

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

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення системи автоматизації для контролю точності
виготовлення деталей на 3D принтері
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року, групи КІТПВм-23-2
Гавриков Є. Ю.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 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'ютерно-
інтегровані технологічні процеси і
виробництва
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Аллахверанов Р. Ю.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2025р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)

«___» _____ 2024р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ *Гаврикову Євгенію Юрійовичу*
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Розроблення системи автоматизації для контролю точності виготовлення деталей на 3D принтері*

затверджена наказом по університету від "22" листопада 2024р. № 1231 Ст.

2. Термін подання студентом роботи "27" січня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи 3.1 Адитивні технології 3D прототипування;
3.2 Дефекти виробів FFF\FDM друку;

3.3 Алгоритми для обробки зображення;

3.4 Охорона праці;

3.5 Оформлення текстової документації – ДСТУ 3008-2015.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Вступ;

4.2 Аналіз методів виготовлення деталей за технологіями 3D друку;

4.3 Методика оцінки точності виготовлення деталей на 3D принтері;

4.4 Дослідження методів порівняння зображень для використання автоматизації контролю точності виготовлення деталей;

4.5 Охорона праці;

4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 16 с. 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	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз методів виготовлення деталей за технологіями 3D друку</i>	25.11 – 30.11.24	<i>виконано</i>
2	<i>Методика оцінки точності виготовлення деталей на 3D принтері</i>	01.12 – 12.12.24	<i>виконано</i>
3	<i>Дослідження методів порівняння зображень для використання автоматизації контролю точності виготовлення деталей</i>	13.12 – 31.12.24	<i>виконано</i>
4	<i>Охорона праці</i>	01.01 – 06.01.25	<i>виконано</i>
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	07.01 – 10.01.25	<i>виконано</i>
6	<i>Подання роботи на перевірку Інтернет-системою StrikePlagiarism</i>	11.01 – 13.01.25	<i>виконано</i>
7	<i>Подання роботи на рецензію</i>	14.01 – 17.01.25	<i>виконано</i>
8	<i>Подання роботи на підпис зав. кафедри</i>	18.01 – 21.01.25	<i>виконано</i>
9	<i>Подання кваліфікаційної роботи в ЕК</i>	22.01.25	<i>виконано</i>

Дата видачі завдання 25.10.2024 р.

Здобувач _____
(підпис)

Гавриков Є. Ю.

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Аллахверанов Р. Ю.
(посада, прізвище, ініціали)

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

«25» січня 2025р. _____ Гавриков Є. Ю.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 68 с., 3 табл., 23 рис., 6 дод., 20 джерел.

3D ПРИНТЕР, FDM, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ТОЧНІСТЬ, КОНТРОЛЬ, ДЕТАЛЬ, 3D ДРУК, МАТЕРІАЛ, МЕТОД, АЛГОРИТМ, ЗОБРАЖЕННЯ, ВИМІРЮВАННЯ, ПОРІВНЯННЯ.

Мета роботи – удосконалення автоматизованої системи для контролю точності виготовлення деталей на FDM 3D принтері.

Об'єкт дослідження – процес виготовлення деталей на FDM 3D принтері.

Предмет дослідження – технологія обробки зображень для виявлення дефектів друківаних структур виготовлених за технологією FFF/FDM.

Під час написання роботи було розглянуто аналіз проблемної області, визначено вимоги до систем технічного зору, розроблено алгоритми оброблення зображень, що містять фільтрацію, сегментацію та класифікацію, застосування методів машинного навчання для розпізнавання дефектів на поверхні друківаних виробів.

Розроблено методи оброблення зображень, а також виявлення відмінностей між ними, що пов'язано з системами автоматизованого візуального контролю якості. Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

ABSTRACT

Explanatory note: 68 pp., 3 tab., 23 fig., 6 appendices, 20 sources.

3D PRINTER, FDM, AUTOMATION, ACCURACY, CONTROL, DETAIL, 3D PRINTING, MATERIAL, METHOD, ALGORITHM, IMAGE, MEASUREMENT, COMPARISON.

The purpose – to improve the automated system for controlling the accuracy of manufacturing parts on an FDM 3D printer.

The object of research is the process of manufacturing parts on an FDM 3D printer.

The subject of research is image processing technology for detecting defects in printed structures made using FFF/FDM technology.

In the course of writing the paper, we considered the analysis of the problem area, the definition of requirements for vision systems, the development of image processing algorithms, including filtering, segmentation and classification, the use of machine learning methods for recognizing defects on the surface of printed products.

Methods of image processing and detection of differences between images related to automated visual quality control systems have been developed. The results of the work can be attributed to the Sustainable Development Goal 9 “Industry, Innovation and Infrastructure”, in particular, to the paragraph 9.4 “Development of high-tech engineering”.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	8
Вступ	9
1 Аналіз методів виготовлення деталей за технологіями 3D друку	11
1.1 Огляд наявних технологій 3D друку	11
1.2 Адитивні технології в машинобудуванні	21
1.3 Принцип побудови виробу за технологією FDM	24
1.4 Основні принципи, етапи, переваги та недоліки FDM 3D друк	26
1.5 Висновки по розділу	28
2 Методика оцінки точності виготовлення деталей на 3D принтері	30
2.1 Кінематики 3D принтерів за технологією FDM	30
2.2 Дефекти FDM 3D друку	32
2.3 Вплив матеріалу друку на точність виготовлення деталей	33
2.4 Вплив корпусу принтера на точність друку	35
2.5 Методи підвищення точності 3D друку	39
2.6 Особливості систем моніторингу 3D друку	40
2.7 Висновки по розділу	43
3 Дослідження методів порівняння зображень для використання автоматизації контролю точності виготовлення деталей	44
3.1 Піксельне порівняння зображень.....	44
3.2 Метрика для вимірювання схожості SSIM	46
3.3 Виділення контурів.....	48
3.4 Порівняння гістограм.....	50
3.5 Витяг і порівняння особливостей.....	52
3.6 Оцінка методів пошуку різниці між зображеннями	55
3.7 Висновки по розділу	57
4 Охорона праці	58
4.1 Аналіз умов праці на робочому місці	58

4.2 Промислова безпека на робочому місці	58
4.3 Виробнича санітарія у приміщенні.....	59
4.4 Пожежна безпека у приміщенні	61
Висновки	63
Перелік джерел посилання	66
Додаток А Код для піксельне порівняння зображень	69
Додаток Б Код для підключення бібліотеки scikit-image	70
Додаток В Код для підключення операторів Собеля та Канні	71
Додаток Г Код для порівняння гістограм	72
Додаток Д Код для підключення бібліотеки ORB	73
Додаток Е Демонстраційний матеріал	74

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- КПО – коефіцієнт природної освітленості;
ПК – персональний комп'ютер;
САПР – система автоматизованого проектування;
СТЗ – система технічного зору;
BRIEF – Binary Robust Independent Elementary Features;
DMF – Direct Metal Fabrication;
FAST – Features from Accelerated Segment Test;
FDM – Fused Deposition Modeling;
ORB – Oriented FAST and Rotated BRIEF;
QMS – Quality Management Systems
SIFT – Scale-Invariant Feature Transform;
SLA – Stereolithography Apparatuses;
SLS – Selective Laser Sintering;
SSIM – Structural Similarity Index;
SURF – Speeded-Up Robust Features;
UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.

ВСТУП

Адитивні технології (технології пошарового синтезу) – це передовий напрямок цифрового виробництва, друк предметів, деталей, виробів на 3D принтері. Принтер зчитує файл з комп'ютерної моделі майбутнього виробу і створює її, послідовно наносячи шари рідкого, порошкоподібного, паперового чи іншого матеріалу. Ця технологія відкриває нові можливості для виробництва. Вона застосовується для швидкого прототипування і швидкого виробництва. Швидке прототипування полегшує повторне тестування з послідовною, покроковою модернізацією об'єкта. Швидке виробництво слугує як недорога альтернатива стандартним методам під час створення дрібносерійних партій.

Існує кілька видів адитивних технологій, кожен з яких використовується для вирішення різних виробничих завдань. Методи друку тонкими шарами, які в кілька разів менші за людську волосину, застосовуються для прототипів ювелірних прикрас і стоматологічних протезів. Виготовлення металевих деталей ракетних двигунів і літаків відбувається за допомогою технологій для створення особливо міцних об'єктів. Поступово 3D друк впроваджується в будівництво. Переваги технологій пошарового синтезу – оперативність, економія сировини на виробництві, мала кількість відходів.

Тому тема досліджень є актуальною.

Мета роботи – удосконалення автоматизованої системи для контролю точності виготовлення деталей на FDM 3D принтері.

Об'єкт дослідження – процес виготовлення деталей на FDM 3D принтері.

Предмет дослідження – технологія обробки зображень для виявлення дефектів друкованих структур виготовлених за технологією FFF/FDM.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– проаналізувати наявні методики оцінки точності та якості виготовлення

деталей на 3D принтері;

- провести огляд кінематики FDM 3D принтера;

- визначити квалітет точності деталей одержаних на FDM 3D принтері виготовлених деталей;

- розглянути чинники які впливають на появу дефектів та відхилень підчас 3D друку;

- розглянути системи візуального контролю якості виробу;

- розглянути методи обробки технічних зображень;

- розробити заходи та технічні засоби щодо забезпечення безпеки праці працюючого персоналу лабораторії.

Робота виконується згідно з [1-4], як складова наукових досліджень, які здійснюються на кафедрі КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки, результати дослідження опубліковані у [5], отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЗА ТЕХНОЛОГІЯМИ 3D ДРУКУ

1.1 Огляд наявних технологій 3D друку

Наразі у світі налічується понад 100 офіційно зареєстрованих методів тривимірного друку, як полімерами, так і металами. Така велика кількість методів пов'язана із захистом інтелектуальної власності, де кожна компанія, що займається виробництвом 3D принтерів, намагається зареєструвати свій власний метод друку. Найчастіше, методи відрізняються лише назвою, а не технологією. Тому, методів, що відрізняються технологією всього не більше 15. Далі розглянемо чотири найпоширеніші, найперспективніші та найдоступніші на сьогодні методи: FDM, SLA, SLM, DMLS [6, 7].

1.1.1 Метод пошарового наплавлення FDM

FDM (Fused Deposition Modeling) – метод пошарового наплавлення, популярна технологія адитивного виробництва. Застосовується для створення тривимірних моделей, макетів, виробів, до яких не пред'являють особливих вимог до якості поверхні і точності виготовлення [6, 7].

Технологія FDM передбачає створення тривимірних об'єктів завдяки нанесенню послідовних шарів матеріалу, що повторюють контури цифрової моделі. Матеріалом для друку виступають термопластики, що поставляються у вигляді катушок ниток різних кольорів.

Виробничий цикл починається з обробки тривимірної цифрової моделі. Модель у форматі STL ділиться на шари і орієнтується найбільш підходящим чином для друку. За необхідності створюються підтримувальні структури, необхідні для друку нависаючих елементів. Деякі пристрої дають змогу використовувати різні матеріали під час одного виробничого циклу. Можливий друк моделі з одного матеріалу з друком опор з іншого, легкорозчинного

матеріалу, що дає змогу з легкістю видаляти підтримувальні структури після завершення процесу друку. Альтернативно, можливий друк різними кольорами одного і того ж виду пластику при створенні єдиної моделі.

Деталь формується пошарово. Розплавлений пластик укладається за контурами, утвореними цифровою моделлю. Після укладання пластик миттєво остигає і твердне. По завершенню одного шару, екструдер переміщується вертикально вгору на величину товщини нитки розплавленого пластику. Формується другий шар. На рисунку 1.1 схематично показано формування шарів під час 3D-друку методом FDM.

Пластикова нитка подається з котушки в екструдер. Екструдер (друкована головка) – це пристрій, оснащений механічним приводом для подачі нитки, нагрівальним елементом для плавлення матеріалу і соплом, через яке здійснюється безпосередньо екструзія. Нагрівальний елемент передає тепло на сопло, яке своєю чергою плавить пластикову нитку і подає розплавлений матеріал на шар, що формується. Температура сопла може регулюватися від 150 °С до 310 °С, для використання різних матеріалів. Зазвичай верхня частина сопла навпаки охолоджується за допомогою конвекційного кожуха і вентилятора для запобігання передчасному розплавленню пластикової нитки з подальшим засміченням друкарської голівки, що, своєю чергою, призведе до втрати плавності подачі матеріалу, а так само до втрати якості друку.

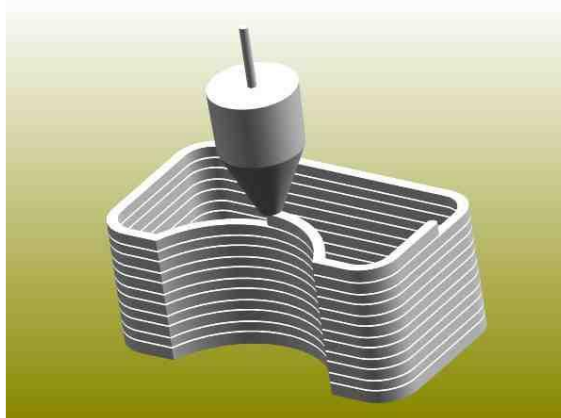


Рисунок 1.1 – Схема формування шарів деталі

Екструдер переміщується в горизонтальній і вертикальній площинах під контролем алгоритмів, аналогічних тим, що використовуються у верстатах із числовим програмним керуванням. Сопло переміщається за траєкторією, заданою системою автоматизованого проектування. Модель будується шар за шаром, знизу вгору. Як правило, екструдер приводиться в рух покроковими моторами або сервоприводами. Найпопулярнішою системою координат, яку застосовують у FDM, є Декартова система, побудована на прямокутному тривимірному просторі з осями x , y і z [8].

Технологія FDM вирізняється високою гнучкістю, але має певні обмеження. Хоча створення нависаючих структур можливе за невеликих кутів нахилу, у випадку з великими кутами необхідне використання штучних опор, які зазвичай створюють під час процесу друку та відокремлюють від моделі після завершення процесу.

Як витратні матеріали доступні всілякі термопластики і композити, включно з ABS, PLA, полікарбонати, поліаміди, полістирол, лігнін і багато інших. Як правило, різні матеріали надають вибір балансу між певними характеристиками міцності та температурними характеристиками [8].

Моделювання методом пошарового наплавлення (FDM) застосовується для швидкого прототипування і швидкого виробництва. Швидке прототипування полегшує повторне випробування з послідовною, покроковою модернізацією предмета. Швидке виробництво слугує як недорога альтернатива стандартним способам при створенні дрібносерійних партій.

FDM є одним з найменш дорогих способів друку, що забезпечує зростаючу популярність побутових принтерів, заснованих на цій технології. У побуті 3D принтери, що працюють за технологією FDM, можуть застосовуватися для створення найрізноманітніших об'єктів цільового призначення, а також іграшок, прикрас і сувенірів.

1.1.2 Технологія тривимірного друку SLA

SLA (Stereolithography) – технологія тривимірного друку, за якої рідкий фотополімер під дією світлового випромінювання лазера змінює свої фізичні властивості та твердне, утворюючи тверду поверхню в точці проекції лазера.

У ємність із рідким фотополімером поміщають сітчасту платформу, на ній відбуватиметься вирощування прототипу. Спочатку платформа перебуває на такій глибині, щоб її покривав найтонший шар полімеру завтовшки від 0,05 мм до 0,15 мм – це і є приблизна товщина шару в стереолітографії. Далі вмикається лазер, який впливає на ті ділянки полімеру, що відповідають стінкам цільового об'єкта, викликаючи їх затвердіння. Після цього вся платформа занурюється глибше, на величину, що дорівнює товщині шару. Також у цей момент спеціальна щітка зрошує ділянки, які могли залишитися сухими внаслідок деякого поверхневого натягу рідини. Схема установки представлена на рисунку 1.2.

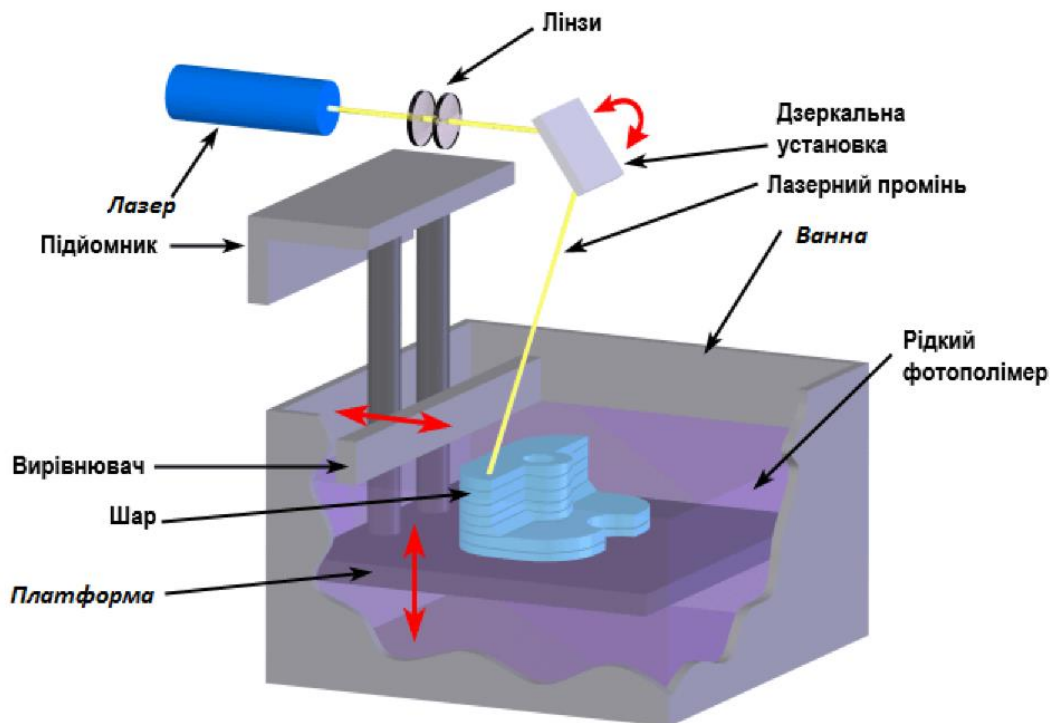


Рисунок 1.2 – Схема установки для стереолітографії

По завершенню побудови об'єкт занурюють у ванну зі спеціальними складами для видалення надлишків і очищення. І, нарешті, фінальне опромінення світлом для остаточного затвердіння. Як і багато інших методів 3D-прототипування, SLA вимагає зведення підтримуючих структур, які вручну видаляються після завершення будівництва [9].

Не обходиться і без істотних складнощів.

По-перше, вимоги до самого фотополімеру досить суперечливі: якщо він буде густим, то його легше полімеризувати, але складніше забезпечити рівну поверхню після кожного кроку занурення; доводиться використовувати спеціальну лінійку, яка на кожному кроці проходить поверхнею рідини та вирівнює її. Велика кількість затверджувача за фіксованої потужності лазера дасть змогу зменшити необхідний час впливу, однак неминуче фонове засвічення «псує» навколишній об'єм полімеру і скорочує можливий термін його використання.

По-друге, повна полімеризація кожного шару зайняла б чимало часу, тому засвічення проводиться до рівня, за якого шар набуває лише мінімально необхідної міцності, а згодом готову модель, попередньо промивши від залишків рідкого полімеру, доводиться опромінювати потужним джерелом у спеціальній камері, щоб полімеризація досягла 100 %.

Плюси технології:

- отримання дуже високої роздільної здатності та високої точності друку;
- отримання дуже великих моделей, розміром до 150×75×55 см і вагою до 150 кг;
- механічна міцність одержуваних зразків досить висока, вони можуть витримувати температуру до 100 °С;
- відсутність обмежень на складність моделі і наявність у неї дрібних елементів;
- мала кількість відходів після друку;
- легкість фінішної обробки, якщо така буде потрібна.

Недоліки технології:

- обмежений вибір матеріалів для виготовлення моделей;
- неможливість кольорового друку і поєднання різних матеріалів в одному циклі;
- мала швидкість друку, максимум 10 – 20 мм/год по вертикалі;
- дуже великі масогабаритні характеристики 3D принтерів.

Незважаючи на обмеженість спектра витратних матеріалів, вибір є, і можна отримувати моделі з різними властивостями: з підвищеною термостійкістю, гнучкі, з високою стійкістю до абразивів. Для стереолітографії доступні три кольори: білий, сірий, напівпрозорий.

1.1.3 Вибіркове лазерне плавлення SLM

SLM (Selective Laser Melting) – вибіркове лазерне плавлення. Цей метод має багато спільного з методом SLA, тільки замість рідини використовується порошок з діаметром частинок 10 – 100 мкм, який тонкими рівномірними шарами розподіляється в горизонтальній площині, а потім лазерний промінь плавить (рисунок 1.3) ділянки, що підлягають затвердінню на даному шарі моделі.

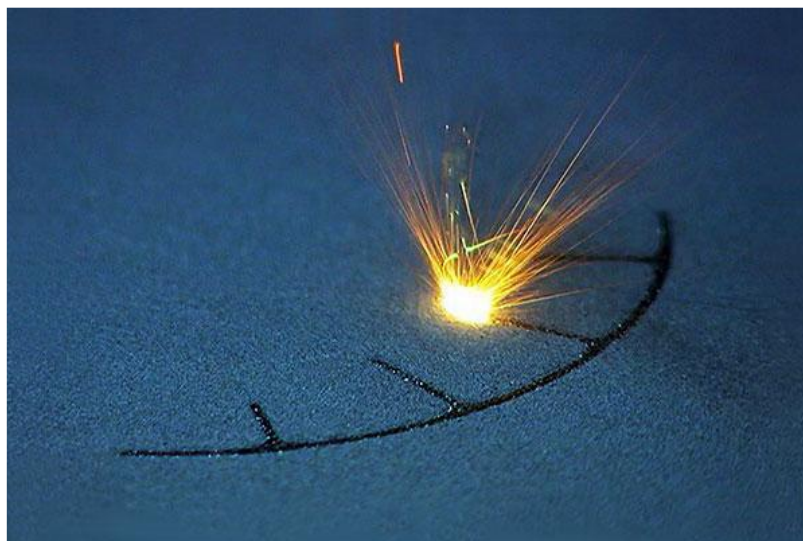
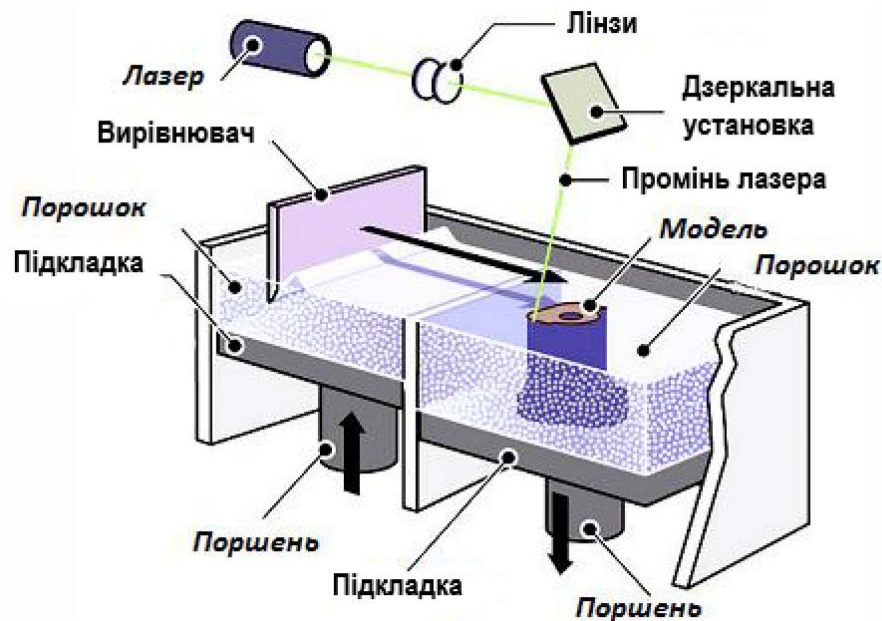


Рисунок 1.3 – Плавлення лазером порошкоподібного металу

Вихідні матеріали можуть бути найрізноманітніші: метал, пластик, кераміка, скло, ливарний віск. Порошок наноситься і розрівнюється по поверхні робочого столу спеціальним валиком, який під час зворотного проходу видаляє надлишки порошку (рисунк 1.4). Потім працює потужний лазер, що спікає частинки одна з одною і з попереднім шаром, після чого стіл опускається на величину, що дорівнює висоті одного шару. Для зниження потужності лазера, необхідної для спікання, порошок у робочій камері попередньо нагрівають майже до температури плавлення, а сам лазер працює в імпульсному режимі, оскільки для спікання важливіша пікова потужність, а не тривалість впливу [10].



Рисунк 1.4 – Схема установки для SLM

Частинки розплавляються повністю. Невикористаний порошок, що залишається навколо затверділих шарів, служить підтримкою при створенні елементів моделі, що нависають, тому немає необхідності у формуванні спеціальних підтримуючих структур. Але цей порошок після закінчення процесу необхідно видалити як з камери, особливо якщо наступна модель створюватиметься з іншого матеріалу, так і з порожнин уже виготовленої моделі, що можна зробити лише після її повного охолодження.

Найчастіше потрібна фінішна обробка – наприклад, полірування, оскільки поверхня може виходити шорсткою або з видимою шаруватістю. Крім того, матеріал може використовуватися не тільки чистий, а й у суміші з полімером або у вигляді частинок, покритих полімером, залишки якого потрібно видалити шляхом випалювання в спеціальній печі. Для металів одночасно відбувається заповнення порожнин, що виникають, бронзою.

Оскільки йдеться про високі температури, необхідні для спікання, процес відбувається в азотному середовищі з малим вмістом кисню. При роботі з металами це ще й запобігає окисленню.

Серійно випущені установки SLM дають змогу працювати з досить великими об'єктами, до $55 \times 55 \times 75$ см.

Технологію вибіркової лазерної плавки застосовують для побудови об'єктів складної геометричної форми, часто з тонкими стінками і порожнинами. Можливість комбінування гомогенних і пористих структур в одному об'єкті корисна при створенні імплантатів, наприклад, ацетабулярних чашок або інших ортопедичних імплантатів з пористою поверхнею, що сприяє остеоінтеграції (зрощенню з кістковою тканиною). Крім того, SLM успішно застосовують в аерокосмічній галузі, даючи змогу створювати високоміцні елементи конструкцій, недосяжні за геометричною складністю для традиційних механічних методів виготовлення та обробки (фрезерування, різання тощо). Якість готових виробів настільки висока, що механічна обробка готових моделей майже не потрібна. Побічним позитивним ефектом слугує економія матеріалів, бо SLM через свою специфіку є практично безвідходним виробництвом.

Під час випробувань NASA було встановлено, що деталі для ракетних двигунів J-2X і RS-25, виготовлені з нікелевих сплавів методом SLM, дещо поступаються за щільністю матеріалу аналогам, виготовленим литтям з подальшим зварюванням компонентів. З іншого боку, відсутність зварювальних швів сприяє на міцність виробів [10].

1.1.4 Метод прямого лазерного спікання DMLS

DMLS (Direct Method of Laser Sintering) – метод прямого лазерного спікання, ця технологія адитивного виробництва металевих виробів, розроблена компанією EOS з Мюнхена. DMLS часто плутають зі схожою технологією вибіркової лазерної плавки [6, 7].

Процес передбачає використання тривимірних моделей у форматі STL як креслень для побудови фізичних моделей. Тривимірна модель підлягає цифровій обробці для віртуального поділу на тонкі шари з товщиною, що відповідає товщині шарів, які наносяться друкарським пристроєм. Готовий «побудовний» файл використовується як набір креслень під час друку. Як нагрівальний елемент для спікання металевого порошку використовуються оптоволоконні лазери відносно високої потужності – близько 200 Вт. Деякі пристрої використовують більш потужні лазери з підвищеною швидкістю сканування (тобто пересування лазерного променя) для більш високої продуктивності. Як варіант, можливе підвищення продуктивності завдяки використанню декількох лазерів. DMLS дає змогу створювати цільні металеві деталі складної геометричної форми [10].

Порошковий матеріал подається в робочу камеру в кількостях, необхідних для нанесення одного шару. Спеціальний валик вирівнює поданий матеріал у рівний шар і видаляє зайвий матеріал із камери, після чого лазерна голівка спікає частинки свіжого порошку між собою та з попереднім шаром згідно з контурами, визначеними цифровою моделлю. Після завершення викреслення шару, процес повторюється: валик подає свіжий матеріал і лазер починає спікати наступний шар. Привабливою особливістю цієї технології є дуже висока роздільна здатність друку – в середньому близько 20 мікрон. Для порівняння, типова товщина шару в аматорських і побутових принтерах, що використовують технологію FDM, становить близько 100 мікрон [10].

Іншою цікавою особливістю процесу є відсутність необхідності побудови опор для нависаючих елементів конструкції. Не спечений порошок не видаляється під час друку, а залишається в робочій камері. Таким чином, кожен

наступний шар має опорну поверхню. Крім того, невитрачений матеріал можна зібрати з робочої камери після завершення друку і використати заново. DMLS виробництво можна вважати фактично безвідходним, що важливо при використанні дорогих матеріалів – наприклад, дорогоцінних металів.

Технологія практично не має обмежень щодо геометричної складності побудови, а висока точність виконання мінімізує необхідність механічної обробки надрукованих виробів.

Технологія DMLS має кілька переваг порівняно з традиційними виробничими методами. Найбільш очевидною є можливість швидкого виробництва геометрично складних деталей без необхідності механічної обробки. Виробництво практично безвідходне, що вигідно відрізняє DMLS від традиційних технологій. Технологія дає змогу створювати кілька моделей одночасно з обмеженням лише за розміром робочої камери. Побудова моделей займає близько кількох годин, що незрівнянно вигідніше, ніж ливарний процес, який може займати до кількох місяців з урахуванням повного виробничого циклу. З іншого боку, деталі, вироблені лазерним спіканням, не володіють монолітністю, а тому не досягають тих самих показників міцності, що і відлиті зразки, або деталі, вироблені традиційними методами.

DMLS активно використовується в промисловості з огляду на можливість побудови внутрішніх структур цілісних деталей, недоступних за складністю традиційним методам виробництва. Деталі з комплексною геометрією можуть бути виконані цілком, а не зі складових частин, що сприятливо впливає на якість і вартість виробів. Оскільки DMLS не вимагає спеціальних інструментів (наприклад, ливарних форм) і не виробляє великої кількості відходів, на відміну від традиційних методів, виробництво дрібносерійних партій за допомогою цієї технології набагато вигідніше, ніж за рахунок традиційних методів.

Технологія DMLS застосовується для виробництва готових виробів малого та середнього розміру в різних галузях, включно з аерокосмічною, стоматологічною, медичною тощо. Типовий розмір області побудови наявних установок становить 250×250×250 мм, хоча технологічних обмежень на розмір

не існує – це лише питання вартості пристрою. DMLS використовується для швидкого прототипування, знижуючи час розроблення нових продуктів, а також у виробництві, даючи змогу скорочувати собівартість дрібних партій і спрощувати складання виробів складної геометричної форми.

1.2 Адитивні технології в машинобудуванні

Технологія тривимірного друку з'явилася наприкінці 80-х років, піонером у цій галузі стала компанія 3D Systems (США), яка розробила перший комерційний стереолітографічний апарат – SLA (1986). До середини 90-х. він використовувався в основному в науково-дослідних та дослідно-конструкторських роботах, пов'язаних з оборонною промисловістю. Перші лазерні машини – спочатку стереолітографічні (SLA-машини), потім порошкові (SLS-машини) – були надто дорогими, вибір модельних матеріалів був досить скромним. Широке поширення цифрових технологій у галузі проектування (CAD), моделювання та розрахунків (CAE) та механічної обробки (CAM) стимулювало вибуховий характер розвитку технології 3D друку, і вкрай складно вказати область матеріального виробництва, де 3D принтери не будуть використовуватися, в тій чи іншого ступеня [11].

Цифрові 3D технології відкрили унікальні можливості для відтворення складних просторових форм, об'єктів, інженерних споруд та механізмів. Економічна ефективність 3D технології в її якісній безальтернативності, безвідходності та значному зниженні витрат у серійному та масовому виробництві. Водночас 3D технології є показником інтелектуального рівня науки, освіти, професійної кваліфікації трудових ресурсів та промислового розвитку. З початку ці технології називалися Rapid Prototyping (RP-technology, технологія швидкого прототипування), проте термін RP-technology досить застарів і в даний час не повною мірою відображає реальну сутність технології. Методи RP-technology зараз випускають продукцію, яку вже не можна назвати прототипами – імплантати та ендопротези, інструменти та форми, деталі літаків

та супутників та багато іншого.

Адитивні технології (від англійської Additive technology) – родова назва технологій, що передбачають виготовлення виробу за цифровою моделлю (або CAD-моделі) методом пошарового додавання (Additive, звідси і назва) матеріалу. Виріб виготовляють пошарово, крок за кроком, шляхом формування (тим чи іншим способом) шару матеріалу, затвердіння або фіксації цього шару відповідно до конфігурації розділу моделі САПР та з'єднання кожного наступного шару з попереднім [11].

Моделльні (будівельні) матеріали можуть бути рідкими (фотополімерні смоли, воски тощо), сипкі (пісок, порошкові полімери, металопорошкові композиції), у вигляді тонких листів (полімерні плівки, листи паперу тощо), а також у вигляді полімерної нитки або металевого дроту, що розплавляється безпосередньо перед формуванням шару побудови. При використанні АF-технології всі етапи реалізації проекту від ідеї до матеріалізації (у будь-якій формі – у проміжній або у вигляді готової продукції) знаходяться у «дружньому» технологічному середовищі, в єдиному технологічному ланцюжку, де кожна технологічна операція також виконується в цифровій системі CAD/CAM/CAE. Насправді це означає реальний перехід до «безпаперових» технологій, коли в принципі не потрібно виготовлення деталей традиційної паперової креслярської документації. Суть адитивного виготовлення (AF) можна проілюструвати простим прикладом: CAD-модель → AF-машина → деталь (рисунок 1.5).

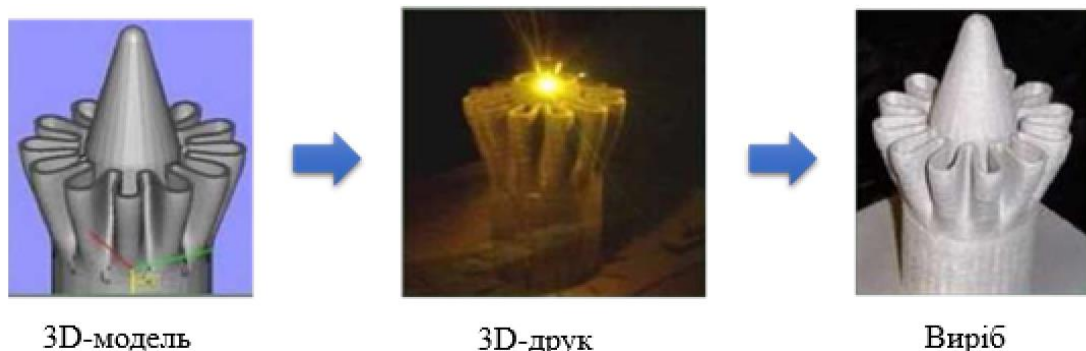


Рисунок 1.5 – Процес цифрового виробництва

У той час як традиційне виробництво включає набагато більше процесів (рисунок 1.6), що тягне за собою збільшення термінів виробництва і вартості, порівняно з більш коротким цифровим виробничим процесом.

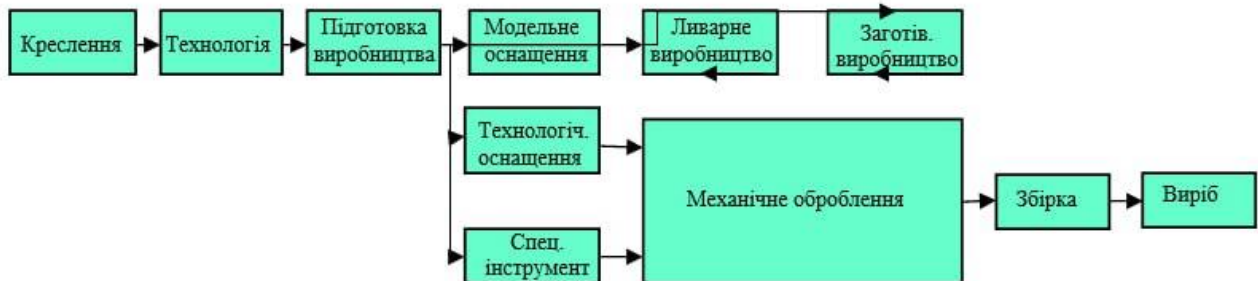


Рисунок 1.6 – Схема виробничого процесу традиційного виробництва

Аддитивні технології охоплюють нові галузі людської діяльності. Машинобудівники, архітектори, археологи, палеонтологи та представники інших професій використовують 3D принтери для реалізації різних ідей та проектів (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Приклад деталі виготовленої методом металевого 3D друку

Активно створюються роботизовані комплекси для «друку» бетонними сумішами, що швидко твердіють. Всі ці роботи проводяться за активної підтримки держави та бізнесу з різних джерел. Особлива увага приділяється розвитку технологій DMF (Direct Metal Fabrication) – прямого зростання з

металу. Ця технологія розглядається як одна із стратегічних технологій розвитку, насамперед в аерокосмічній та оборонній галузях промисловості. Все різноманіття адитивних технологій ґрунтується на автоматичному перетворенні електронних САД-проектів на твердотілі фізичні форми з використанням спеціальних цифрових фабрикаторів – фаберів (faber, від англійського слова “fabrication”), історія яких налічує кілька століть [12].

1.3 Принцип побудови виробу за технологією FDM

FDM (fused deposition modelling) – найзагальніша технологія друкування 3D у світі. З її допомогою вирощується продукція як на домашніх принтерах, так і промислових системах високоточного 3D-друку. принцип будівництва за технологією FDM полягає у пошаровому вирощуванні виробу із попередньо розплавленої пластикової нитки.

Спосіб друку: “друкуюча” голівка видавлює рідкий матеріал шар за шаром, вільно переміщуючись як у площині шару, так і вертикально. Матеріал – пластикова нитка намотана на бобіну. Через голівку та спеціальну сопло нитка подається на платформу, створюючи тверде тіло моделі. Мікропроцесор включає або відключає подачу матеріалу, а також контролює рух голівки у просторі у 3 координатах. Крім того, голівка нагріває матеріал так, щоб матеріал був пластичним і “клейким” для зчеплення з платформою і з вже надрукованою моделлю. (рисунок 1.8). Рух друкуючої голівки (екструдера) здійснюється по траєкторії, заданій системою обробки 3D-моделей, створених у САПР, модель будується шар за шаром, знизу-вгору [13].

Моделювання методом пошарового наплавлення (FDM) використовується для швидкого прототипування та швидкого виробництва. Швидке прототипування полегшує повторне тестування з послідовним покровим оновленням об'єкта. Швидке виробництво є недорогою альтернативою стандартним методам створення невеликих партій.

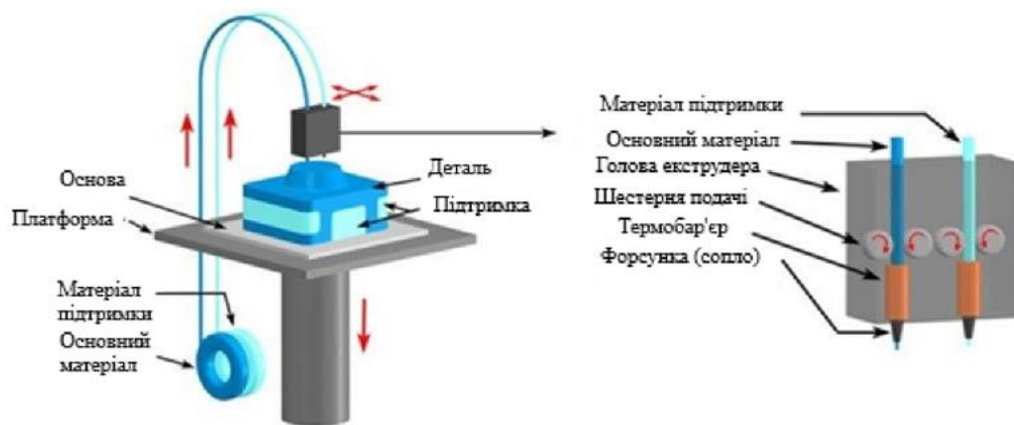


Рисунок 1.8 – Принципова схема FDM-друку

FDM є одним із дешевих методів друку, що забезпечує зростаючу популярність приватних принтерів, заснованих на цій технології.

Технологія FDM призначена для друку термопластиками, які зазвичай постачаються у вигляді тонких ниток, намотаних на бобіни. Асортимент "чистих" пластиків дуже широкий. Одним із найпопулярніших матеріалів є полілактид або "PLA-пластик". Цей матеріал виготовляється з кукурудзи або цукрової тростини, що робить його не токсичним та екологічно чистим, але робить його відносно недовговічним. ABS-пластик, навпаки, дуже міцний і зносостійкий, хоча він сприйнятливий до сонячних променів і може виділяти невелику кількість шкідливих парів при нагріванні. З цього матеріалу виготовляється багато пластмасових виробів промислового призначення, які ми використовуємо щодня: корпус побутової техніки, сантехніка, пластикові картки, іграшки та багато іншого.

На додаток до PLA і ABS, нейлон, полікарбонат, поліетилен і багато інших термопластів, що зазвичай використовуються в сучасній індустрії, можна використовувати в пресі. Можливе використання більш екзотичних матеріалів – таких як полівініловий спирт, відомий як PVA-пластик. Цей матеріал розчиняється у воді, що робить його дуже корисним при друку моделей

складної геометричної форми вимагають підтримок, що розчиняються.

Немає потреби друкувати однорідні пластмаси. також можна використовувати композитні матеріали, що імітують дерево, метали, камінь. такі матеріали використовують ті самі термопласти, але з домішками непластичних матеріалів. так, Laywoo-D3 частково складається з натурального деревного пилу, що дозволяє друкувати дерев'яні вироби, у тому числі і меблі.

Матеріал під назвою BronzeFill має справжній бронзовий наповнювач, а виготовлені з нього моделі піддаються шліфуванню та поліруванню, досягаючи високої подібності до виробів із чистої бронзи.

Варто лише пам'ятати, що термопласти є сполучним елементом у композиційних матеріалах – вони визначають пороги міцності, термостійкості та інші фізико-хімічні властивості готових моделей.

1.4 Основні принципи, етапи, переваги та недоліки FDM 3D друку

Початковим кроком є створення або завантаження 3D моделі об'єкта, який ви хочете надрукувати. Ця модель генерується за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для 3D моделювання.

Після створення 3D моделі, програмне забезпечення, що керує 3D принтером, роздруковує об'єкт шар за шаром. Принтер використовує пластиковий філат для нанесення різних шарів на будівельну платформу.

Філат нагрівається внутрішнім друкарським головкам, і рідкий пластик наноситься на платформу відповідно до 3D моделі. Після нанесення кожного шару пластик охолоджується і твердне, з'єднуючись з попереднім шаром.

Деякі складні об'єкти можуть вимагати додаткових структур для підтримки висячих або горизонтальних елементів. Ці структури зазвичай роздруковуються з тимчасового матеріалу, який потім видаляється після завершення друку.

Після завершення друку може знадобитися додаткова обробка об'єкта, така як обрізка зайвого матеріалу або обробка поверхні для покращення

вигляду та якості друку.

FDM 3D друк широко використовується в різних галузях, включаючи прототипування, виробництво кінцевих деталей, навчання та дослідження. Оскільки ця технологія доступна для дому і наукових лабораторій, вона здійснює революцію в творчості та інженерній розробці, дозволяючи створювати складні та індивідуалізовані об'єкти з використанням 3D друку. FDM 3D друк має свої переваги і недоліки, які варто враховувати при виборі цієї технології для конкретних завдань і застосувань. Ось деякі з них:

До переваг FDM 3D друку можна віднести [13]:

- вартість і доступність. Принтери FDM вважаються одними з найбільш доступних і економічних пристроїв для 3D друку. Вони підходять для дому, навчання та малих бізнесів;

- простота використання. Принтери FDM досить прості у використанні, і їх можна швидко налаштувати для початку друку;

- матеріали. Ця технологія працює з широким спектром матеріалів, включаючи різні види пластику, гуми, і навіть метал;

- висока швидкість друку. Принтери FDM зазвичай пропонують високу швидкість друку, що робить їх ефективними для створення великих об'єктів;

- можливість змішування матеріалів. Деякі принтери FDM дозволяють змішувати різні матеріали в одному друку для отримання унікальних властивостей і кольорів;

- просте обслуговування. Більшість FDM принтерів досить надійні та відносно легко обслуговуються.

До недоліків FDM 3D друку можна віднести:

- обмеженість роздільної здатності. FDM не завжди здатен надрукувати деталі з дуже високою роздільною здатністю, порівняно з іншими технологіями;

- видимі шари. Друкування шарами може призводити до видимих лінійних шарів на об'єктах, що вимагають подальшої обробки або фарбування;

- обмежена якість поверхні. Поверхні виробів, надрукованих за допомогою FDM, можуть бути грубими, і для досягнення більшої гладкості потрібна додаткова обробка;

- підтримка. Деякі складні об'єкти можуть вимагати використання підтримки, яку потрібно буде видаляти після друку;

- можлива деформація. Пластиковий матеріал, який використовується в FDM, може деформуватися або згинатися під впливом тепла або механічного впливу;

- вимоги до температури та вологості. Деякі матеріали, які використовуються в FDM, можуть бути чутливими до температури і вологості, що вимагає спеціальних умов зберігання.

Загалом, FDM 3D друк є важливою технологією для багатьох застосувань, але варто розглядати як його переваги, так і недоліки, при виборі для конкретних завдань.

1.5 Висновки по розділу

Для контролю точності 3D принтера рекомендується використовувати комплексні перевірки на підставі:

- які дозволяють визначити точність та повторюваність позиціонування по всьому робочому об'єму 3D принтера за допомогою лазерного інтерферометра;

- оцінку точності переміщення осей 3D принтера в динаміці, і виявити такі відхилення, які неможливо виявити за допомогою вимірювання точності позиціонування, наприклад, похибки реверсування, похибки переміщення при прискореннях тощо. Дані відхилення важливі і повинні враховуватися, оскільки під час екструдера відбувається формування поверхні деталі. Наприклад, похибка реверсування збільшить шорсткість деталі у місці реверсу, похибка переміщення при прискореннях утворює відхилення розмірів у місці прискорення тощо;

– точність 3D друку визначається точністю переміщення друкувальної головки, а також залежить від параметрів екструзії та впливу зовнішніх факторів, таких як якість охолодження моделі, температури навколишнього середовища. Вплив цих факторів можна простежити під час друку зразка виробу та контролю відхилень форми та розмірів надрукованого виробу.

2 МЕТОДИКА ОЦІНКИ ТОЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ НА 3D ПРИНТЕРІ

2.1 Кінематики 3D принтерів за технологією FDM

На даний момент немає стандарту на випробування точності 3D принтера, але очевидно, що точність 3D друку більшою мірою залежить від кінематики принтера. Розпочати розбір методики оцінки точності 3D принтерів варто із загального огляду контрольованих параметрів.

Незважаючи на те, що всі принтери FDM працюють за одним принципом – пошарове наплавлення, конструктивні відмінності між окремими їхніми видами досить істотні. Це пристрої для створення тривимірних об'єктів, як зрозуміло з назви, шляхом пошарового нанесення на робочу поверхню розплавленого термопластика [14].

Зрозуміло, у методу є і недоліки, а саме:

- необхідність налаштовувати параметри друку під кожен вид пластику і навіть на пластики одного типу різних виробників і партій;
- точність і роздільна здатність по осях хтау обмежена діаметром сопла;
- за віссю z утворюються лінії шарів, видимі і відчутні навіть за мінімального кроку;
- нависаючі частини деталі потребують підтримки, що призводить до ускладнення друку, перевитрати матеріалу, зниження якості поверхні;
- структура деталі виходить неоднорідною за міцністю, впоперек шарів максимальне витримування навантаження нижче, ніж уздовж;
- деталі з пластиків, що мають навіть невелику термоусадку, викривляються під час друку через нерівномірний нагрів і охолодження, відриваються від столу і спотворюють геометричні розміри;
- обмеження за фізичними властивостями матеріалів друку.

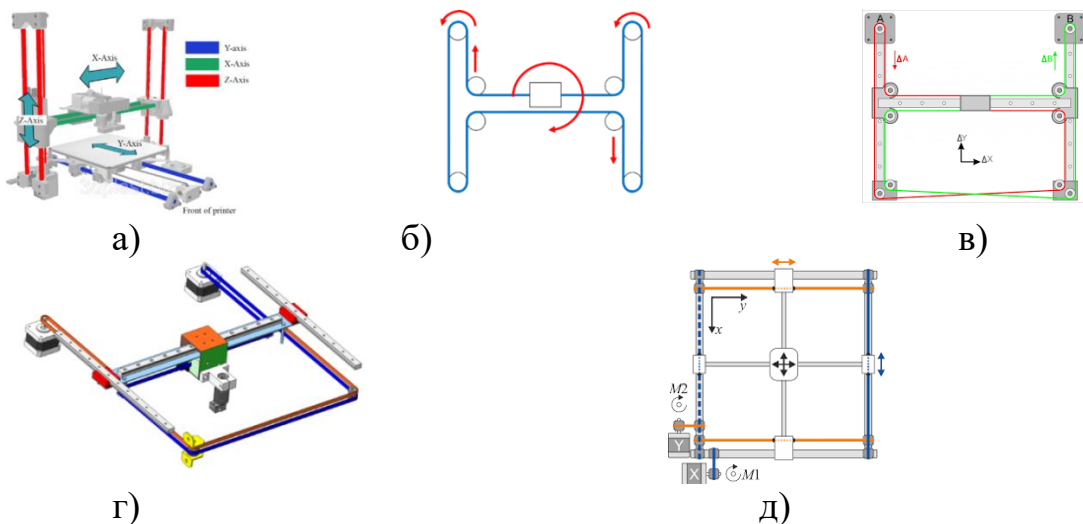
Однак недоліки перекриваються перевагами даного методу:

- висока швидкість і низька вартість прототипування;
- відносно проста і недорога конструкція принтерів, доступна ціна;
- великий вибір і невисока вартість витратних матеріалів;
- прийнятна швидкість друку, порівняно з іншими технологіями;
- точність розмірів близько десятої міліметра і вище, чого достатньо для переважної кількості виробів;
- міцність, при деяких матеріалах і правильно підібраних параметрах друку, наближається до міцності литих виробів.

Базових частин у будь-якого FDM-принтера всього дві: стіл (він же платформа), на якому кріпиться деталь, що друкується, і екструдер – вузол, з якого подається розм'якшений матеріал. Загалом, як відомо, у тривимірного об'єкта три осі $-x$, y і z , де z – традиційно вертикальна. Тобто, як два елементи принтера ділять ці три напрямки, і є принципом роботи кожного з видів.

Кожен 3D принтер має власну кінематичну схему, згідно з якою приводяться в рух механічні частини пристрою: платформи та екструдери.

На рисунку 2.1 наведено основні кінематики 3D принтерів [15].



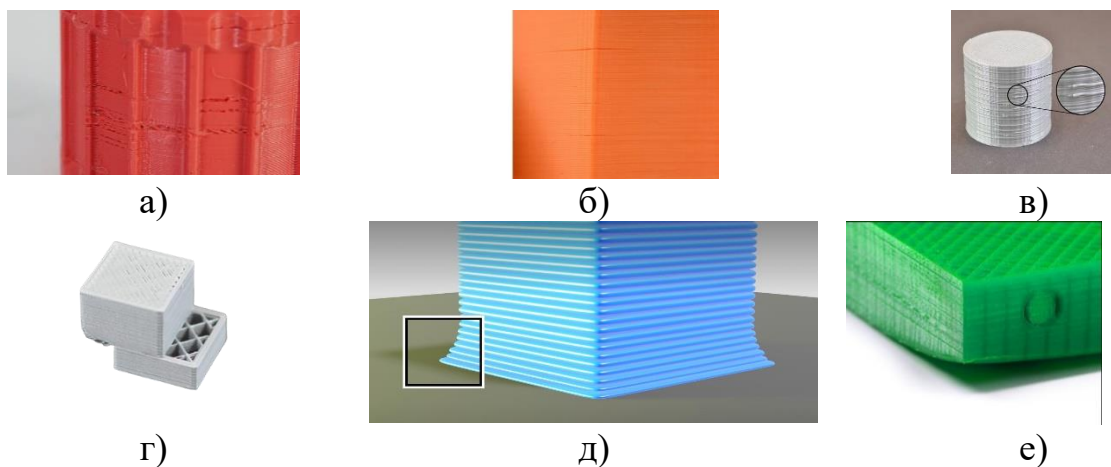
а – кінематики «Prusa»; б – кінематики «H-bot»; в – кінематики «CoreXY»; г – кінематики «Makerbot»; д – кінематики «Ultimaker»
Рисунок 2.1 – Види кінематиків 3D принтерів за технологією FDM

2.2 Дефекти FDM 3D друку

За часту при друці 3D-моделі, перераховані дефекти утворюються не тільки через вплив одного фактору, а можуть утворюватися через комбінації окремих чинників, але спробуємо вивести окрему категорію факторів [8]. Дефекти поверхні друкованих виробів можливо поділити на три категорії:

- дефекти пов'язані з матеріалом друку: вологість філаменту, неповномірний розмір прутка філаменту;
- похибки в роботі самого верстату: кривизна осей для переміщення екструдера, не достатній натяг ременя, недоекструзія через засмічення у соплі екструдера або в механізмі подачі пластику, не виставлений стіл побудови моделі відносно самого екструдера, тощо;
- дефекти через невірне налаштування параметрів друку. Ця категорія доволі велика тому, але можемо вказати основні чинники утворення дефектів: невірне налаштування висоти шару друку, помилки в казані температури друку, охолодження моделі, не вірні вказані параметри сопла в програмі, налаштування підтримок моделі, тощо.

Через подібні чинники, на поверхні друкованої моделі можуть з'явитися наступні дефекти, які наведено на рисунку 2.2.



а – недоекструзія матеріалу; б – деламінація моделі; в – напливи;
г – зміщення моделі; д – слонова нога; е – відлипання моделі від столу

Рисунок 2.2 – Види дефектів поверхні друкованих моделей

За часту при друці 3D-моделі, перераховані дефекти утворюються не тільки через вплив одного фактору, а можуть утворюватися через комбінації окремих чинників. Тому контроль технологічного процесу виготовлення друкованих деталей є актуальною задачею.

Для зменшення дефектів при виробництві друкованих моделей, використовуються різні підходи, але одним з ефективних є автоматизований контроль процесом друку. До цієї категорії також відноситься і візуальний контроль друку з можливістю розпізнавання дефектів та редагуванням G-code [9, 14].

2.3 Вплив матеріалу друку на точність виготовлення деталей

При FDM технології якість виробу багато в чому залежить від якості використовуваного матеріалу, при цьому не останню роль відіграють умови зберігання філоменту.

Більшість пластиків для 3D друку є гігроскопічні в тій чи іншій мірі. Наприклад, такі матеріали для 3D друку як нейлон, PETG, PVA та більшість гнучких пластиків найбільш примхливі та насичуються вологою за лічені години. Популярні пластики PLA та ABS теж вбирають вологу, але в набагато меншому ступені, і часу на це буде потрібно значно більше.

Друк вологим пластиком може завдати чимало проблем (рисунок 2.3).

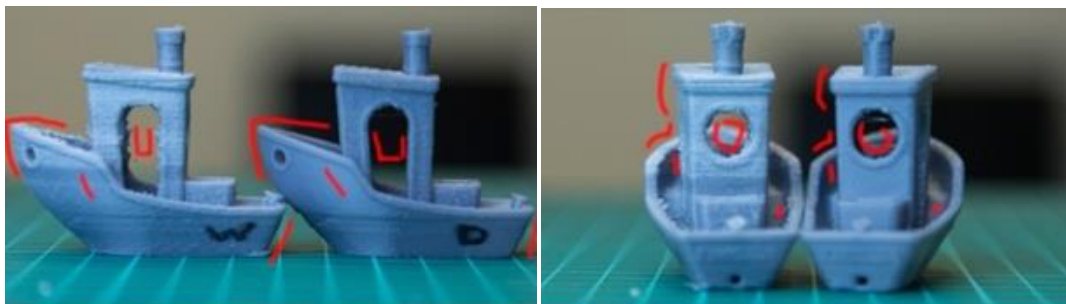


Рисунок 2.3 – Різниця між друкуванням вологим і сухим пластиком

У кращому випадку вийде не якісна поверхність моделі або вона не надрукуються, через погану, між слойну адгезію.

У гіршому випадку, це може привести до серйозного засмічення сопла і необхідності його заміни.

Неозброєним поглядом визначити, що пластик вологий, неможливо. Але є характерні ознаки, які помітні відразу після початку друку:

- тріск двигуна подачі пластика при екструзії;
- шипіння пластика в соплі;
- пузиріння пластика на виході з сопла;
- виділення пару в районі сопла;
- нерівні лінії, струни і бульбашки в шарах;
- погана адгезія шарів (рисунок 2.4).

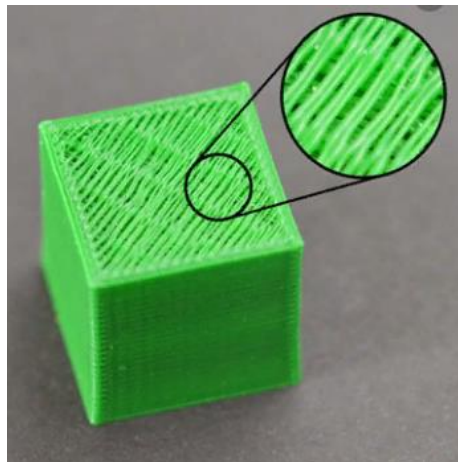


Рисунок 2.4 – Погана адгезія шарів

Все це впливає на якість готової продукції. Оскільки 3D друк зараз використовують в масовому виробництві, потрібно забезпечити стабільну якість виробів. Тому що навіть невеликий недолік може призвести до бракування виробу або всієї партії.

На рисунку 2.5 можливо побачити різницю між вологим пластиком і сухим на виході з сопла екструдера.

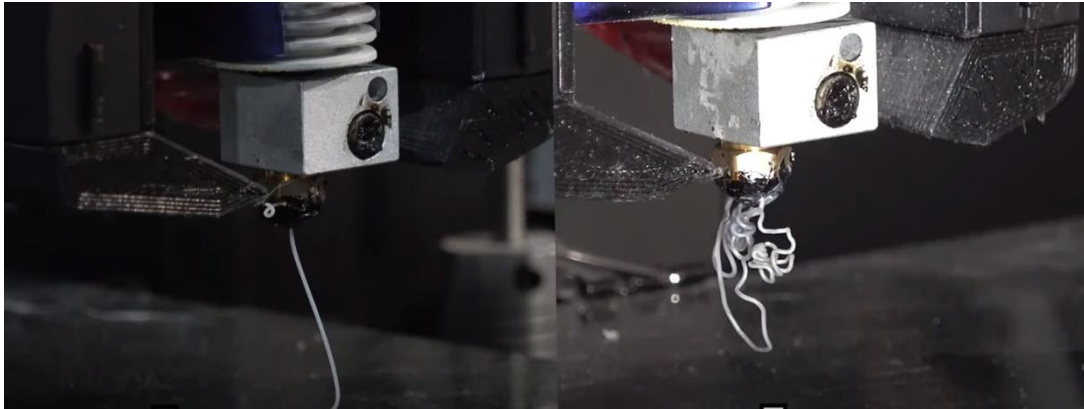


Рисунок 2.5 – Різниця між вологим пластиком і сухим на виході з сопла екструдера

Зліва у нас знаходиться сухий пластик, а справа вже вологий, або ж погано висушений. Міцність деталі на розрив дуже сильно змінилася.

Тест міцності деталі на розрив показано у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Показники «вологих» та «сухих» пластиків на розрив

	Вологий	Сухий
ABS/PAL	5,4 кг	6,5 – 6,6 кг
ABS/PEГ	4,6 кг	5,3 кг
ABS/Філаментарно	5,2 кг	6,1 кг

2.4 Вплив корпусу принтера на точність друку

Велику роль на якість та точність друку моделі при 3D друці за технологією FDM, відіграє жорсткість корпусу 3D принтера. Чим більше жорсткість конструкції тим менший люфт рухомих частин, що в свою чергу позитивно впливає на точність позиціонування екструдера та дозволяє друкувати модель на більших швидкостях.

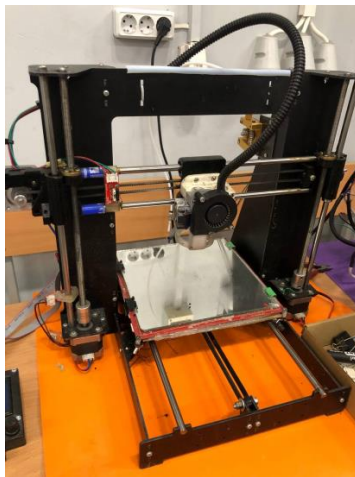
Жорсткість конструкції в свою чергу залежить від двох чинників, а саме:

– матеріалу корпусу (фанера, пластик, акрил, алюмінієвий верстаний

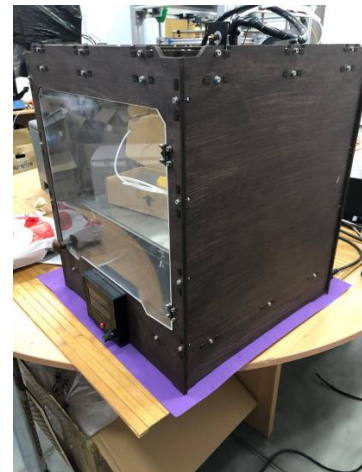
профіль);

– тип формування корпусу (збірний або штампований).

Одним з найдешевших типом корпусів для 3D принтерів є збірні корпус з листового матеріалу, фанери, акріла, пластику або металу. Зазвичай вони використовуються в дешевих кінематиках таких як «Prusa», але можуть зустрічатися і більш дорогих та складних механіках. Вони виготовляються зазвичай за допомогою лазерного різання або фрезерування. Товщина матеріалу зазвичай від 4 – 8 мм, з'єднання між собою частин відбувається за допомогою гвинтів та гайок М3 або М4, та пазів передбачених при розкрою листа, рисунок 2.6. Для більшої жорсткості такий тип формування корпусу може бути виконаний в металі товщиною від 3 мм до 6 мм.



а)



б)

а – збірний різаний корпус з металу; б – збірний різаний корпус з фанери

Рисунок 2.6 – Різані корпуси з листового матеріалу

До переваг даного типу корпусів можна віднести:

- низька вартість (через низьку вартість виготовлення);
- простота виготовлення;
- простота збірки корпусу.

До недоліків можливо віднести, наступні параметри:

- низька жорсткість конструкції. Суттєво це відчувається коли використовується фанера або акрил, це пов'язано гнучкість матеріалу та його

руйнуванням при вібраціях при роботі принтера;

– недостатня надійність з'єднання гвинтами. Часом експлантації проточені пази в корпусі під гайки через вплив вібрації, стають білими і гвинти недостатньо стягують запчастини корпусу;

– корпуси виконані з фанери сильно хильни набирати вологу, та руйнуватися, а корпуси з акрилу або пластику під дією механічних вібрацій з часом тріскаються в місцях з'єднання частин принтера.

Наступним типом корпусів для 3D принтерів є, корпуси виконані за допомогою верстатний алюмінієвого профілю. Цей варіант являється універсальним з точки розробки 3D принтерів різних кінематик, та модифікацій.

Такий матеріал використовується як і комерційних принтерах так і в саморобних. Алюмінієвий верстатний профіль, представляє собою профіль квадратного або прямокутного перетну, з пазами з кожної сторони здовж всієї його довжини. Стандартними розмірами такого профілю, які використовуються для створення 3D принтерів, є: 20×20 мм, 20×40 мм, 20×60 мм, 30×30 мм, 30×60 мм, 40×40 мм та 40×80 мм.

З'єднання профілю між собою відбувається за допомогою верстатних кутків, Т-гайок та гвинтів (рисунок 2.7).

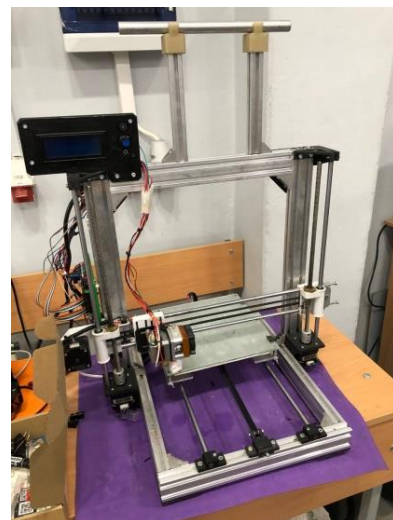
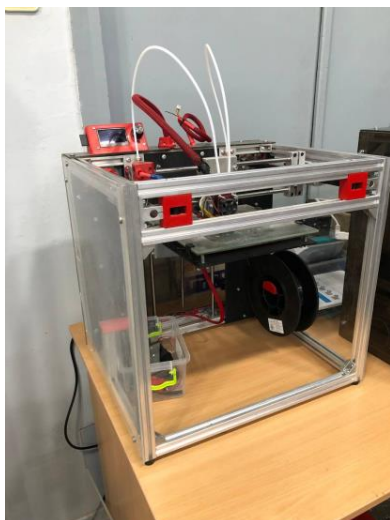


Рисунок 2.7 – Різані корпуси з листового матеріалу

До переваг даного тип збірки можна віднести:

- доволі висока жорсткість конструкції;
- універсальність та можливість модифікацій (можливо робити 3D принтери різних розмірів та встановлювати додаткові вузли або датчики).

До недоліків можливо віднести:

- висока вартість профілю, Т-гайок та кутків;
- точність різання профілю (щоб забезпечити жорсткість конструкції необхідно зберегти перпендикулярність з'єднання, а для цього необхідно, щоб торці профілю були перпендикулярні після нарізки).

Штамповані корпуси най поширеніший тип корпусу для комерційних 3D принтерів. Вони використовуються для будяки кінематик. Корпус виконанні з листового металу товщиною 3 мм, гнуті за допомогою штампування та зварювання. За рахунок додаткових ребр жорсткості та мінімальності використання гвинтових з'єднань (рисунок 2.8).

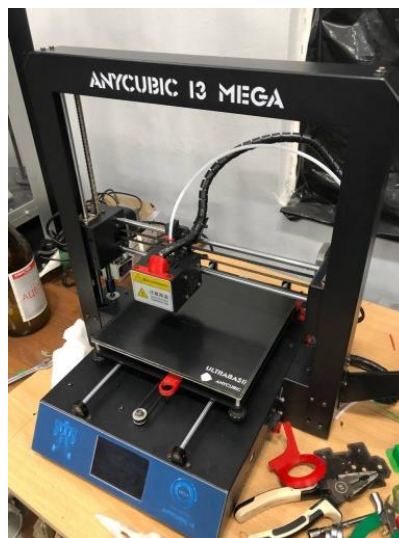


Рисунок 2.8 – Приклад 3D принтерів з штампованою рамою

До переваг даного тип збірки можна віднести:

- висока серійність виготовлення;
- доволі висока жорсткість конструкції;
- відсутність додаткової збірки принтера після придбання;

До недоліків можливо віднести:

- висока вартість виготовлення для одиничного виготовлення;
- складність встановлення додаткових модифікації принтерів.

2.5 Методи підвищення точності 3D друку

Системи контролю якості 3D-друку пластику містять кілька ключових аспектів, які допомагають забезпечити високу якість готових виробів, таких як [16]:

а) контроль параметрів друку:

- 1) температура екструзії. Неправильна температура може призвести до поганого прилипання шарів або деформації;
- 2) швидкість друку. Впливає на якість шарів і можливість утворення дефектів;
- 3) охолодження. Необхідне для правильного затвердіння пластику, особливо для таких матеріалів, як PLA;

б) моніторинг процесу:

- 1) використання камер і датчиків для відстеження процесу друку в реальному часі;
- 2) програмне забезпечення, яке аналізує дані та попереджає про можливі проблеми (наприклад, обрив нитки або неправильне прилипання);

в) контроль матеріалів:

- 1) перевірка якості використовуваного пластику (наприклад, наявність вологи, однорідність матеріалу);
- 2) переконайтеся, що нитки відповідають специфікаціям (діаметр, товщина);

г) методи перевірки готових виробів:

- 1) візуальний огляд. Перевірка на наявність видимих дефектів (порожнечі, спотворення, нерівності);
- 2) вимірювання геометричних параметрів. Використання

штангенциркуля або 3D-сканування для перевірки розмірів;

3) тестування механічних властивостей. Визначення міцності, гнучкості та інших характеристик;

д) статистичний контроль процесу:

1) застосування методів контролю процесів, як-от контрольні карти й аналіз причинно-наслідкових зв'язків, для виявлення й усунення систематичних помилок;

е) зворотний зв'язок і доопрацювання. Збір інформації про дефекти і проблеми, щоб покращувати процес друку і підвищувати його ефективність.

Ці заходи допоможуть значно підвищити якість 3D друку і знизити кількість браку у виробництві.

2.6 Особливості систем моніторингу 3D друку

Моніторинг процесу 3D друку – це важливий аспект, який допомагає контролювати і покращувати якість друкованих виробів. Основні методи і технології, що використовуються для моніторингу:

а) камери та відеоспостереження. Використовуються для візуального контролю процесу друку. Камери можуть фіксувати всі етапи та виявляти дефекти, як-от зміщення шарів або неправильне прилипання;

б) датчики, а саме:

1) температурні датчики. Контролюють температуру екструзії та столу;

2) датчики тиску. Стежать за тиском в екструдері, що допомагає запобігти його засміченню;

3) датчики рівня. Забезпечують коректну подачу матеріалу та відстежують його залишок;

в) програмне забезпечення. Спеціалізовані програми для моніторингу, які можуть аналізувати дані в реальному часі. Деякі з них інтегруються з хмарними сервісами для зберігання та аналізу історичних даних;

г) аналіз вібрацій і звуків. Використовуються для виявлення аномалій у процесі друку, які можуть свідчити про механічні проблеми;

д) системи управління якістю (QMS). Інтеграція системи моніторингу в загальну систему управління якістю допомагає збирати й аналізувати дані для поліпшення процесів;

е) зворотний зв'язок у реальному часі. Повідомлення про проблеми через мобільні додатки або на панелі керування принтера. Це дає змогу швидко реагувати на дефекти, що виникають;

ж) автоматизовані системи коригування. Деякі сучасні 3Dпринтери можуть автоматично налаштовувати параметри друку залежно від умов процесу, щоб мінімізувати дефекти.

На даний момент системи технічного зору (СТЗ) для адитивного 3Ддруку працюють з відео потоком, та можуть тільки виявляти відрив моделі від столу та пере екструзію матеріалу [16]. Основною причиною недосконалості СТЗ для цієї технології виробництва є проблеми:

- обробки великого об'єму відео потоку;
- роздільна здатність камери, бо більшість дефектів малі за розміром а на дані системи зазвичай ставлять камери не великою розділеною здатністю;
- відсутності достатньо великої бази даних поверхневих дефектів при різних параметрах друку.

Більшість цих перепон можливо вирішити, комплектацією верстатів з камерами більшої роздільної здатності створенням архіву зображень дефектів друку для бази знань. Проблему обробки відео, можливо розв'язати за рахунок отримання декілька фотографій моделі підчас друку з різних ракурсів в певні проміжках часу. Це дозволить зменшити об'єм вхідної інформації, то того ж обробка фото більш проста та дозволяє покращувати якість зображення.

Задачу візуального контролю та обробки зображень друкованих виробів, можливо розкласти на наступні складові:

- фільтрація зображень. Використовується для зменшення шуму на зображенні, покращення контрасту та інших властивостей зображення. До

методів фільтрації належать медіанна фільтрація, фільтрація Гауса, лінійна фільтрація, згладжувальні фільтри та інші;

- сегментація зображень. Використовується для виділення окремих об'єктів на зображенні. Це може бути корисно для автоматизованого розпізнавання об'єктів, класифікації зображень та іншого. До цього класу можна віднести адаптивна та проста бінарізація зображень знаходження порогових значень контрастів за допомогою методу Otsu;

- визначення ознак. Використовується для виділення специфічних ознак зображення, таких як кольорові характеристики, форма та текстура. Це може бути корисно для класифікації зображень та іншого. Особливу увагу необхідно надати методам вирівнювання зображень по опорним ключовим точкам, а саме BRISK, ORB та AKAZE [17, 18];

- розпізнавання образів. Використовується для автоматичного розпізнавання об'єктів на зображенні та класифікації зображень за допомогою алгоритмів машинного навчання.

Програмне забезпечення для візуального пошуку дефектів наведено на рисунку 2.9.

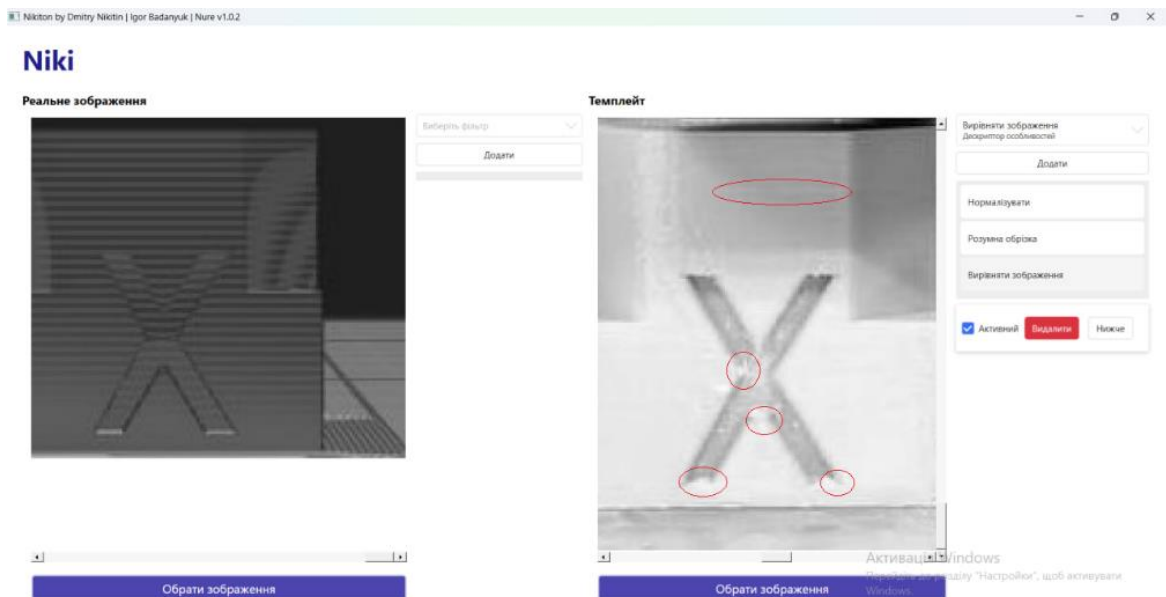


Рисунок 2.9 – Приклад програмного забезпечення для пошуку візуальних дефектів поверхні друкованих деталей

Розробка подібних програм, є доволі складною задачею яка потребує:

- більшої роздільної здатності камери для систем СТЗ;
- розробки систем сканування та підсвітки моделі під час друку з усіх сторін;
- великої бази знань дефектів та еталонних зображень моделі;
- створення алгоритмів ідентифікація дефекту та чинника, які вплинули на його виникнення, що свою чергу підіймає задачу машинного навчання.

2.7 Висновки по розділу

В ході написання другого розділу були розглянуті, особливості технології 3D прототипування за технологією FFF/FDM, видам дефектів та відхилення друкованої структури моделі. Особливу увагу було надано, будові та принципам роботи сучасних 3D принтерів за технологією FFF/FDM.

Розглянуто які саме особливості конструкції верстатів та параметрам друку моделі, можуть впливати на появу дефектів та відхилень.

Розглянуті методи підвищення точності друку моделі та методи автоматизованого контролю виробництвом. Розглянуті проблеми сучасних систем візуального контролю друкованих виробів, а саме:

- обробки великого об'єму відео потоку;
- роздільна здатність камери;
- відсутності достатньо великої бази даних поверхневих дефектів при різних параметрах друку.

Описані особливості систем моніторингу для процесу 3D друку виробу, а саме основні етапи для обробки зображення готового виробу за допомогою системи технічного зору.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПОРІВНЯННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

Порівняння зображень відіграє важливу роль у різних галузях, пов'язаних з обробкою зображень і комп'ютерним зором. Воно необхідне для виявлення подібності або відмінностей між двома зображеннями, що є критично важливим у низці завдань: розпізнавання об'єктів, класифікація, реєстрація тощо.

Для знаходження відмінностей між двома зображеннями можна використовувати кілька різних алгоритмів залежно від цілей завдання, складності зображень і точності, якої потрібно досягти.

Ось кілька підходів до цього питання:

- піксельне порівняння (Pixel-wisecomparison) – порівняння зображень за пікселями (наприклад, з використанням абсолютних різниць);
- гістограмне порівняння – порівняння розподілів інтенсивності (або кольорів) зображень;
- SSIM (StructuralSimilarity Index) – складніший метод, який порівнює зображення, враховуючи їхню структурну інформацію;
- оптичний потік – аналіз руху об'єктів у послідовних зображеннях;
- методи на основі ознак (наприклад, SIFT, SURF) – аналіз ключових точок і особливостей зображення;
- глибокі нейронні мережі – використання навчених моделей для складніших завдань порівняння зображень.

3.1 Піксельне порівняння зображень

Піксельне порівняння зображень – це один із простих і прямих методів для знаходження відмінностей між двома зображеннями. Цей метод полягає в тому, що пікселі одного зображення порівнюються з відповідними пікселями

іншого зображення. Якщо різниця між ними перевищує заздалегідь встановлений поріг, то ці пікселі вважаються різними (рисунок 3.1).

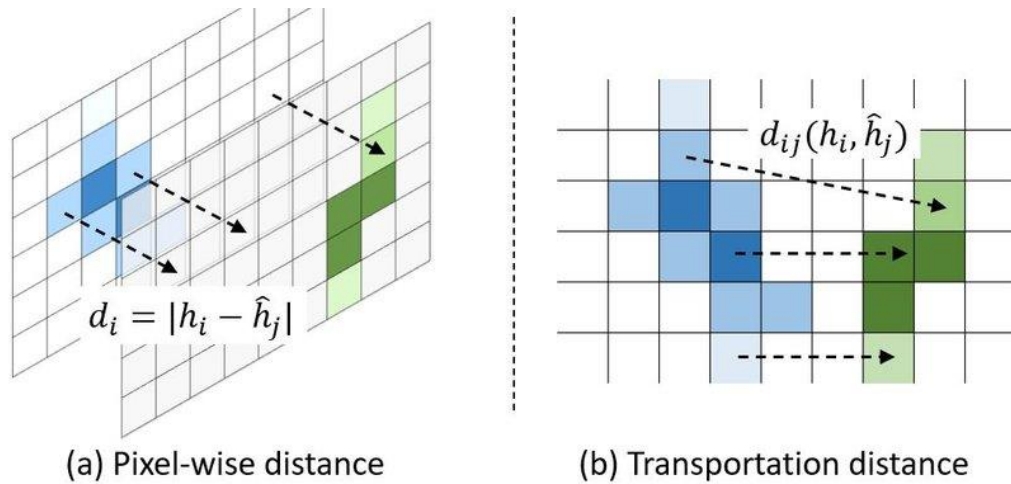


Рисунок 3.1 – Піксельне порівняння зображень

Основні кроки піксельного порівняння:

- порівняння розмірів зображень. Перед початком порівняння потрібно переконатися, що обидва зображення мають однакові розміри. Якщо зображення мають різні розміри, потрібно їх або обрізати, або масштабувати;
- порівняння пікселів. Для кожного пікселя обчислюється різниця між значеннями кольорів у відповідних пікселях двох зображень;
- порогове значення. Для того щоб уникнути незначних відмінностей (наприклад, через шуми або малі зміни), використовується порогове значення. Якщо різниця між пікселями менша за поріг, то вони вважаються однаковими;
- відображення відмінностей. На основі результату порівняння можна виділити області відмінностей на зображенні (наприклад, за допомогою бінарної маски).

Цей метод підходить для випадків, коли необхідно знайти точні відмінності між двома ідентичними зображеннями, і використовується для завдань, таких як:

- порівняння зображень після обробки або змін;

– виявлення змін на картинках (наприклад, у процесі контролю якості).

Підключення бібліотеки наведено в Додатку А.

3.2 Метрика для вимірювання схожості SSIM

SSIM (Structural Similarity Index) – це метрика для вимірювання схожості між двома зображеннями, яка враховує такі характеристики, як яскравість, контраст і структура. На відміну від простого піксельного порівняння, SSIM оцінює сприйняття людиною змін у зображенні, що робить його більш чутливим до структурних змін, а не просто до невеликих змін у значеннях пікселів.

Застосування SSIM:

– оцінка якості стиснення зображень. SSIM використовується для оцінки втрат якості під час стиснення зображень, наприклад, у форматі JPEG;

– візуальні зміни. SSIM може бути корисний для порівняння зображень до і після обробки, щоб оцінити, наскільки змінився контент;

– порівняння зображень у комп'ютерному зорі. SSIM використовується для оцінювання схожості зображень у завданнях, таких як детекція об'єктів або аугментація даних.

SSIM корисний для виявлення змін у зображеннях, як-от втрати якості, спричинені стисненням або іншими змінами, і широко використовується в галузі оброблення зображень, наприклад, для оцінювання якості зображень або відеоконтенту.

Основні компоненти SSIM:

– яскравість. Вимірює відмінності в яскравості між двома зображеннями;

– контраст. Оцінює відмінності в контрасті між зображеннями;

– структура. Порівнює структурні елементи зображення, такі як текстури та форми.

Метрика SSIM дає результат у діапазоні від -1 до 1. Де -1 – означає, що

зображення ідентичні, 0 – означає повну відсутність подібності. Негативні значення можуть з'являтися в разі сильних відмінностей у зображеннях, наприклад, якщо одне зображення є інверсією іншого (рисунк 3.2).

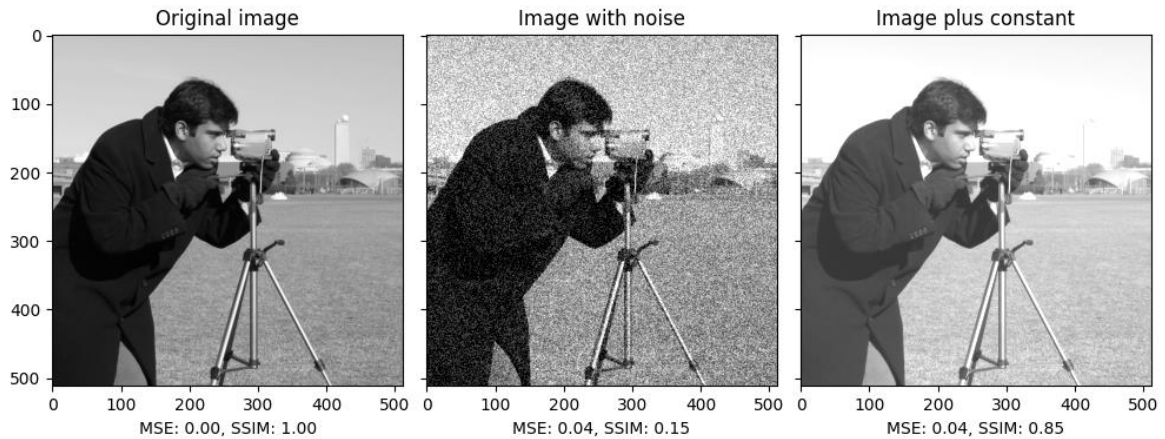


Рисунок 3.2 – Обробка за допомогою SSIM

SSIM обчислюється за виразом 3.1, яка поєднує в собі яскравість, контраст і структуру [18]:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (3.1)$$

де μ_x, μ_y – середні значення яскравості зображення x та y ;

σ_x^2, σ_y^2 – дисперсія зображення x та y ;

σ_{xy} – коваріація між зображеннями x та y ;

C_1, C_2 – константа яка використовується для обчислення стабільності виразу.

У Python для обчислення SSIM можна використовувати бібліотеку `scikit-image`, яка надає функцію `structural_similarity` (Додаток Б). Приклад нижче покаже, як використовувати цю функцію для обчислення SSIM між двома зображеннями.

До переваг SSIM, можна віднести:

- більш чутливий до сприйняття людини. SSIM враховує особливості сприйняття змін, як-от структура і контраст, що робить його більш придатним

для завдань, пов'язаних із якістю зображень;

- виявляє структурні відмінності. Цей індекс добре працює для аналізу зображень із втратами якості (наприклад, після стиснення), оскільки він чутливий до порушень структури.

До недоліків SSIM, можна віднести:

- чутливість до змін яскравості. У разі, коли два зображення мають однакову структуру, але різняться за яскравістю або контрастом, SSIM може бути менш точним, якщо ці зміни не враховані в розрахунках;

- потребує обчислювальних ресурсів. SSIM – це складніша метрика, ніж просте піксельне порівняння, і може вимагати більше обчислювальних ресурсів, особливо для великих зображень.

Застосування SSIM:

- оцінка якості стиснення зображень. SSIM використовується для оцінки втрат якості під час стиснення зображень, наприклад, у форматі JPEG;

- візуальні зміни. SSIM може бути корисний для порівняння зображень до і після обробки, щоб оцінити, наскільки змінився контент;

- порівняння зображень у комп'ютерному зорі. SSIM використовується для оцінювання схожості зображень у завданнях, таких як детекція об'єктів або аугментація даних.

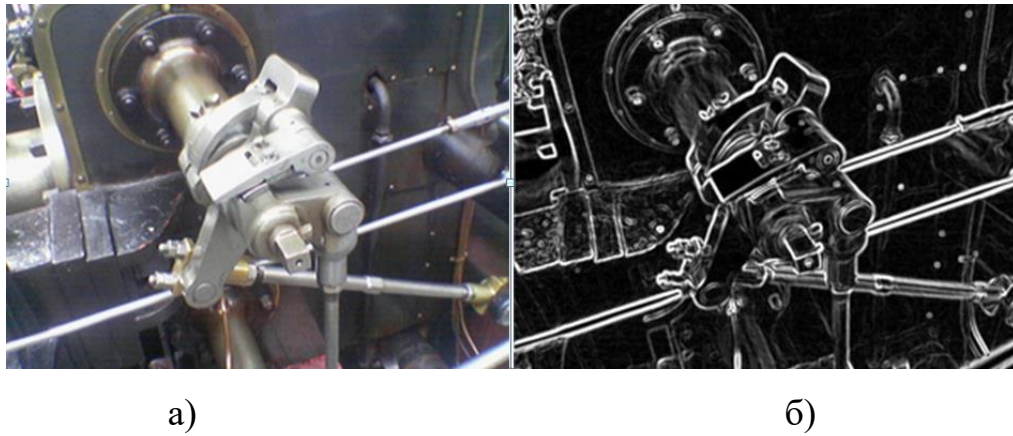
3.3 Виділення контурів

Виділення контурів – це процес виявлення і виділення меж об'єктів на зображенні. Контури являють собою лінії або криві, які з'єднують пікселі з однаковими або схожими значеннями інтенсивності. Цей метод часто використовується в обробці зображень для виділення форми об'єктів, а також у таких завданнях, як розпізнавання об'єктів, аналіз зображення і сегментація.

Найпоширеніші методи для виділення контурів – це використання операторів Собеля та Канні. Розглянемо основні методи більш детально.

Оператор Собеля – це один із найпопулярніших методів для виділення

контурів у зображеннях, що ґрунтується на обчисленні градієнтів у двох напрямках (за осями x і y), як зображено на рисунку 3.3.



а – парова машина в кольорі;
б – застосування оператора Собеля до зображення

Рисунок 3.3 – Оператор Собеля

Це дає змогу виявити різкі зміни інтенсивності та виділити межі об'єктів.

Кроки для застосування оператора Собеля:

- застосування оператора Собеля для обчислення градієнта по осях x і y ;
- обчислення градієнта за амплітудою;
- застосування порогового значення для виділення значущих контурів.

Оператор Канні є більш складним і точним методом виділення контурів (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Оператор Канні

Він включає кілька етапів:

- Гаусовий фільтр. Розмиття зображення для усунення шуму;
- градієнти. Обчислення градієнтів з використанням оператора Собеля;
- ненульова межа. Застосування порогового значення для вибору значущих меж;
- гістерезис. Процес усунення слабких меж, які не пов'язані із сильними межами.

Метод Канні дає змогу отримувати точніші та чистіші контури, ніж просто використання оператора Собеля. В Додатку В, наведено код підключення, який показує, як застосувати обидва методи (Собеля і Канні) з використанням бібліотеки OpenCV.

До переваг та недоліків методу Собеля, можна віднести:

- простий у реалізації і може бути корисний для швидкого виділення контурів;
- не такий точний і стійкий до шуму, як метод Канні.

До переваг та недоліків методу Канні, можна віднести:

- дуже точний метод, який добре виділяє контури й усуває шум;
- складніший у реалізації та потребує налаштування параметрів (наприклад, порогових значень).

3.4 Порівняння гістограм

Порівняння гістограм – це один із поширених методів для оцінювання схожості між зображеннями, що використовується в задачах, де потрібно визначити, наскільки схожими є два зображення з точки зору розподілу яскравості або кольорів [19].

Гістограма зображення – це графік, який відображає розподіл інтенсивності пікселів за діапазоном значень, наприклад, від 0 до 255 для зображень у градаціях сірого або за каналами кольору для кольорових зображень (рисунок 3.5).

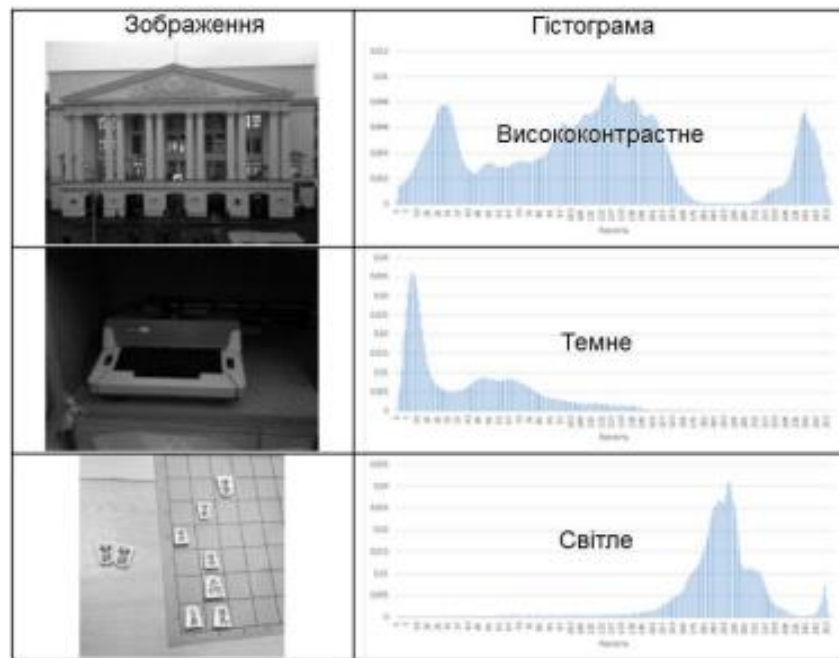


Рисунок 3.5 – Приклади тестових зображень та гістограм, побудованих на їх основі

Для порівняння гістограм використовуються різні метрики, які дають змогу кількісно оцінити схожість двох розподілів. Визначення ефективності порівняння гістограм існують наступні приблизні метрики для порівняння:

- метрика кореляції. Вимірює ступінь лінійної залежності між двома гістограмами;
- метрика χ^2 -квадрат. Оцінює відмінності між гістограмами через суму квадратів відхилень;
- метрика взаємної інформації. Вимірює кількість інформації, яку один розподіл передає про інший;
- метрика Евклідової відстані. Вимірює відстань між гістограмами як норму різниці між їхніми значеннями.

В Додатку Г, наведено метод порівняння гістограм через кореляцію та евклідову відстань, які добре підходять для більшості випадків.

Переваги методу порівняння гістограм:

- простота і швидкість в обчисленнях;
- добре працює для зображень з однаковими умовами освітлення і

текстурами.

Недоліки методу порівняння гістограм:

- чутливість до змін в освітленні та кольорах;
- не завжди добре працює для зображень, які мають різні масштаби або орієнтацію.

3.5 Витяг і порівняння особливостей

ORB, SIFT і SURF – це методи для виявлення та опису ключових точок (або особливостей) в зображеннях, які широко використовуються в задачах комп'ютерного зору, зокрема для порівняння зображень, стереозору, обробки зображень і виявлення змін. Всі три алгоритми мають схожу мету: знайти важливі точки на зображенні, які є інваріантними до трансформацій, таких як масштаб, обертання або зміщення. Однак вони відрізняються за принципами роботи, точністю та ефективністю.

3.5.1 Алгоритм для виявлення та опису особливих точок SIFT

SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) – це алгоритм для виявлення та опису особливих точок, який був розроблений Девідом Лавліном в 1999 році. Його основна мета – виявлення точок, які є стабільними щодо масштабів, обертів та деяких типів шуму.

До переваг SIFT алгоритму, можна віднести:

- масштабна інваріантність. SIFT може виявляти ключові точки на зображеннях, які масштабуються;
- обертальна інваріантність. Система може працювати з обертами зображень, не втрачаючи точності;
- робота з різними освітленнями та шумом. SIFT стабільно працює навіть при зміні освітлення чи присутності шуму;
- алгоритм. SIFT спочатку шукає “особливі точки” через побудову піраміди зображень (зменшення зображень за допомогою Гаусового фільтра) та

використовує диференціальні методи для пошуку найбільш контрастних точок на різних масштабах.

Недоліки:

- висока обчислювальна складність. Алгоритм потребує значних обчислювальних ресурсів, що робить його повільним на великих зображеннях або відео;

- патенти. Оскільки SIFT був патентований, його використання в деяких комерційних програмах може бути обмежене.

3.5.2 Алгоритм для виявлення та опису особливих точок SURF

SURF (Speeded-Up Robust Features) – це покращена версія SIFT, розроблена для того, щоб бути швидшою, зберігаючи при цьому хорошу точність виявлення ключових точок.

До переваг SURF алгоритму, можна віднести:

- швидкість. SURF набагато швидший за SIFT, завдяки використанню Hessian матриці для виявлення точок замість методу гауссового фільтру;

- масштабна інваріантність. Як і SIFT, SURF добре працює з масштабами;

- обертальна інваріантність. SURF також здатний працювати з обертами зображень;

- інваріантність до освітлення. Володіє гарною стійкістю до змін освітлення;

- більш ефективний алгоритм. Він використовує зменшення розмірів зображення через методи, засновані на фільтрації, що дозволяє значно зменшити обчислювальну складність.

Недоліки:

- хоча SURF швидший за SIFT, він все ще може бути досить вимогливим до ресурсів на великих зображеннях.

3.5.3 Алгоритм для виявлення та опису особливих точок ORB

ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) – це безкоштовна альтернатива SIFT і SURF, яка поєднує FAST (Features from Accelerated Segment Test) для виявлення ключових точок і BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features) для опису цих точок [19].

Позитивні характеристики:

- швидкість і ефективність. ORB є набагато швидшим, ніж SIFT і SURF, завдяки використанню бінарних описів для ключових точок замість більш складних математичних описів, що дозволяє швидко виконувати порівняння зображень;

- обертальна інваріантність. ORB враховує орієнтацію ключових точок, що дає йому стійкість до обертання зображень;

- масштабна інваріантність. Як і інші методи, ORB підтримує інваріантність до змін масштабу;

- безкоштовність. ORB є відкритим і не має обмежень патентів, що робить його привабливим для використання в комерційних програмах;

- менша точність. Хоча ORB дуже швидкий, його точність може бути меншою порівняно з SIFT і SURF, особливо в складних випадках, де на зображеннях присутні сильні зміни або шум.

Недоліки:

- менша точність в порівнянні з SIFT і SURF при обробці складних зображень або зображень з великою кількістю змін.

В таблиці 3.1 наведено характеристики порівняння алгоритмів ORB, SIFT та SURF.

Таблиця 3.1 – Порівняння алгоритмів

Параметр	SIFT	SURF	ORB
1	2	3	4
Швидкість	Повільний	Швидший за SIFT	Дуже швидкий
Точність	Висока	Висока	Помірна, залежить від умов

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
Інваріантність до масштабу	Так	Так	Так
Інваріантність до обертання	Так	Так	Так
Інваріантність до освітлення	Так	Так	Так
Використання патентів	Патентований	Патентований	Безкоштовний

Також слід зазначити, що ORB є відмінним вибором для реальних додатків, де важлива швидкість, але точність не є критичною, або для задач в реальному часі, таких як розпізнавання об'єктів на мобільних пристроях (Додаток Е).

3.6 Оцінка методів пошуку різниці між зображеннями

Для оцінки вірності знаходження різниці між двома зображеннями будуть використовуватися наступні показники:

- точність (Accuracy). Як добре алгоритм знаходить справжні відмінності;
- чутливість (Recall). Наскільки добре алгоритм виявляє всі відмінності, не пропускаючи їх;
- точність (Precision). Наскільки точно алгоритм виділяє відмінності, без помилкових спрацьовувань;
- F1-міра. Комбінована метрика, що враховує і точність, і чутливість.

Точність (Accuracy) – це метрика, яка вимірює частку правильно передбачених елементів (у цьому контексті – правильно виявлених відмінностей) від загальної кількості елементів (у цьому випадку – всіх пікселів або об'єктів для порівняння).

У контексті порівняння зображень точність може бути описана таким чином:

- правильні передбачення (Truepositives, TP). Це області або пікселі, які були правильно позначені як відмінності;
- неправильні передбачення (Falsepositives, FP). Це області або пікселі, які були помилково позначені як відмінності, хоча їх немає;
- помилки (Falsenegatives, FN). Це області або пікселі, які були не помічені як відмінності, хоча вони є;
- правильні непомічені області (Truenegatives, TN). Це області або пікселі, які правильно не були помічені як відмінності.

Таким чином, точність (accuracy) у завданні пошуку відмінностей відобразатиме, наскільки добре алгоритм розрізняє змінені та незмінені частини зображень, зокрема уникаючи як помилкових спрацьовувань (помилково знайдених відмінностей), так і пропусків (невиявлених відмінностей).

Чутливість (Recall), також відома як Повнота (Sensitivity), – це метрика, що вимірює здатність алгоритму правильно виявляти всі істинні позитивні елементи (у цьому разі – всі істинні відмінності) у завданні. У контексті порівняння зображень чутливість вказує на частку всіх істинних відмінностей, які були правильно виявлені.

Показник чутливості вимірюється наступним чином:

- чутливість дорівнює 1 (100%). Це ідеальний випадок, коли алгоритм правильно знаходить усі відмінності, не пропускаючи жодної;
- чутливість дорівнює 0. Це випадок, коли алгоритм не знаходить жодної з істинних відмінностей, класифікуючи всі їх як однакові.

F1-міра – це комбінована метрика, яка поєднує в собі точність (Precision) і чутливість (Recall). Вона дає змогу оцінити баланс між двома цими показниками, що є важливим у багатьох задачах, зокрема при порівнянні зображень або виявленні змін. F1-міра корисна, коли потрібно знайти оптимальний компроміс між точністю (коли важливо, щоб виявлені зміни були дійсно змінені, без фальшивих спрацьовувань) та чутливістю (коли важливо не пропустити жодної зміни, навіть якщо це призведе до деяких помилок).

3.7 Висновки по розділу

В ході написання третього розділу були розглянуті методи для обробки зображень, а саме:

- піксельне порівняння зображень;
- метрика для вимірювання схожості SSIM;
- методи виділення контурів;
- порівняння гістограм зображень та знаходження різниць між зображеннями;
- розглянуті алгоритми для вирівнювання готового зображення з еталоном, а саме методи SIFT, SURF та ORB.

Розроблено програмне забезпечення для знаходження дефектів поверхні друкованої моделі. Проведено оцінку методів для знаходження різниці між зображеннями, а саме CAD моделлю та готовим виробом. Оцінка вірності знаходження дефектів визначалася за таким параметрами як: точність (Accuracy) знаходження дефекту на поверхні виробу; чутливість (Recall), наскільки добре алгоритм виявляє всі відмінності; точність (Precision), наскільки точно алгоритм виділяє відмінності, без помилкових спрацьовувань.

Заключною оцінкою слугує F1-міра, яка є вимірною оцінкою, що враховує і точність, і чутливість.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці на робочому місці

На робочому місці оператора ПК виникають небезпечні та шкідливі фактори: підвищений рівень шуму, несприятливі мікрокліматичні умови, недостатній рівень освітленості, шкідливі речовини, підвищений рівень електромагнітних випромінювань радіочастот, висока напруга електричної мережі, статична електрика та інші. Робота з ПК супроводжується також підвищеним ступенем напруженості трудового процесу. При систематичному впливі виробничих факторів, які не відповідають нормативним показникам, зростає рівень професійно зумовленої захворюваності працюючих та можуть виникнути професійні захворювання органів зору, руху, нервової системи. Таким чином, вивчення умов праці на робочому місці програміста є необхідною умовою запобігання негативних наслідків впливу небезпечних та шкідливих факторів.

Організація робочого місця. Приміщення, в якому знаходиться робоче місце програміста, загальною площею 48 м², і висотою стелі 3,5 м. У приміщенні знаходиться 6 робочих місць з ПК. Кожне робоче місце обладнане робочим столом, стільцем та персональним комп'ютером, що складається з монітора, системного блоку, клавіатури та миші [20].

4.2 Промислова безпека на робочому місці

Живлення ПК здійснюється від трифазної чотирьох електричної мережі змінного струму з глухо-заземленою нейтраллю і напругою 220 В, частотою 50 Гц. Згідно НПАОП 40.1-1.21-98 приміщення можна віднести до категорії без підвищеної небезпеки, так як в приміщенні відсутні чинники, які викликають підвищену або особливу небезпеку.

Для створення безпечних умов праці необхідно провести ряд організаційних і технічних заходів. Згідно НПАОП 40.1-1.32-01 для запобігання ураження людини електричним струмом в приміщенні застосовується система занулення.

4.3 Виробнича санітарія у приміщенні

Робота оператора ПК за енерговитратами відноситься до категорії легких робіт. В таблиці 4.1 наведені оптимальні параметри мікроклімату в приміщеннях, де виконуються роботи операторського типу [20].

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату для приміщень з ПК

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	22 – 24°C; 40 – 60%; до 0.1 м/с
Теплий	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	23 – 25°C; 40 – 60%; 0.1 – 0.2м/с

Виміряні за допомогою приладів температура та вологість у лабораторії відповідають вказаним у таблиці для теплого періоду року. Слід зазначити, що для нормалізації параметрів мікроклімату слід використовувати у приміщеннях кондиціонування повітря, або забезпечити подачу свіжого повітря системами вентиляції.

Лабораторія, де виконується робота, має наступні характеристики:

- площа приміщення – 48 м² (8 м × 6 м);
- висота – 3,5 м;
- кількість робочих місць – 6 шт.;
- обладнання – стіл з ПК і периферією – 6 шт.

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, має забезпечувати 6 м² площі та 20 м³ об'єму на одне окреме робоче місце з ПК [20]. Площа приміщення 48м² та об'єм 168 м³, на кожне робоче місце приходиться 8 м² площі об'єм 28 м³, тобто вимога виконана.

Приміщення з ПК повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%.

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності, викладеної в [20].

Розрахункова формула методу:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (4.1)$$

де W – питома потужність, Вт/м²;

S – площа приміщення, м²;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{cv} \cdot n_{cv}, \quad (4.2)$$

де W_{cv} – потужність одного світильника, Вт;

n_{cv} – кількість світильників в приміщенні.

$$W_{\Sigma} = 100 \cdot 4 = 400 \text{ Вт}, \quad (4.3)$$

$$W = \frac{400}{48} = 8,33 \text{ Вт/м}^2. \quad (4.4)$$

Питомої потужності 8,33 Вт/м² по таблиці Б.3 із [20] відповідає освітленість в 250 лк при мінімальній допустимій освітленості 300 лк.

Отже, для створення сприятливих зорових умов в лабораторії необхідно збільшити кількість світильників або замінити лампи в світильниках на більш потужні.

4.4 Пожежна безпека приміщення

Пожежна безпека – стан об'єкта, при якому виключається можливість пожежі, а у випадку його виникнення запобігає вплив на людей небезпечних факторів пожежі й забезпечується захист матеріальних цінностей.

Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі й системою пожежного захисту. У всіх службових приміщеннях обов'язково повинен бути План евакуації людей при пожежі, що регламентує дії персоналу у випадку виникнення вогнища загоряння, що й указує місця розташування пожежної техніки.

Горючими компонентами у виробничому приміщенні є: перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів і ін.

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження його поширення, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі.

Джерелами запалювання у виробничому приміщенні можуть бути електронні схеми від ПК, прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрою електроживлення, кондиціонування повітря, де в результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри й дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів.

У сучасних ПК дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості друг від друга розташовуються сполучні проведення, кабелі. При протіканні по них електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відводу надлишкової теплоти від ПК служать системи вентиляції й кондиціонування повітря. При постійній дії ці системи являють собою додаткову пожежну небезпеку.

Енергопостачання виробничого приміщення здійснюється за допомогою трансформаторної станції та за допомогою двигун-генераторних агрегатів. На трансформаторних підстанціях особливу небезпеку представляють трансформатори які мають масляне охолодження. У зв'язку із цим перевагу слід віддавати сухим трансформаторам.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи за темою досліджень в першому розділі проведено аналіз предметної області, можна зробити наступний висновок, що для контролю точності 3D принтера рекомендується використовувати комплексні перевірки на підставі:

- які дозволяють визначити точність та повторюваність позиціонування по всьому робочому об'єму 3D принтера за допомогою лазерного інтерферометра;

- оцінку точності переміщення осей 3D принтера в динаміці, і виявити такі відхилення, які неможливо виявити за допомогою вимірювання точності позиціонування, наприклад, похибки реверсування, похибки переміщення при прискореннях тощо. Дані відхилення важливі і повинні враховуватися, оскільки під час екструдера відбувається формування поверхні деталі. Наприклад, похибка реверсування збільшить шорсткість деталі у місці реверсу, похибка переміщення при прискореннях утворює відхилення розмірів у місці прискорення тощо;

- точність 3D друку визначається точністю переміщення друкувальної головки, а також залежить від параметрів екструзії та впливу зовнішніх факторів, таких як якість охолодження моделі, температури навколишнього середовища. Вплив цих факторів можна простежити під час друку зразка виробу та контролю відхилень форми та розмірів надрукованого виробу.

В другому розділі були розглянуті особливості технології 3D прототипування за технологією FFF/FDM, видам дефектів та відхилення друкованої структури моделі. Особливу увагу було надано, будові та принципам роботи сучасних 3D принтерів за технологією FFF/FDM.

Розглянуто які саме особливості конструкції верстатів та параметрам друку моделі, можуть впливати на появу дефектів та відхилень.

Розглянуті методи підвищення точності друку моделі та методи

автоматизованого контролю виробництвом. Розглянуті проблеми сучасних систем візуального контролю друкованих виробів, а саме:

- обробки великого об'єму відео потоку;
- роздільна здатність камери;
- відсутності достатньо великої бази даних поверхневих дефектів при різних параметрах друку.

Описані особливості систем моніторингу для процесу 3D друку виробу, а саме основні етапи для обробки зображення готового виробу за допомогою системи технічного зору.

В третьому розділі були розглянуті методи для обробки зображень, а саме:

- піксельне порівняння зображень;
- метрика для вимірювання схожості SSIM;
- методи виділення контурів;
- порівняння гістограм зображень та знаходження різниць між зображеннями;
- розглянуті алгоритми для вирівнювання готового зображення з еталоном, а саме методи SIFT, SURF та ORB.

Розроблено програмне забезпечення для знаходження дефектів поверхні друкованої моделі. Проведено оцінку методів для знаходження різниці між зображеннями, а саме CAD моделлю та готовим виробом. Оцінка вірності знаходження дефектів визначалася за таким параметрами як: точність (Accuracy) знаходження дефекту на поверхні виробу; чутливість (Recall), наскільки добре алгоритм виявляє всі відмінності; точність (Precision), наскільки точно алгоритм виділяє відмінності, без помилкових спрацьовувань.

Заключною оцінкою слугує F1-міра, яка є вимірною оцінкою, що враховує і точність, і чутливість.

Під час виконання четвертого розділу «Охорона праці» були визначені небезпечні та шкідливі виробничі чинники. Таким чином, були розроблені заходи і технічні засоби щодо забезпечення безпеки праці працюючого

персоналу. Застосування цих заходів дасть змогу максимально знизити ймовірність отримання травм під час роботи, а також поліпшити умови роботи персоналу лабораторії, де виконувалася робота над дослідженнями.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки й оформлення 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. І.Ш. Невлюдов, Р.В. Артюх, Н.П. Демська, В.В. Євсєєв, О.І. Филипченко, О.М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 50 с.

2. Положення про організацію проведення практики здобувачі в вищій освіти Харківського національного університету радіоелектроніки [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 03 травня 2019 р. №222. – Режим доступу: <https://nure.ua/wp-content/uploads/222-vid-03.05.2019-provvedennjavidjuri-shennja-vchenoi-radi-universite-tu.pdf>.

3. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація «Звіти у сфері науки і техніки». Структура та правила оформлювання. / В. Земцева; Ю. Поліщук, канд. фіз.-мат. наук; Р. Санченко, канд. техн. наук; Л. Шрамко; А. Ямчук (науковий керівник) ДП «УкрНДНЦ» від 22 червня 2015р. № 61 з 2017-07-01.

4. Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та роботехніки [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://tapr.nure.ua/golovna/pro-nas/istorija-kafedri/> – 25.09.2024 р. – Загл. з екрану.

5. Гавриков Є.Ю., Осман А.Я. / Дослідження технологій виробництва деталей на 3D принтері / «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023 Part 2. Харків, ХНУРЕ.: 2023. С. 12-16.

6. Ahsan M.N. et. al. A comparative study of laser direct metal deposition characteristics using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders // *Materials Science and Engineering*. – 2011. – P. 7648-7657.

7. Ahsan M.N. et. al. A comparison of laser additive manufacturing using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders // *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*. – London: Taylor & Francis Group, 2012.

8. Boulos M. Plasma power can make better powders. *Metal Powder Report*. 2004. – Vol. 59. – Issue 5. – P. 16-21.

9. David L. Bourella, Joseph J. Beaman, Jr.a, Ming C. Leub and David W. Rosenc. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead. *RapidTech 2009*. – 46p.

10. Donachie M.J., Donachie S. *Superalloys: A Technical Guide*, 2 nd Ed. – ASM International, 2002. – 438 p.

11. Dutta B. et. al. Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition *Advanced Materials & Processes*, May 2011. P. 33-36.

12. Fngelo H. C., Subramanian R. *Powder Metalurge: Science, technology and application*. – New Dehli, 2009.

13. Louvis E. et. al. Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 211, Issue 2, 1 February 2011, Pages 275–284. Department of Engineering, The University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, United Kingdom.

14. Robbie Adams, Ion Fusion Formation, Pat. US 6,680,456 B2, Jan. 20, 2004.

15. Sabina L. Campanelli et. al. Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process. Polytechnic of Bari, Department of Management and Mechanical Engineering, Viale Japigia, 182 Italy [Электронный ресурс], Режим доступа: <http://cdn.intechweb.org/pdfs/12285.pdf>

16. Woodcock J. 3D printing, government and police. *TCT Magazin*, Volume 20 / Ussue 6. Nov.12.2012. – 5 p.

17. Yasa E. et. al. The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts // *Rapid Prototyping Journal*. – 2011. – Vol. 17. – Iss: 5. – P. 312-327.

18. Yasa E., Kruth J. Application of laser re-melting on Selective laser melting parts. Catholic University of Leuven, Dept. of Mech. Eng, Heverlee, Belgium. *Advances in Production Engineering & Management* 6 (2011) 4. P. 259-270.

19. Гэри Брадскі. *Learning Open CV. Computer Vision with the Open CV Library* / підруч. / Гэри Брадскі, Адріан Кехлер; – O'Reilly Media, 2018. – 580 с.

20. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Організація керування умовами праці» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т.Є. Стищенко, Г.В. Пронюк, Н.М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.