовідштовхувальними чи електроізоляційними, залежно від потреб виробу. Функціональні покриття забезпечують спеціальні властивості, наприклад терморегуляцію або особливі оптичні характеристики, дозволяючи основі виконувати роль несучого каркаса.

Вироби для медичних цілей часто потребують покриттів із біоактивними чи біоінертними властивостями, що сприяють, наприклад, процесу остеointegraції в ендопротезуванні. Часто використовуються комбіновані покриття, які об'єднують кілька функцій, наприклад декоративно-захисні чи захисно-функціональні, для досягнення оптимальних експлуатаційних характеристик (рис. 2.13).



Рисунок 2.13 – Стереолітографічний виріб до SLA та після нанесення декоративно-функціонального покриття хрому

У постпроцесах адитивного виробництва використовуються різні типи покриттів, які за своїм хімічним складом поділяються на органічні, неорганічні та комбіновані. Органічні покриття, представлені лакофарбовими матеріалами, мають товщину від десятків до сотень мікрометрів і застосовуються як для декоративних, так і для захисних функцій. Наприклад, такі покриття дозволяють захищати металеві вироби від корозії, одночасно покращуючи їхній зовнішній вигляд. Їх універсальність забезпечує можливість використання для деталей будь-якої форми та розміру, а багатошарова структура сприяє кращому захисту навіть для пористих виробів, виготовлених методом SLS. Окрім того, лакофарбові покриття можуть забезпечувати водонепроникність, підвищувати твердість і стійкість до зношування, а також створювати різні варіанти поверхневого оздоблення – від глянцевого блиску до металевого ефекту.

Неорганічні покриття включають матеріали на основі металів і неметалів, таких як нікель, хром, мідь, алюміній, карбіди, бориди, нітриди, оксиди, а також композиції цих компонентів. За своєю структурою вони можуть бути одношаровими або багатошаровими, гомогенними чи композиційними. Багатошарові покриття мають перевагу завдяки можливості уникнення пористості, що забезпечує високі захисні властивості. Така структура дозволяє комбінувати властивості різних матеріалів, надаючи виробам додаткових функціональних можливостей. Наприклад, класичне багатошарове покриття типу "мідь-нікель-хром" є ефективним і широко застосовується для забезпечення захисно-декоративних властивостей.

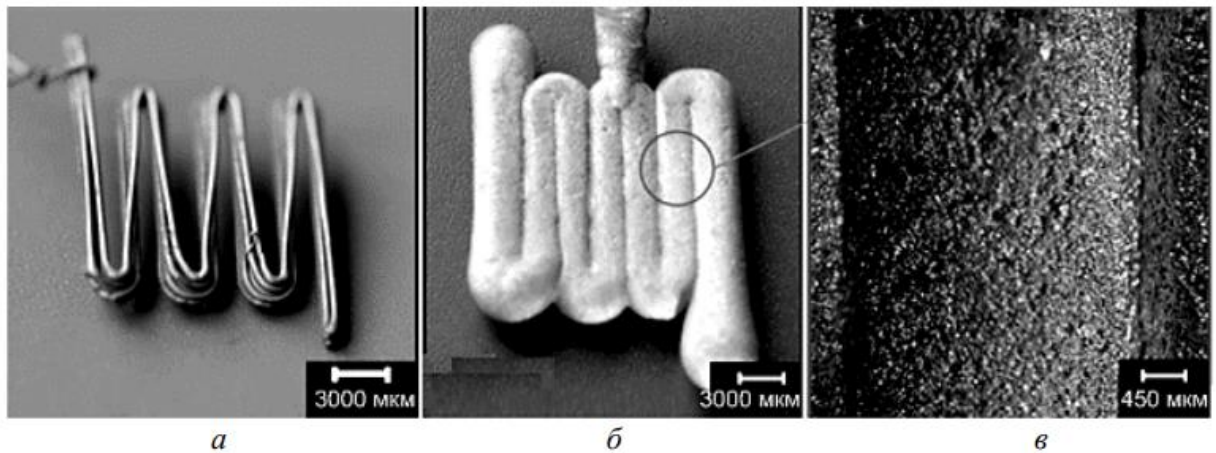
Товщина покриттів залежить від багатьох факторів, зокрема способу їх нанесення, характеристик вихідного матеріалу та вимог до кінцевого продукту, і може варіюватися від часток мікрометра до кількох міліметрів. Методи формування покриттів класифікуються за різними критеріями: фазовий стан матеріалу, метод нанесення, стан технологічного процесу. Наприклад, покриття можуть формуватися з твердих, рідких, газових середовищ або розчинів і навіть за допомогою плазми.

Особливу увагу в адитивному виробництві приділяють хімічним і гальванічним методам нанесення покриттів. Ці методи є не лише технологічно простими, а й дозволяють отримувати покриття з широким спектром властивостей. Хімічні покриття формуються без використання електричного струму, наприклад, шляхом відновлення іонів металів для отримання нікелевих, мідних або срібних шарів. У свою чергу, гальванічні покриття створюються за допомогою електролізу, що дозволяє наносити на вироби шари металів, таких як нікель, хром чи мідь. Такі покриття підвищують міцність, забезпечують електропровідність або створюють захист від зовнішніх впливів.

Особливо актуальними є комбіновані технології, які об'єднують хімічний і гальванічний методи. Наприклад, для SLA - чи FDM-виробів застосовують схему, де хімічна металізація забезпечує створення початкового електропровідного шару, а подальша гальванічна обробка нарощує товщину покриття та покращує його характеристики. Такі технології дозволяють створювати вироби з розвиненою поверхневою структурою, зменшеною вагою, високою міцністю та зниженими витратами на виробництво.

Металізація полімерних деталей, виготовлених адитивними методами, виконується в кілька етапів. Спочатку формується тонкий електропровідний шар із міді товщиною 0,2–0,4 мкм, який забезпечує гарну теплопровідність. Потім гальванічна металізація дозволяє досягти необхідної товщини шару (до 10 мкм) та заданих параметрів поверхні. Металізовані вироби на основі полімерів мають переваги перед традиційними металевими конструкціями, включаючи знижену вагу, простоту у відновленні покриттів та економічну ефективність.

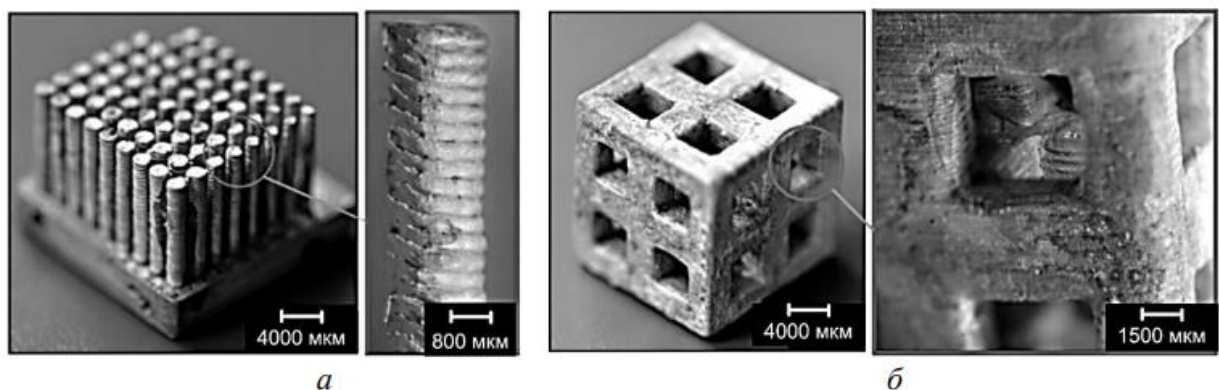
Двоетапний процес осадження покриттів дозволяє досягти рівномірної товщини навіть на деталях складної геометрії, забезпечуючи високу якість поверхні та необхідні функціональні характеристики кінцевих виробів. Такий підхід особливо ефективний у металізації полімерних компонентів, виготовлених адитивними методами (рис. 2.14).



а – після хімічної металізації міддю; б – після гальванічного формування покриття на основі міді; в – морфологія поверхні покриття

Рисунок 2.14 – Металізована двовимірна структура полімерного виробу

Технологія рекомендована для створення складних тривимірних конструкцій з одно- або двонаправленою структурою, як-от охолоджувальні канали для мікроелектронних пристроїв. Вона також актуальна при виробництві елементів із великою площею поверхні, структур із високою тепловіддачею чи каталітичних систем. Завдяки цій технології можна суттєво оптимізувати використання матеріалів та скоротити час виготовлення виробів у порівнянні з традиційними методами (рис. 2.15).



а – односпрямована структура; б – двоспрямована структура

Рисунок 2.15 – Металізовані тривимірні структури полімерних виробів, отриманих адитивним вирощуванням

Формування покриттів як метод постобробки активно використовується для покращення характеристик металевих виробів, виготовлених адитивними технологіями, зокрема методом SLS. Дослідження охоплюють різноманітні методи та матеріали нанесення покриттів, включаючи хімічне осадження нікелю (Ni), гальванічне осадження хрому (Cr), тришарові гальванічні покриття (Cu-Ni-Cr), а також комбіновані процеси, наприклад, хімічне осадження Ni з наступним нанесенням іонно-плазмового шару на основі нітриду титану (TiN).

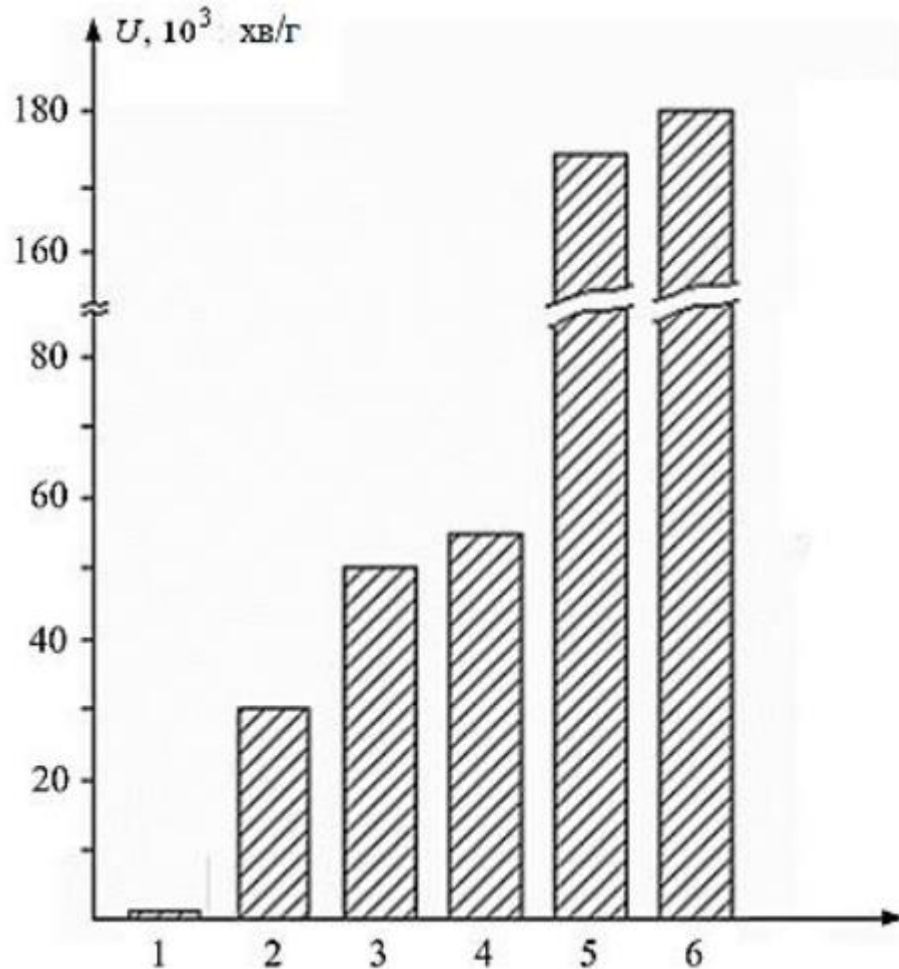
Вибір складу покриттів базується на перевірених практиці використанні захисно-декоративних і функціональних покриттів. У дослідженнях використовувалися композитні вироби із порошків нержавіючої сталі (85,3% Fe, 14,3% Cr, 0,3% Mn, 0,1% Ni) та олов'янистої бронзи (86,6% Cu, 10,7% Sn, 0,6% Pb, 0,5% Zn). Товщина нанесених покриттів становила приблизно 20 мкм для хімічних та гальванічних покриттів, а для іонно-плазмових – близько 3 мкм.

Залежно від складу та методу нанесення покриття сприяють значному покращенню функціональних характеристик виробів. Хімічні й гальванічні покриття підвищують корозійну стійкість, тоді як іонно-плазмові шари на основі TiN забезпечують збільшення твердості та зносостійкості. Зокрема, покриття з проміжним шаром хімічного Ni та тришаровим гальванічним шаром Cu-Ni-Cr разом із зовнішнім шаром TiN демонструють підвищення зносостійкості вихідного SLS-композиту більш ніж у 100 разів.

Ефективність корозійного захисту та зміцнення поверхні є особливо важливою для застосування адитивних виробів як кінцевих, наприклад, у формах та інструментальному оснащенні для лиття пластмас. Робочі поверхні таких виробів повинні відповідати високим вимогам щодо твердості, зносостійкості та антифрикційних властивостей.

Крім того, серед методів постобробки слід виділити ультразвукове розпилення для нанесення полімерних покриттів. Ця технологія дозволяє

зменшити шорсткість поверхонь виробів із полімерних порошків, виготовлених методом SLS, а також забезпечити їм функціональні властивості, такі як гідрофобність (рис. 2.16).



1 – без покриття; 2 – Ni (хімічний метод); 3 – Ni (хімічний метод + термообробка); 4 – Cr (гальванічний метод); 5 – Cu–Ni–Cr + TiN (гальванічний+іонно-плазмовий метод); 6 – Ni + TiN (хімічний + іонно-плазмовий метод)

Рисунок 2.16 – Зносостійкість покриттів на SLS-виробі

Метод ультразвукового розпилення є ефективним способом нанесення покриттів на поверхні адитивних виробів, зокрема із полімерів. У цьому методі рідина перетворюється на аерозоль за рахунок збільшення поверхневої

енергії шляхом дії механічних коливань ультразвукової частоти високої інтенсивності.

Досвід використання ультразвукового напилення багат шарових гідрофобних покриттів із розчину полівініліденфториду (PVDF) на поверхнях полімерних SLS-виробів, таких як поліамід (PA12), демонструє значне покращення якості поверхні. Зокрема, показник шорсткості Ra знижується з 20 мкм до 5 мкм, а також зменшується пористість матеріалу.

Покращені властивості виробів із нанесеними ультразвуковим методом покриттями відкривають широкі можливості їхнього застосування у різних галузях, таких як медицина, хімічна промисловість та радіоелектроніка.

Цей підхід особливо перспективний для створення поверхонь з покращеними функціональними характеристиками, наприклад, гідрофобністю, що розширює сферу практичного використання виробів, виготовлених методом SLS (рис. 2.17).

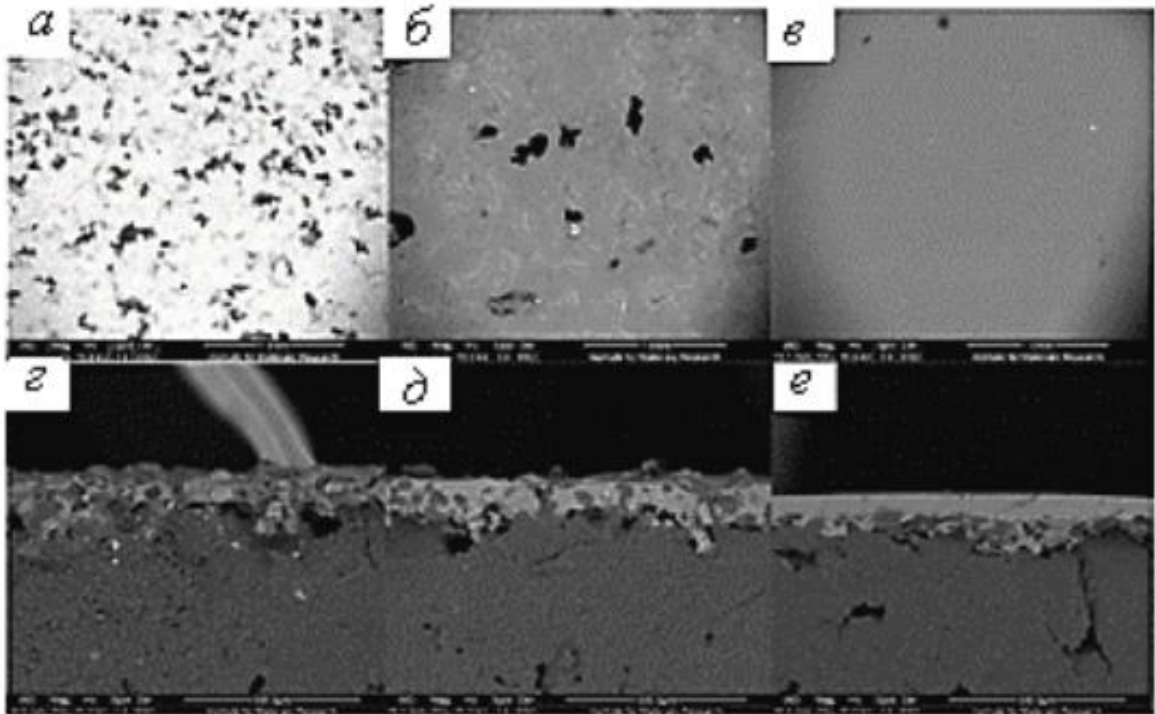


Рисунок 2.17 – Мікрознімки поверхні (а-в) і поперечного перерізу (г-е) SLS-виробу з багат шаровим гідрофобним (10-, 20 і 30-шаровим) покриттям

2.5 Висновки до другого розділу

Розглянуто аспекти математичного моделювання, підходи до процесів виготовлення деталей, особливості створення CAD-моделей для 3D-друку та вплив параметрів друку на якість і точність виробів.

Математичні моделі адитивних процесів дозволяють описати ключові фізичні явища, такі як теплопередача, затвердіння матеріалу та механічні напруження під час друку. Вони є необхідними для передбачення поведінки матеріалів у процесі виготовлення деталей і мінімізації дефектів.

Розглянуті підходи до моделювання процесів виготовлення деталей продемонстрували, що поєднання аналітичних, чисельних та експериментальних методів є оптимальним для розробки ефективних моделей. Особливо важливо враховувати параметри матеріалу, складність геометрії та режими роботи 3D-принтера.

Особливості побудови CAD-моделей для 3D-друку мають критичне значення для успішного виготовлення деталей. Необхідно враховувати точність створення геометрії, параметри шару, підготовку до генерації підтримуючих структур та обробку моделі для забезпечення коректності друку.

Вплив параметрів друку на точність і якість деталей є визначальним фактором для оптимізації процесів. Такі параметри, як температура екструзії, швидкість друку, товщина шару та орієнтація друку, суттєво впливають на фізико-механічні властивості виробів. Оптимізація цих параметрів дозволяє зменшити кількість дефектів, таких як деформації, пористість та тріщини.

Якісне моделювання процесів виготовлення деталей із використанням технологій 3D-друку потребує комплексного підходу, що поєднує математичне моделювання, правильну підготовку CAD-моделей та оптимізацію параметрів друку. Це дозволяє досягти високої точності, якості та надійності кінцевих виробів.

3 РОЗРОБКА ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ 3D-ПРИНТЕРАМИ

3.1 Аналіз вимог до системи

Основною метою системи є забезпечення можливості одночасного керування кількома 3D-принтерами для виконання виробничих завдань. Одним із ключових аспектів є простота впровадження та універсальність рішення, яке має бути сумісним із більшістю сучасних 3D-принтерів.

Для досягнення цієї мети було обрано метод передачі G-кодів на 3D-принтери через віртуальні СОМ-порти із використанням Python-скриптів. Такий підхід дозволяє автоматизувати передачу команд на кілька пристроїв одночасно, використовувати стандартні інтерфейси управління, сумісні з більшістю принтерів та забезпечити простоту налагодження та адаптації системи для різних моделей принтерів

Обраний підхід ґрунтується на інтеграції Python із зовнішнім програмним забезпеченням (у даному випадку Pronterface), яке є поширеним серед користувачів 3D-принтерів. Це дозволяє не лише автоматизувати процес друку, але й залишити можливість ручного управління для складних завдань.

Апаратна частина системи передбачає використання персонального комп'ютера, який має відповідати певним технічним характеристикам. Зокрема, процесор має бути не нижче Intel Core i3 або аналогічний, оперативна пам'ять повинна становити не менше 4 ГБ (рекомендовано 8 ГБ для стабільної роботи з кількома принтерами), а також має бути наявність вільних USB-портів для підключення всіх 3D-принтерів.

Принтери, які використовуються в системі, повинні підтримувати стандартний протокол передачі G-кодів через інтерфейс USB або СОМ-порти. Важливою вимогою є наявність можливості змінювати швидкість передачі даних (baudrate), що дозволяє налаштувати оптимальну взаємодію з комп'ютером, а також забезпечення стабільної роботи за умови одночасного

підключення кількох пристроїв. Додатково до апаратної частини системи входять високоякісні USB-кабелі для забезпечення надійного з'єднання та USB-хаб із власним джерелом живлення, якщо кількість USB-портів на комп'ютері є обмеженою.

Програмна частина включає використання мови програмування Python. На комп'ютер потрібно встановити Python версії 3.9 або вище із обов'язковим увімкненням параметра Add Python to PATH під час інсталяції, щоб забезпечити доступ до Python із командного рядка та коректну роботу пакетного менеджера pip. Для взаємодії з COM-портами необхідно встановити бібліотеку pynserial, використовуючи команду `pip install pynserial`.

Однією зі складових програмної частини є програма Virtual Serial Port Driver Pro, яка дозволяє налаштовувати віртуальні COM-порти. Це необхідно для забезпечення зв'язку між Python-скриптом і програмою Pronterface. Наприклад, можна створити пари віртуальних портів (COM3↔COM5 та COM3↔COM6), кожна з яких відповідатиме окремому принтеру.

Програма Pronterface використовується для моніторингу роботи принтерів, відправлення G-кодів у ручному режимі та перевірки стану підключення. Вона повинна бути налаштована на використання віртуальних COM-портів, наприклад, COM4 та COM6, для отримання команд від Python-скрипта. У програмі також необхідно перевірити відповідність налаштувань baudrate до параметрів, зазначених у Python-скрипті.

Python-скрипт є ключовою частиною системи, яка автоматизує процес передачі команд на кілька принтерів одночасно. Він включає функції ініціалізації підключення до кожного принтера через COM-порт, послідовного відправлення команд із затримкою для забезпечення коректної роботи, а також обробки помилок під час передачі даних. Скрипт також розроблено таким чином, щоб легко додавати нові принтери без значних змін у коді.

Для перевірки роботи системи передбачено використання інструментів моніторингу та тестування. Кожен принтер тестується через Pronterface для

перевірки доступності портів, а Python-скрипт аналізується на предмет помилок у логах роботи.

Середовище роботи системи також має відповідати певним вимогам. Зокрема, важливим є забезпечення стабільності з'єднання, тому рекомендується уникати підключення інших пристроїв до USB-портів під час роботи системи. Відсутність фонових процесів, які можуть викликати затримки у передачі даних, є додатковою умовою для стабільного функціонування системи.

Ці вимоги до апаратної та програмної частини дозволяють створити надійну та ефективну систему управління кількома 3D-принтерами.

3.2 Розробка програмного забезпечення

Розробка програмного забезпечення для системи управління кількома 3D-принтерами передбачала вибір оптимального інструментарію, створення алгоритму взаємодії з віртуальними СОМ-портами та реалізацію механізму передачі G-кодів на кілька принтерів одночасно.

Для реалізації завдань було обрано мову програмування Python. Вибір обґрунтовано її універсальністю, зручністю роботи з зовнішніми пристроями через бібліотеки, такими як `pyserial`, а також широкою спільнотою розробників, що забезпечує доступність документації та підтримки. Бібліотека `pyserial` використовується для встановлення з'єднання з СОМ-портами, передачі даних, а також обробки помилок, які можуть виникати під час взаємодії з пристроями.

Алгоритм взаємодії з віртуальними СОМ-портами передбачає початкове налаштування пар портів за допомогою програми `com0com`. Це дозволяє створити симуляцію фізичних з'єднань між Python-скриптом і програмою `Pronterface`. У Python-скрипті для кожного порту ініціалізується окремий об'єкт підключення з параметрами, такими як назва порту, швидкість передачі даних (`baudrate`) та тайм-аут для очікування відповіді (рис. 3.1).

Реалізація відправки G-кодів передбачає створення функції, яка послідовно передає команди на кожен підключений принтер. Після встановлення з'єднання Python-скрипт надсилає тестове повідомлення для перевірки готовності принтера, а потім відправляє послідовність команд G-кодів, зазначених у сценарії.

Для уникнення перевантаження принтера використовується невелика затримка між командами.

Для одночасної роботи з кількома принтерами було реалізовано механізм багатозадачності. За допомогою бібліотеки `threading` кожен принтер обслуговується окремим потоком, що дозволяє передавати команди паралельно без затримок для інших пристроїв.

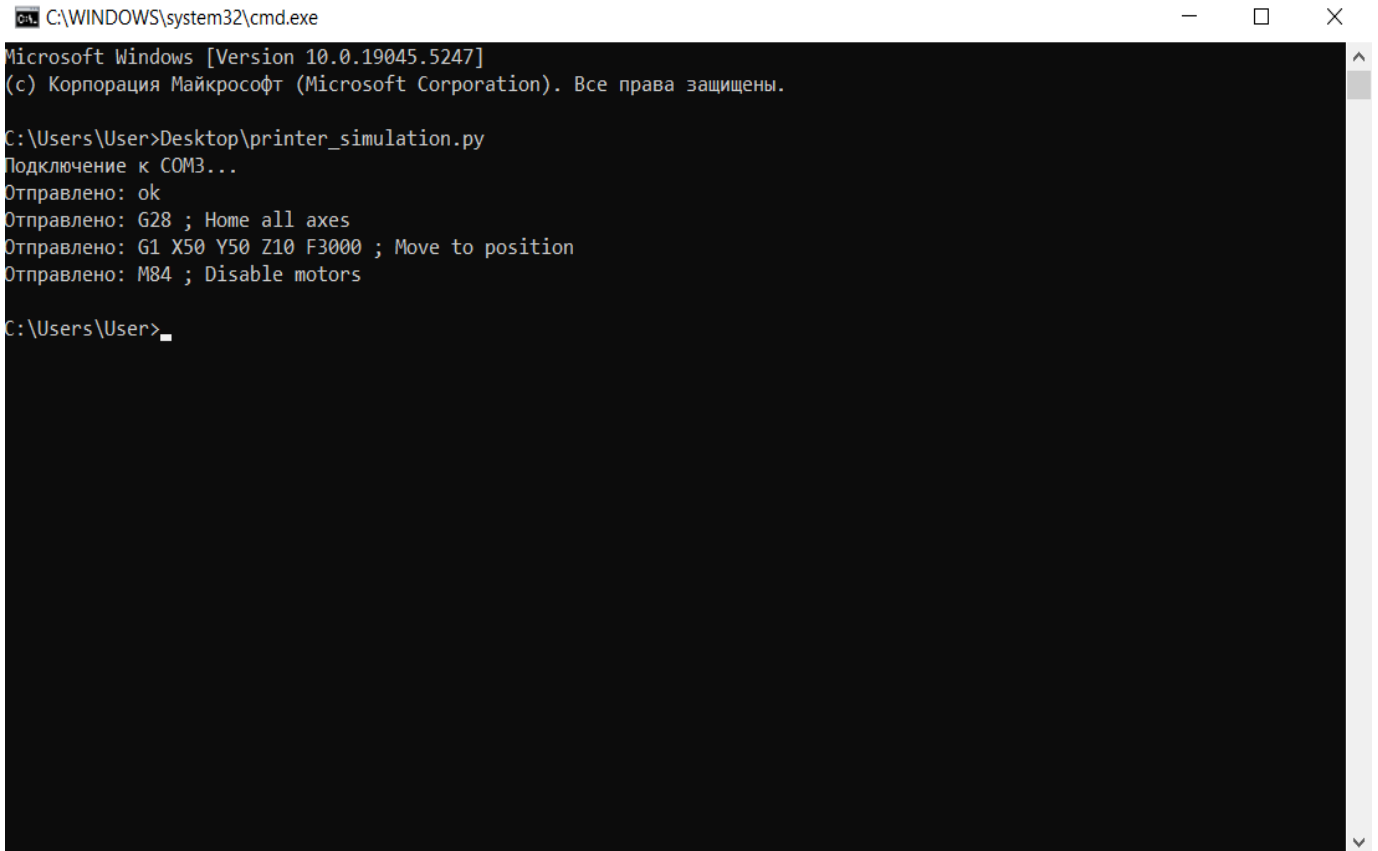
Логи роботи кожного принтера записуються окремо, що полегшує діагностику та контроль процесу.

Після реалізації Python-скрипта була виконана інтеграція з програмою `Pronterface`. У `Pronterface` налаштовуються віртуальні порти для кожного принтера. За допомогою цієї програми також проводиться ручна перевірка підключення, а G-коди, надіслані Python-скриптом, відображаються в інтерфейсі `Pronterface` для контролю виконання.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє автоматизувати процес передачі команд на кілька 3D-принтерів, підвищуючи ефективність роботи системи. Вибрані інструменти та алгоритми забезпечують надійність, гнучкість і зручність експлуатації системи.

3.3 Тестування роботи системи

Тестування роботи системи проводилося з метою перевірки коректності її налаштування та функціонування при управлінні кількома 3D-принтерами через віртуальні COM-порти. Першим етапом стала настройка віртуальних портів за допомогою програми `Virtual Serial Port Driver Pro` (рис. 3.2).



```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [Version 10.0.19045.5247]
(c) Корпорация Майкрософт (Microsoft Corporation). Все права защищены.

C:\Users\User>Desktop\printer_simulation.py
Подключение к COM3...
Отправлено: ok
Отправлено: G28 ; Home all axes
Отправлено: G1 X50 Y50 Z10 F3000 ; Move to position
Отправлено: M84 ; Disable motors

C:\Users\User>
```

Рисунок 3.1 – Підтвердження роботи скрипта, підключення до порту COM3 та відправка налаштувань

У цій програмі було створено пари віртуальних портів, які імітують фізичне підключення між Python-скриптом та програмою Pronterface. Кожен порт налаштовувався з урахуванням специфікацій, необхідних для роботи з принтерами, таких як назви портів і швидкість передачі даних.

Наступним етапом стало підключення програми Pronterface до створених віртуальних портів. У Pronterface виконувалася ручна перевірка підключення, що дозволяло переконатися у готовності програмного забезпечення приймати команди. Python-скрипт, розроблений для системи, надсилав тестові команди, такі як "G28" для початкового позиціонування принтера, і ці команди відображалися у вікні Pronterface, підтверджуючи їхнє коректне виконання.

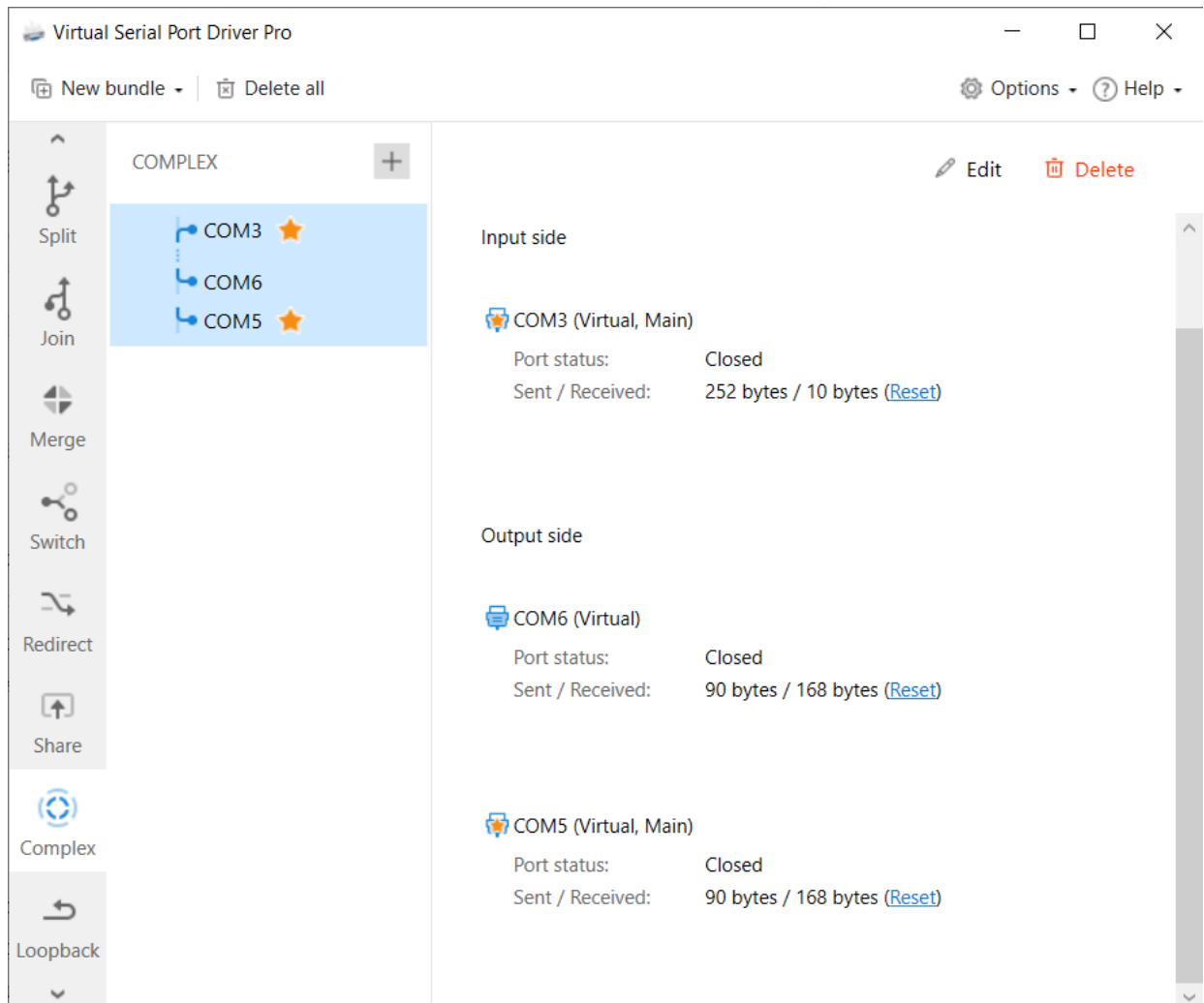


Рисунок 3.2 – Virtual Serial Port Driver Pro

Результати роботи системи підтвердили її функціональність. На етапі тестування виконувалися скрипти, які надсилали послідовності G-кодів на кілька 3D-принтерів одночасно.

У Pronterface для кожного принтера відображалися відповідні команди, а затримки між їхнім виконанням відповідали встановленим параметрам скрипта.

Логи роботи принтерів були збережені у вигляді текстових файлів, що дало змогу проаналізувати стабільність системи (рис. 3.3) (рис. 3.4).

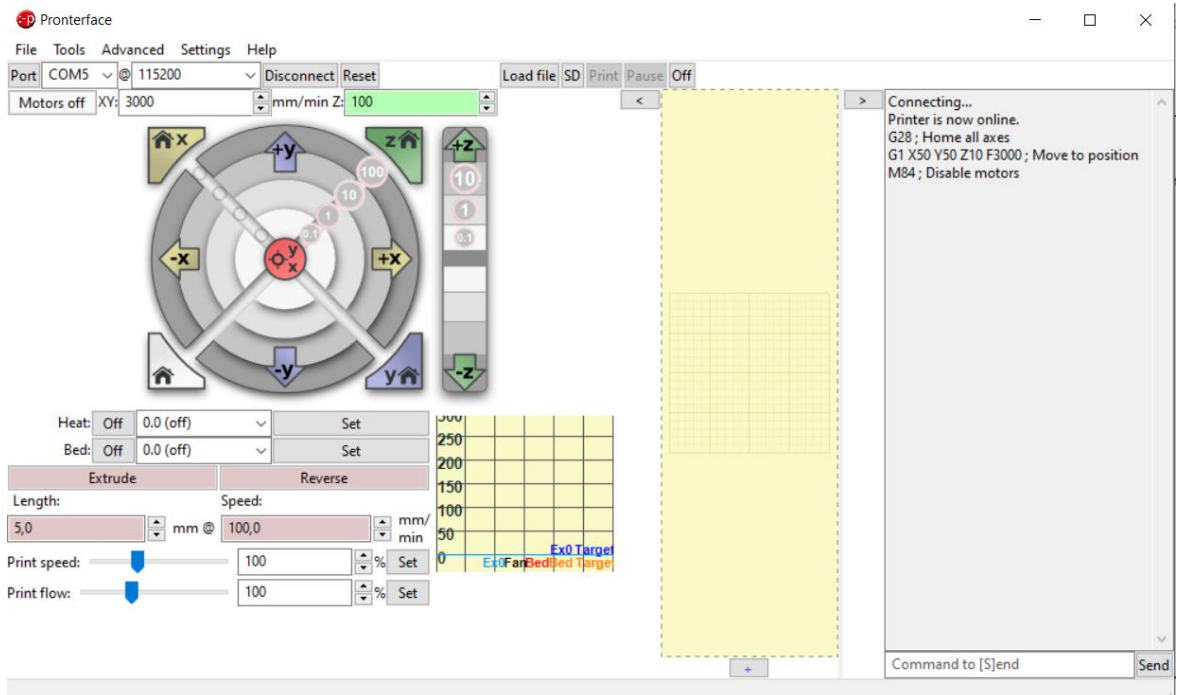


Рисунок 3.3 – Підключення до порту COM5 та отримання налаштувань

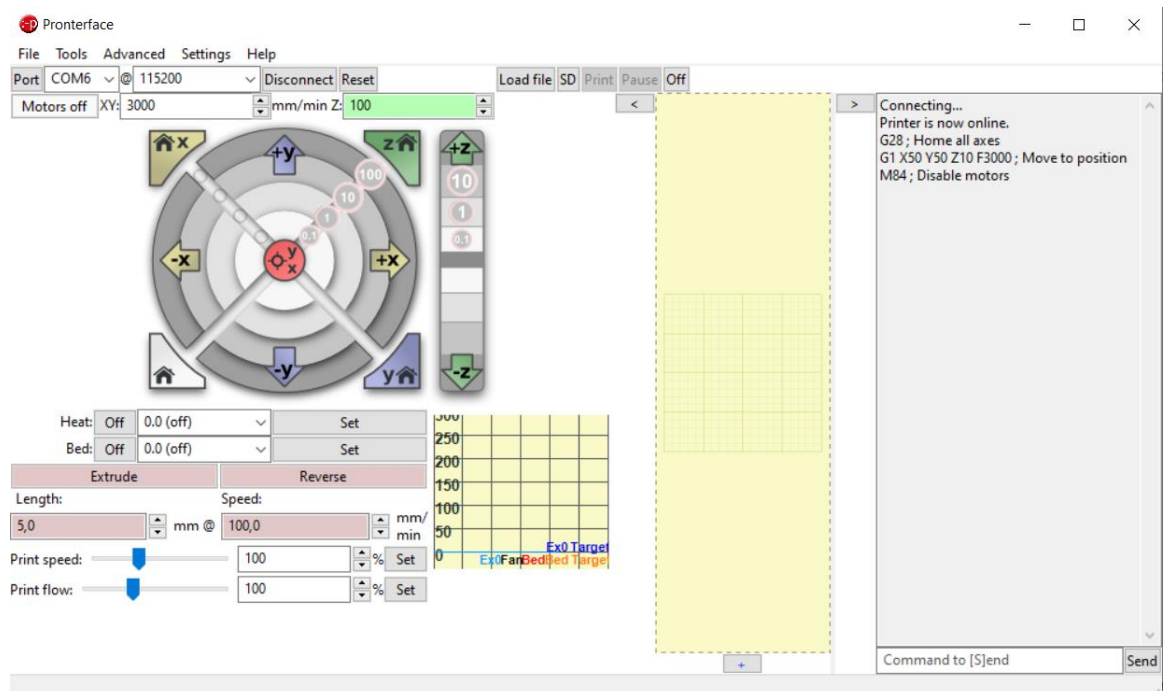


Рисунок 3.4 – Підключення до порту COM6 та отримання налаштувань

Окрім того, було знято скріншоти роботи програми Pronterface, які демонструють успішне підключення до віртуальних COM-портів та виконання команд. Ці знімки ілюструють результативність роботи розробленої системи

та можуть бути використані для документального підтвердження її функціональності.

Проведене тестування показало, що система здатна ефективно взаємодіяти з кількома 3D-принтерами, забезпечуючи стабільну передачу команд і зручність у роботі. Це підтверджує доцільність обраного підходу та правильність реалізації програмного забезпечення.

3.4 Висновки до третього розділу

Головною метою роботи було підвищення ефективності процесу організації роботи кількох 3D-принтерів шляхом розробки автоматизованої системи керування. У процесі дослідження було виконано аналіз сучасного стану технологій управління 3D-принтерами, розглянуто існуючі підходи до інтеграції обладнання, а також обґрунтовано доцільність використання віртуальних COM-портів для забезпечення одночасної роботи декількох пристроїв.

Результатом реалізації роботи стала розробка Python-скрипту, який дозволяє передавати команди G-кодів на кілька 3D-принтерів через створені віртуальні порти. Це рішення забезпечує синхронну роботу принтерів та дозволяє користувачу ефективно керувати обладнанням з мінімальними витратами часу і ресурсів.

Під час тестування системи було успішно підтверджено працездатність програми: 3D-принтери коректно отримували команди через програму Pronterface, імітуючи одночасне виконання друку. Система довела свою ефективність у виконанні поставлених завдань.

Таким чином, робота досягла поставленої мети, адже була розроблена дієва та масштабована система керування, яка може бути застосована як у виробничих процесах, так і в освітньому середовищі для навчання основам автоматизації.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є одним із найважливіших аспектів виробничої діяльності, який забезпечує безпеку працівників, збереження їхнього здоров'я та ефективність виконання завдань. У контексті використання технологій 3D-друку охорона праці набуває особливого значення, оскільки такі процеси пов'язані з використанням специфічного обладнання, матеріалів і технологічних рішень, які можуть становити потенційну загрозу для здоров'я та безпеки працівників.

У процесах виробництва, де застосовуються 3D-принтери, існує низка факторів ризику, таких як токсичність матеріалів, високі температури, рухомі частини обладнання та можливі електричні небезпеки. Тому особлива увага приділяється забезпеченню належних умов праці та дотриманню заходів безпеки (рис. 4.1).

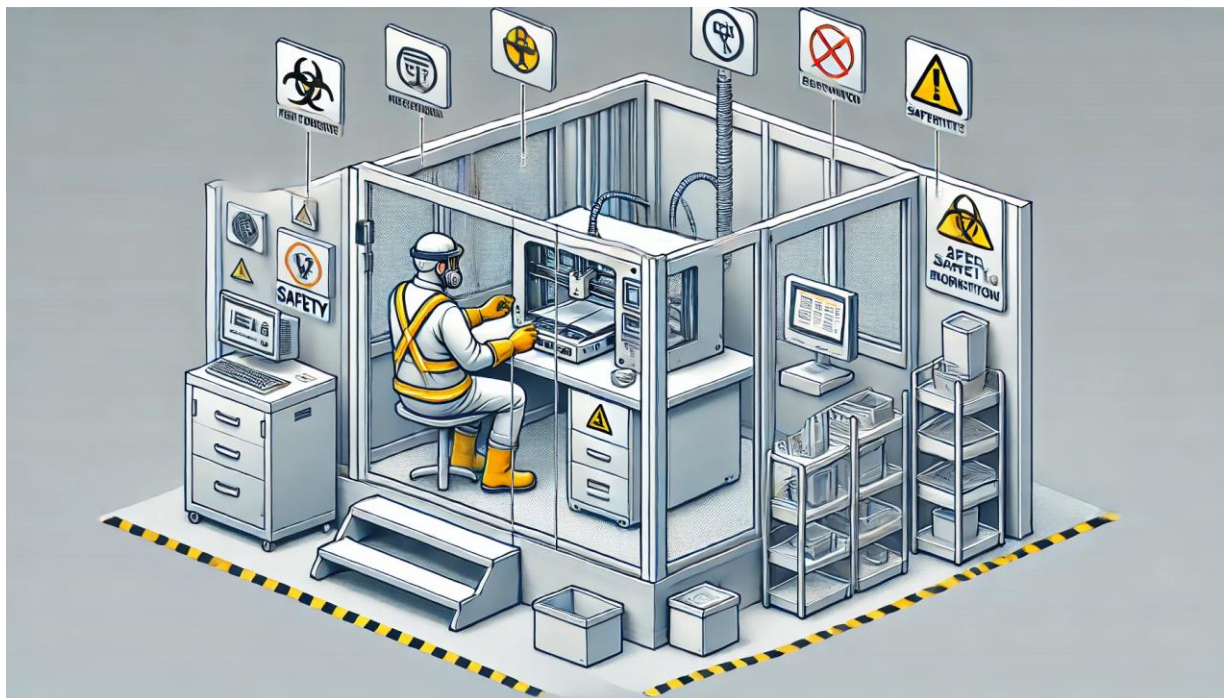


Рисунок 4.1 – Безпечна робоча станція 3D-друку

У першу чергу, важливо звернути увагу на можливість впливу токсичних речовин, які виділяються під час плавлення пластику або інших матеріалів. Утворення дрібнодисперсних частинок чи парів може призводити до подразнення органів дихання, алергічних реакцій або навіть хронічних захворювань. Для запобігання цим загрозам необхідно використовувати ефективні системи вентиляції та очищення повітря. Приміщення, де встановлені 3D-принтери, повинно бути обладнане витяжною системою або фільтрами, які здатні нейтралізувати шкідливі речовини (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Безпечна робоча станція 3D-друку

Важливо враховувати також температурні ризики. Під час роботи 3D-принтерів друкуюча голівка та платформа нагріваються до високих температур, що може спричинити опіки при контакті з ними. З цією метою необхідно дотримуватися правил безпеки під час обслуговування обладнання. Всі роботи, пов'язані з технічним обслуговуванням чи ремонтом, слід виконувати лише після повного охолодження пристрою. Крім того,

працівники мають бути забезпечені засобами індивідуального захисту, такими як термостійкі рукавички.

Не менш важливим є врахування механічних небезпек. Деякі частини 3D-принтера, зокрема екструдер чи ремені приводу, перебувають у русі під час роботи пристрою, що може становити ризик отримання механічних травм. Щоб уникнути таких ситуацій, доступ до обладнання під час роботи повинен бути обмеженим. Робочі місця слід облаштувати таким чином, щоб виключити можливість випадкового контакту з принтером під час його роботи[34].

Електробезпека також є важливим аспектом, особливо в умовах використання кількох пристроїв одночасно. Усі 3D-принтери мають бути правильно заземлені, а кабельні з'єднання відповідати вимогам нормативних документів. Регулярна перевірка стану електричних систем і використання сертифікованих компонентів дозволяють знизити ризик ураження електричним струмом.

Окрім забезпечення технічних заходів, важливо приділяти увагу навчанню персоналу. Всі працівники повинні бути ознайомлені з правилами техніки безпеки та вміти діяти в екстрених ситуаціях. Регулярні інструктажі, тренінги та практичні заняття сприяють підвищенню рівня обізнаності працівників щодо можливих ризиків та способів їх уникнення.

Організація робочого простору також має велике значення. Приміщення повинно бути обладнане достатньою кількістю місця для розміщення обладнання, а також забезпечувати комфортні умови для працівників. Важливо враховувати ергономічні вимоги, щоб уникнути перевтоми та зниження продуктивності. Крім того, шум і вібрації, які можуть виникати під час роботи принтерів, мають бути мінімізовані шляхом використання звукоізоляційних матеріалів або спеціальних підставок.

Законодавчі норми є основою для забезпечення безпеки праці. Усі заходи з охорони праці повинні відповідати вимогам нормативно-правових актів, таких як Закон України «Про охорону праці» та Державні санітарні

норми. Роботодавець зобов'язаний забезпечити виконання вимог, а також створити систему моніторингу на виробничих ділянках (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 – Приклад недотримання правил безпеки

Загалом, дотримання принципів охорони праці під час роботи з 3D-принтерами є не лише вимогою законодавства, але й запорукою безпечного та ефективного функціонування виробничого процесу. Безпека працівників напряду впливає на продуктивність підприємства, зменшення простоїв через травматизм і відсутність персоналу. Забезпечення належних умов праці, включаючи дотримання санітарно-гігієнічних норм, регулярне проведення інструктажів з техніки безпеки, а також постійний моніторинг стану обладнання, є критично важливими аспектами[35].

Особливу увагу варто приділити навчанню персоналу. Працівники мають не лише розуміти технічні особливості роботи обладнання, але й знати, як діяти у випадку аварійних ситуацій, таких як перегрівання обладнання, витік токсичних речовин чи порушення роботи вентиляційної системи. Важливим є також використання засобів індивідуального захисту, наприклад,

масок із фільтрами для органів дихання, захисних окулярів і термостійких рукавичок.

Крім того, інтеграція сучасних технологій моніторингу та автоматизації дозволяє покращити контроль за станом робочого середовища та обладнання. Наприклад, датчики температури, системи автоматичного вимкнення при перегріванні або перевантаженні, а також системи моніторингу якості повітря здатні своєчасно виявити потенційні проблеми й запобігти аварійним ситуаціям.

Забезпечення безпечних умов праці не лише сприяє захисту працівників, але й позитивно впливає на репутацію підприємства, підвищуючи його привабливість для інвесторів, клієнтів та потенційних співробітників. У сучасному світі, де питання екологічності та безпеки виходять на перший план, інвестиції у відповідні заходи є важливим кроком до сталого розвитку та довгострокового успіху підприємства.

ВИСНОВКИ

Дослідження сучасних адитивних технологій, моделювання процесів виготовлення деталей і розробку системи управління для 3D-принтерів. У ході виконання роботи досягнуто поставлених цілей і отримано важливі результати, які підтверджують актуальність і практичну цінність теми.

Проведено детальний огляд сучасного стану адитивних технологій. Було розглянуто історію розвитку адитивного виробництва, його переваги та недоліки, а також основні матеріали та сфери застосування 3D-друку в промисловості. Окрему увагу приділено системам автоматизації та комп'ютерно-інтегрованим технологіям, які є базовими для ефективного впровадження адитивного виробництва у виробничі процеси. Цей розділ показав, що адитивні технології займають важливе місце у сучасному промисловому виробництві завдяки можливості створення складних деталей з високою точністю.

Виконано моделювання процесів виготовлення деталей за допомогою адитивних технологій. Розроблено математичні моделі, які дозволяють описати основні етапи процесу 3D-друку. Досліджено підходи до побудови САД-моделей для 3D-друку, які є основою для створення точних деталей. Проведено аналіз впливу параметрів друку, таких як швидкість, температура та товщина шару, на якість і точність виготовлених деталей. Отримані результати дозволяють визначити оптимальні режими друку для конкретних завдань, що значно підвищує ефективність виробництва.

Розробка та тестування системи управління для 3D-принтерів. У процесі роботи було проаналізовано вимоги до системи, розроблено програмне забезпечення, яке забезпечує інтеграцію та синхронізацію роботи кількох пристроїв, а також протестовано його функціональність.

Запропоноване рішення має низку переваг. Воно дозволяє оптимізувати процес управління кількома принтерами, зменшити ймовірність помилок у налаштуванні обладнання та забезпечити масштабованість системи для

подальшого використання в промислових чи освітніх цілях. Простота реалізації та використання сучасних інформаційних технологій робить систему доступною для широкого кола користувачів.

Подальше вдосконалення розробленої системи може бути спрямоване на впровадження додаткових функцій, таких як моніторинг стану 3D-принтерів у реальному часі, інтеграція з хмарними сервісами для зберігання G-кодів або створення графічного інтерфейсу для зручнішого управління. Це дозволить підвищити функціональність системи та адаптувати її до потреб різних користувачів.

Загалом вирішено комплекс завдань, пов'язаних із впровадженням адитивних технологій у виробничі процеси. Проведені дослідження та отримані результати мають значний потенціал для подальшого розвитку, зокрема в напрямку автоматизації виробничих процесів, оптимізації параметрів друку та вдосконалення програмного забезпечення. Запропоновані рішення можуть бути успішно застосовані на підприємствах, що використовують 3D-друк, для підвищення ефективності та конкурентоспроможності їхньої продукції.

Також, отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 "Промисловість, інновації та інфраструктура", а саме п. 9.4: "Модернізувати інфраструктуру та переобладнати промислові підприємства з метою їх більш стійкого розвитку, підвищення ефективності використання ресурсів та збільшення обсягу використання екологічно чистих і екологічно безпечних технологій та виробничих процесів".

Розробка системи моделювання та управління процесами 3D-друку сприяє підвищенню ефективності виробництва та зменшенню екологічного навантаження шляхом раціонального використання матеріалів та енергії. Це відповідає глобальним завданням зі створення стійких технологій та інновацій, що сприяють розвитку сучасної інфраструктури та промисловості.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано тези доповіді у матеріалах Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених [1].

Отримані результати роботи відносяться до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», пункт 9.4 «Сприяти прискореному розвитку високо- та середньовисокотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямками: розвиток інноваційної екосистеми; розвиток інформаційно-телекомунікаційних технологій (ІКТ); застосування ІКТ в АПК, енергетиці, транспорті та промисловості; високотехнологічне машинобудування; створення нових матеріалів; розвиток фармацевтичної та біоінженерної галузей» [33].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ключко О. В., Безкоровайний В. В. Дослідження процесів виготовлення деталей з використанням адитивних технологій // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених. Харків, ХНАДУ, 2024. С. 169–173.
2. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 22.06.2015. К. Держстандарт України, 2016. 30 с.
3. Стандарт вищої освіти магістра за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» затверджено і введено в дію Наказом Міністерства освіти і науки України від 10.08.2020 р. № 1022.
4. Положення про організацію освітнього процесу у ХНУРЕ [електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 27 листопада 2020 р. № 400. URL: <https://nure.ua/wp-content/upload> (дата звернення: 15.12.2024).
5. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. Невлюдов І. Ш., Артюх Р. В., Безкоровайний В. В., Демська Н. П., Євсєєв В. В., Филипенко О. І., Цимбал О. М. Харків: ХНУРЕ, 2021. 55 с.
6. Gibson I., Rosen D. W., Stucker B. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, 2015. 498 p.
7. Манжілевський О. Д., Іскович-Лотоцький Р. Д. Сучасні адитивні технології 3D-друку. Особливості практичного застосування: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2021. 105 с.

8. Kumbhar N. N., Mulay A. V. Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review // *J. Inst. Eng. India Ser. C*. 2018. Vol. 99. No. 4. P. 481–487.
9. Srivatsan T. S., Sudarshan T. S. *Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2015. 460 p.
10. Jiang J., Xu X., Stringer J. Support Structures for Additive Manufacturing: A Review // *Manuf. Mater. Process*. 2018. Vol. 2. No. 64.
11. Ni F., Wang G., Zhao H. Fabrication of water-soluble poly (vinyl alcohol)-based composites with improved thermal behavior for potential three-dimensional printing application // *J. Appl. Polym. Sci*. 2017. Vol. 134. No. 24.
12. Hussein A., Hao L., Yan C., Everson R., Young P. Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing // *Process. Technol*. 2013. Vol. 213. P. 1019–1026.
13. Постпроцеси адитивних технологій навчальний посібник // URL: https://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wpcontent/uploads/sites/143/2024/02/12_Pupan_Navch_posibnik_Postprotsesi-aditivnih-tehnologij.pdf (дата звернення: 03.10.2024).
14. Vaidya R., Anand S. Optimum Support Structure Generation for Additive Manufacturing Using Unit Cell Structures and Support Removal Constraint // *Procedia Manuf*. 2016. Vol. 5. P. 1043–1059.
15. Vanek J., Galicia J. A. G., Benes B. Efficient Support Structure Generation for Digital Fabrication // *Comput. Graph. Forum*. 2014. Vol. 33. P. 117–125.
16. Kumar S., Kruth J. P. Effect of bronze infiltration into laser sintered metallic parts // *Materials & Design*. 2007. Vol. 28. P. 400–407.
17. German R. M. *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing*. Princeton, USA: Metal Powder Industries Federation, 2005. 540 p.
18. Duck J., Niebling F., Neesse T., Otto A. Infiltration as post-processing of laser sintered metal parts // *Powder Technology*. 2004. No. 145 (1). P. 62–68.

19. Frazier W. E. Metal additive manufacturing: A review // *J. Mater. Eng. Perform.* 2014. Vol. 23. No. 6. P. 1917–1928.
20. Beskorovainyi V. V., Petryshyn L. B., Shevchenko O. Yu. Specific subset effective option in technology design decisions // *Applied Aspects of Information Technology*. 2020. Vol. 3. No.1. P. 443–455. URL: <https://aait.op.edu.ua/?fetch=articles&with=info&id=40> (дата звернення: 16.12.2020).
21. Beskorovainyi V. Combined method of ranking options in project decision support systems // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2020. No 4 (14). P. 13–20. URL: <http://journals.uran.ua/itssi/article/view/ITSSI.2020.14.013> (дата звернення: 16.12.2024).
22. Beskorovainyi V., Kolesnyk L., Chinwi Mgbere Dr. Mathematical models for determining the Pareto front for building technological processes options under the conditions of interval presentation of local criteria // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2023. No. 2 (24). P. 16–26. URL: <https://www.itssi-journal.com/index.php/itssi/article/view/386> (дата звернення: 16.12.2024).
23. Bezkorovainyi V., Kolesnyk L., Gopejenko V., Kosenko V. The method of ranking effective project solutions in conditions of incomplete certainty // *Advanced Information Systems*, 2024. v. 8, no 2. P 27–38. URL: <http://ais.khpi.edu.ua/article/view/305462/297067> (дата звернення: 16.12.2024)
24. Morokoshi S., Masao H., Yagura H., Yamomoto Y., Fujikawa T. Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Materials Prepared by Additive Manufacturing Technology and HIP Process // *Proc. 11th Int. Conf. on Hot Isostatic Pressing*. Stockholm, 2014. P. 398–404.
25. Frazier W. E. Metal additive manufacturing: A review // *J. Mater. Eng. Perform.* 2014. Vol. 23. No. 6. P. 1917–1928.

26. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A. E., Neugebauer R., Mcintosh D. Hybrid processes in manufacturing // *Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 63. No. 2. P. 561–583.
27. Sealy M. P., Madireddy G., Williams R. E., Rao P., Toursangsaraki M. Hybrid processes in additive manufacturing // *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2018. Vol. 140. P. 060801:1–13.
28. Bremerstein T., Potthoff A., Michaelis A., Schmiedel C. Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results // *Wear*. 2015. Vol. 342–343. P. 44–51.
29. Williams R. E., Melton V. L. Abrasive flow finishing of stereolithography prototypes // *Rapid Prototyping Journal*. 1998. Vol. 4. No. 2. P. 56–67.
30. Kumar R. A review on Chemical Processes for Plastics substrates used in engineering industries // *International Journal of Chem. Tech. Research*. 2016. Vol. 9. No. 7. P. 354–365.
31. Slegers S., Linzas M., Haen J. D. Surface Roughness Reduction of Additive Manufactured Products by Applying a Functional Coating Using Ultrasonic Spray Coating // *Coatings*. 2017. Vol. 7. No. 208.
32. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. No. 81(1–4). P. 465–481.
33. Ціль 9. Промисловість, інновації та інфраструктура // *Diia business*, 2024. URL: https://business.diia.gov.ua/entrepreneur-handbook/item/cil_9_promislovist_innovaciyi_ta_infrastruktura (дата звернення: 15.12.2024).
34. Яскілка В. Я., Олійник М. З. Конспект лекцій з курсу «Охорона праці» / Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. 56 с.
35. Бадищук В. І., Чихіра І. В. Охорона праці. Конспект лекцій / Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя. Тернопіль. 2016. 103 с.