

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій автоматизації та
робототехніки

(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Розробка моделей FDM/FFF 3D-друку на міцність деталей для
роботизованих систем

(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання,
групи КІТПВзм-23-1

Чернов К.А.

Спеціальність 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Омаров М.А.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій автоматизації та
робототехніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

(код і повна назва)

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

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«____» _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Чернову Кирилу Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка моделей FDM/FFF 3D-друку на міцність деталей для
роботизованих систем

затверджена наказом університету від 22 листопада 2024 р. № 197 Стз

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 21 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

3.1 Опрецювати види 3D-друку;

3.2 Дослідити матеріали FMD 3D друку та кінематики FDM 3D принтерів;

3.3 Підготувати модель.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Аналіз предметної області;

4.2 Виготовлення моделі та план тестування;

4.3 Проведення експерименту;

4.4 Статистичний аналіз результатів.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі PowerPoint (*.ppt) – 12с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	10.09.2024	Виконано
2	Аналіз предметної області	1.10.2024	Виконано
3	Опрацювання літератури за темою роботи	13.10.2024	Виконано
4	Постановка задачі дослідження	30.10.2024	Виконано
5	Виготовлення моделі та план тестування	16.11.2024	Виконано
6	Проведення експерименту	11.12.2024	Виконано
7	Статистичний аналіз результатів	15.12.2024	Виконано
8	Розробка розділу охорони праці	25.12.2024	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки	15.01.2024	Виконано
10	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом	22.01.2024	Виконано
11	Подання роботи на рецензію	24.01.2024	Виконано
12	Подання роботи на підпис завідувачу кафедри	25.01.2024	Виконано
13	Подання кваліфікаційної роботи до ЕК	25.01.2024	Виконано

Дата видачі завдання 22 листопада 2024 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Омаров М.А.
(посада, прізвище, ініціали)

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

"20" січня 2025р.

Чернов К.А

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 71 с., 28 рис., 1 табл., 2 дод., 24 джерела.

3D-ДРУК, 3D-ПРИНТЕРИ, ДОСЛІДЖЕННЯ, МІЦНІСТЬ, СЛАЙСЕР, ТЕХНОЛОГІЯ, FFF/FDM.

Об'єкт дослідження – процес 3D-прототипування.

Предмет дослідження – технологія автоматизованого аналізу зображень для виявлення дефектів у готових 3D-друкованих деталях.

Мета дослідження – побудова моделі впливу параметрів друку деталей на міцність виробів.

Проведено аналіз видів технологій 3D-друку та властивості існуючих матеріалів для 3D-друку, досліджено інтерфейс, параметри та можливості програми-слайсера для підготовки 3D-моделі до друку, а також визначені параметри які впливають на міцність друкованої деталі за технологією FFF/FDM.

В результаті на основі виконаного аналізу, було обрано технологію та матеріали, які будуть використовуватися для виготовлення дослідних зразків для подальшого дослідження.

Результати кваліфікаційної роботи апробовані у тезах фахової наукової конференції.

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: 71 pages, 28 pic., 1 table, 2 app., 24 sources.

3D PRINTING, 3D PRINTERS, FFF/FDM, TECHNOLOGY, RESEARCH, SLICER, STRENGTH.

The object of the study is the 3D printing process.

The subject of the study is the technology of automated image analysis for detecting defects in finished 3D printed parts.

The purpose of the study is to build a model of the influence of printing parameters of parts on the strength of products.

An analysis of types of 3D printing technologies and properties of existing materials for 3D printing was conducted, the interface, parameters and capabilities of the slicer program for preparing a 3D model for printing were studied, and the parameters that affect the strength of a printed part using FFF/FDM technology were determined.

As a result, based on the analysis performed, the technology and materials that will be used to manufacture prototypes for further research were selected.

The results of the qualification work were tested in the abstracts of a faculty scientific conference.

The results of the work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 "Industry, Innovation and Infrastructure", in particular to point 9.4 "Development of high-tech mechanical engineering".

ЗМІСТ

Перелік скорочень	8
Вступ	9
1 Аналіз предметної області.....	11
1.1 Види 3D-друку.....	11
1.1.1 SLA-друк.....	11
1.1.2 SLS-друк.....	13
1.1.3 DLP-друк.....	16
1.1.4 MJF-друк.....	17
1.1.5 EBM-друк.....	18
1.2 FDM друк.....	19
1.3 Матеріали FMD 3Д друку.....	21
1.4 Кінематики FDM 3Д принтерів.....	24
1.5 Підготовка моделі.....	27
1.6 Висновки до першого розділу.....	30
2 Виготовлення моделі та план тестування.....	32
2.1 Структура макету.....	32
2.2 Комплектуючі для макету.....	33
2.3 3Д модель.....	36
2.4 Опис тестового зразка.....	38
3 Проведення експерименту.....	40
4 Статистичний аналіз результатів.....	46
5 Охорона праці.....	52
Висновки.....	56
Перелік джерел посилання.....	58
Додаток А Результати експерименту та розрахунки.....	61
Додаток Б Апробація наукових результатів дослідження.....	63

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

КІТАР – комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки;

ПЗ – програмне забезпечення;

ТЗ – технічне завдання;

ХНУРЕ – Харківський національний університет радіоелектроніки;

ASA – Acrylonitrile Styrene Acrylate;

CoPET – Copolyester;

DLP – Digital Light Processing;

DPI – Dots Per Inch;

EBM – Electron Beam Melting;

FDM – Fused Deposition Modeling;

FFF – Fused Filament Fabrication;

GND – Ground (заземлення, нульовий потенціал);

LED – Light Emitting Diode;

MJF – Multi Jet Fusion;

PC – Polycarbonate;

PET – Polyethylene Terephthalate;

PETG – Polyethylene Terephthalate Glycol-modified;

PLA – Polylactic Acid;

SLA – Stereolithography;

SLS – Selective Laser Sintering;

TPU – Thermoplastic Polyurethane;

USB – Universal Serial Bus;

VCC – Voltage Common Collector;

ВСТУП

На всіх етапах 3D-друку виконуються операції налаштування параметрів друку, контролю якості виготовлених деталей та аналізу впливу різних параметрів на їх механічні властивості. Для досягнення оптимальної якості та міцності виробів важливо правильно підібрати параметри, такі як кількість стінок, щільність заповнення, температура екструзії та швидкість друку. Недоліки у налаштуваннях можуть призводити до появи дефектів, таких як недостатня адгезія між шарами, деформація або знижена міцність деталей.

Контроль параметрів та якісне налаштування обладнання забезпечують підвищення ефективності процесу 3D-друку, що особливо важливо для виготовлення елементів із високими вимогами до механічних характеристик. Виявлення й усунення недоліків у процесі друку дозволяє не лише підвищити якість деталей, але й знизити витрати матеріалів і часу.

Метою цього дослідження є вивчення впливу параметрів 3D-друку на міцність деталей, виготовлених методом FDM/FFF, з метою оптимізації процесу друку для створення продукції з високими механічними характеристиками.

Об'єктом дослідження є технологічний процес 3D-друку методом FDM/FFF.

Предметом дослідження є вплив параметрів друку на механічні властивості деталей.

Методи дослідження – метод математичного моделювання для аналізу залежностей між параметрами друку та міцністю деталей, експериментальні дослідження для перевірки гіпотез, методи статистичної обробки даних для оцінки отриманих результатів.

Для вирішення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз впливу основних параметрів 3D-друку на якість та міцність деталей;

- виготовити серію тестових деталей з різними комбінаціями параметрів друку;
- провести експериментальні дослідження міцності виготовлених деталей;
- здійснити аналіз отриманих результатів та виявити оптимальні параметри друку;
- розглянути питання охорони праці при роботі з 3D-принтерами;
- оформити пояснювальну записку відповідно до чинних стандартів [1-3].

За результатами виконаного дослідження передбачається представлення результатів на наукових конференціях. Збірник студентських наукових статей «Автоматизація та приладобудування» «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2024 (Випуск 2) [4].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Види 3D-друку

Існує безліч різних видів 3D-друку, кожен з яких відрізняється технологією виготовлення і матеріалами, що дозволяє застосовувати їх для широкого спектра цілей – від прототипування до створення кінцевих деталей у промисловості. Одним з найпопулярніших методів 3D-друку є FDM, тому ми розглянемо його в окремому розділі, а поки проаналізуємо менш популярні методи.

1.1.1 SLA-друк

SLA-друк (стереолітографія) є популярною технологією 3D-друку [6], яка використовує рідкі фотополімерні смоли для створення високоточних та деталізованих об'єктів. У цьому процесі світлове джерело, зазвичай лазер або проєктор, полімеризує рідку смолу, перетворюючи її на твердий пластик шар за шаром. SLA-технологія забезпечує високу швидкість друку, точність і гладкість поверхонь, що робить її ідеальною для виготовлення прототипів, кінцевих виробів та виробничих інструментів.

Основна перевага SLA-друку полягає в широкому асортименті матеріалів, які можуть бути використані для різних механічних, оптичних і термічних властивостей. Це дозволяє створювати деталі з характеристиками, схожими на традиційні термопласти. Після завершення друку вироби потребують додаткової обробки, такої як промивання у спирті для видалення залишків смоли, та постобробки, яка включає фінальну полімеризацію для закріплення властивостей матеріалу.

SLA-друк активно використовується у різних галузях для створення кінцевих продуктів, заміни деталей, виробничих інструментів та прототипів.

Схема на рисунку 1.1 демонструє компоненти SLA 3D-принтера.

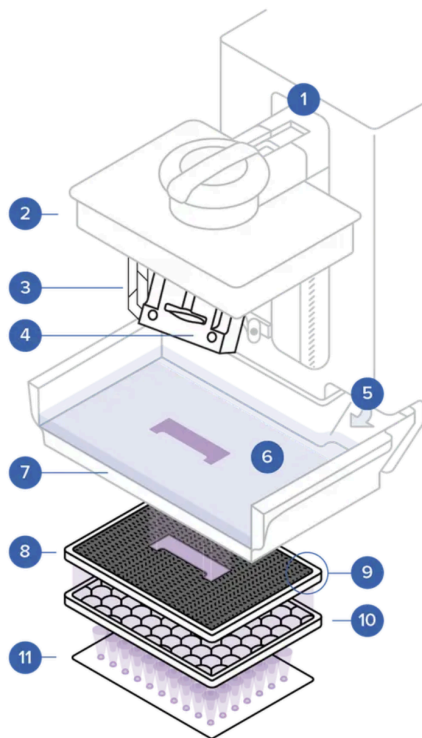


Рисунок 1.1 – Компоненти SLA 3D-принтера

На рисунку 1.1 зображені такі компоненти, що відповідають цифрам:

1 – шість систем керування – системи, що забезпечують точний контроль над процесом друку, керуючи рухами платформи, потоком смоли та іншими аспектами;

2 – будівельна платформа – платформа, на якій поступово формується друкована деталь під час процесу друку;

3 – підтримки – допоміжні структури, які додаються для підтримки нависаючих частин моделі під час друку та знімаються після завершення процесу;

4 – друкована деталь – кінцевий результат процесу 3D-друку, виріб, який створюється шар за шаром зі смоли;

5 – система автоматичної подачі смоли – автоматизована система, що забезпечує подачу фотополімерної смоли у ванну принтера;

6 – смола – рідкий фотополімер, який полімеризується під впливом світла і перетворюється в твердий пластик;

7 – ванна з гнучкою плівкою – резервуар зі спеціальною плівкою, що вміщує смолу і дозволяє легко відокремлювати надруковані шари від поверхні під час підняття платформи;

8 – світлова обробна установка – джерело світла, яке ініціює полімеризацію смоли для формування твердих шарів;

9 – текстура для відокремлення – поверхня або шар, що допомагає легко відокремлювати новостворені шари від плівки під час друку;

10 – колімувальні лінзи – лінзи, які фокусують світло на точні ділянки, забезпечуючи високу точність і деталізацію друку;

11 – світлодіоди (LED) – джерело світла, яке випромінює світлові хвилі необхідної довжини для ініціації полімеризації смоли.

1.1.2 SLS-друк

SLS (Selective Laser Sintering) – це адитивний метод виробництва, який передбачає використання потужного лазера (зазвичай це вуглекислий лазер), щоб спікати дрібні частинки пластику, металу, кераміки або скла в масу, що утворює тривимірну деталь [7].

Лазер вибірково спікає порошковий матеріал шляхом сканування перетинів, згенерованих з 3D-цифрового опису деталі (наприклад, з CAD-файлу або даних сканування), на поверхні порошкового шару. Після кожного сканування перетину, шар порошку знижується на одну товщину шару, на верх накладається новий шар матеріалу, і процес повторюється, поки деталь не буде завершена.

Однією з ключових особливостей SLS є те, що щільність готової деталі залежить від пікової потужності лазера, а не від тривалості його роботи. Тому в

SLS машинах зазвичай використовується імпульсний лазер. Машина також підігріває порошковий матеріал у ліжку до температури трохи нижче точки плавлення, що полегшує лазеру доведення температури вибраних ділянок до точки плавлення.

На рисунку 1.2 представлено схематичне пояснення процесу роботи лазерного 3D-друку методом селективного лазерного спікання (SLS). А саме:

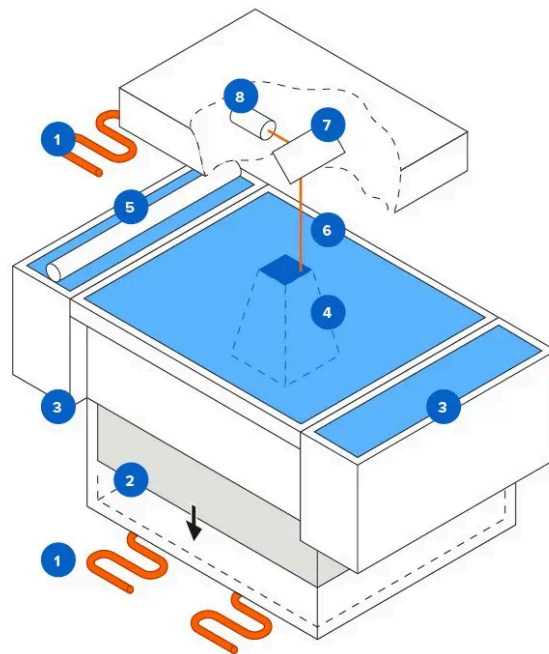


Рисунок 1.2 – Компоненти SLS 3D-принтера

- 1 – обігрівачі – забезпечують рівномірний нагрів робочої камери;
- 2 – робоча камера – місце, де формується модель;
- 3 – система подачі порошку – розподіляє матеріал на робочій поверхні;
- 4 – друкована деталь – кінцевий результат, що утворюється в процесі друку;
- 5 – рекутер – пристрій, який вирівнює шар порошку перед наступним циклом лазерної обробки;
- 6 – лазерний промінь – виконує спікання порошку згідно з моделлю;

7 – дзеркало сканування по осях X-Y – відбиває лазерний промінь у потрібному напрямку;

8 – лазер – джерело випромінювання, яке спікає частинки порошку, формуючи тверді шари деталей.

На відміну від SLA, де часто необхідно використовувати допоміжні структури для виготовлення виступаючих частин, SLS не потребує окремого подавача для підтримки, оскільки деталь завжди оточена несфіксованим порошком. Це дозволяє створювати раніше неможливі геометричні форми. Окрім того, технологія дозволяє виготовляти кілька деталей одночасно, використовуючи техніку Nesting, де декілька об'єктів можуть бути розташовані в межах одного об'єму машини.

Однак, через характер процесу SLS, неможливо виготовити повністю закритий, порожнистий об'єкт, оскільки залишковий порошок всередині не можна буде видалити. Незважаючи на доступність домашніх принтерів після закінчення патентів, процес нагрівання залишається викликом, оскільки він вимагає потужності до 5 кВт і контролю температури з точністю до 2 °C на кожному етапі – попередньому нагріванні, плавленні та зберіганні до видалення. Схема на рисунку 1.3 демонструє компоненти SLS 3D-принтера.

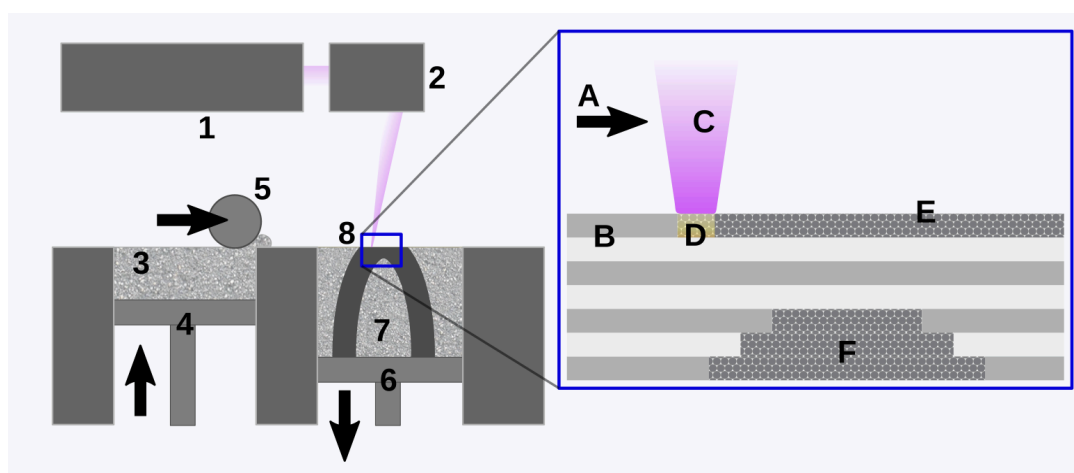


Рисунок 1.3 – Компоненти SLS 3D-принтера

На схемі зображено:

1 – лазер, 2 – скануюча система, 3 – система подачі порошку, 4 – поршень для подачі порошку, 5 – ролик для розподілу порошку, 6 – поршень для виготовлення, 7 – порошковий шар для виготовлення, 8 – об'єкт, що виготовляється.

Умовні позначення:

- А: напрямок сканування лазера;
- В: спечені частинки порошку;
- С: лазерний промінь;
- D: місце лазерного спікання;
- Е: попередньо нанесений порошковий шар;
- F: нескрісований матеріал у попередніх шарах.

1.1.3 DLP-друк

DLP (Digital Light Processing) – це ще одна техніка полімеризації у ванні[8], яка дуже схожа на SLA (стереолітографію) (рис. 1.4), але з однією ключовою відмінністю: замість використання скануючого лазерного променя для затвердіння шару смоли, проектується цифрова маска для створення візерунку.

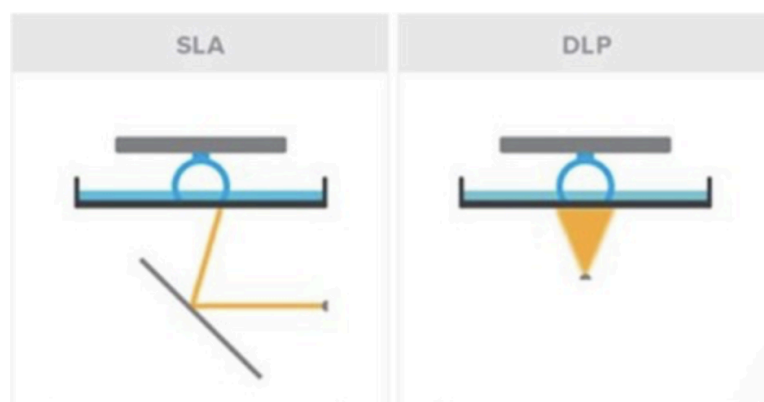


Рисунок 1.4 – Порівняння SLA та DLP

Роздільну здатність SLA можна визначити за розміром плями, створеної лазером. Оскільки DLP використовує проєктоване цифрове зображення, розмір пікселя є ключовою характеристикою його роздільної здатності.

Технічно, DLP здатна друкувати об'єкти швидше, ніж SLA, оскільки кожен шар освітлюється повністю і одночасно за допомогою проєктованого зображення, а не сканується лазером покровоно. Це є перевагою при одночасному друку кількох великих компактних об'єктів з невеликою деталізацією. Проте, при друку дрібних деталей необхідно використовувати проєкційну лінзу, яка фокусує світло на певних ділянках платформи, щоб зберегти роздільну здатність друку. З іншого боку, SLA загалом може досягати вищої роздільної здатності та кращої якості поверхні, ніж DLP.

Технологія DLP, завдяки своїм характеристикам, дозволяє зменшити час друку і оптимізувати його для об'єктів з меншою деталізацією, роблячи її ідеальним вибором для швидкого виробництва більших деталей.

1.1.4 MJF-друк

MJF (Multi Jet Fusion) це новий метод 3D-друку [9-11], розроблений компанією HP, який використовує кілька струменевих головок для нанесення хімічних агентів на полімерний порошок, після чого порошок спікається за допомогою тепла (рис. 1.5).

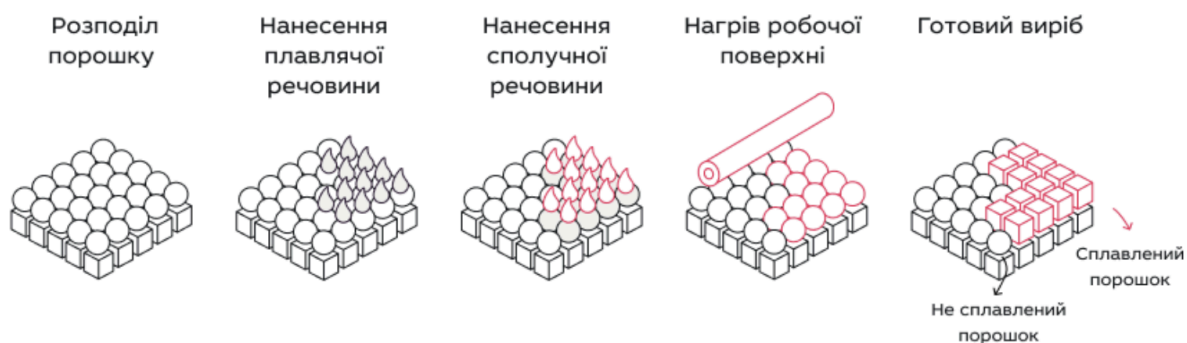


Рисунок 1.5 – Процес MJF друку

Перевагами цього методу є швидкість – MJF значно перевершує багато інших 3D-друкованих технологій за швидкістю виготовлення деталей будь-якої складності. Це робить її відмінним варіантом як для швидкого прототипування, так і для масового виробництва. А також висока роздільна здатність – завдяки струменевій технології можна отримати деталі з гладкою поверхнею і чіткими елементами з роздільною здатністю до 1200 DPI і товщиною шару 80 мкм. Це дозволяє MJF використовувати для друку виробів з дрібними елементами, а також складних геометричних конструкцій без додаткових підтримок – таких як деталі в деталях, ланцюги або порожнисті форми. З недоліків можна виділити високу вартість обладнання.

1.1.5 EBM-друк

EBM (Electron Beam Melting) – це процес адитивного виробництва, в якому порошковий метал плавиться за допомогою високоефективного потоку електронів. Електронний промінь створює потік електронів, що керується магнітним полем, розплавляючи шар за шаром металевий порошок для створення об'єкта, який точно відповідає специфікаціям CAD-моделі. Виробництво відбувається у вакуумній камері, щоб захистити матеріал від окислення, яке може погіршити властивості реактивних матеріалів.

EBM є схожим на технологію селективного лазерного плавлення (SLM), оскільки обидві використовують порошок у порошковому ліжку принтера, однак EBM використовує електронний промінь замість лазера.

EBM дозволяє створювати високоякісні та міцні деталі [12], що використовують всі властивості металів, завдяки видаленню домішок, які можуть накопичуватися при використанні інших методів виробництва, таких як лиття. Цю технологію активно застосовують у виробництві компонентів для аерокосмічної, автомобільної, оборонної, нафтохімічної та медичної галузей.

Технологія електронно-променевого плавлення є запатентованою, і робота з EBM-принтерами потребує кваліфікованих фахівців. Хоча EBM може бути

значно швидшим за селективне лазерне плавлення (SLM), останнє забезпечує більш гладку поверхню та точніші деталі.

1.2 FDM друк

Одним з найпопулярніших методів 3D-друку є FDM [13]. Моделювання методом пошарового наплавлення (англ. fused deposition modeling, FDM) – адитивна технологія, що широко використовується при створенні тривимірних моделей, при прототипуванні та в промисловому виробництві. Технологія FDM це створення тривимірних об'єктів за рахунок нанесення послідовних шарів матеріалу, що повторюють контури цифрової моделі. Як правило, матеріалами для друку виступають термопластики, що постачаються у вигляді катушок ниток або прутків. Технологія FDM була розроблена С. Скоттом Крапом наприкінці 1980-х років і вийшла на комерційний ринок у 1990 році [14]. Оригінальний термін Fused Deposition Modeling і аббревіатура FDM є торговими марками компанії Stratasys. Ентузіасти 3D-друку, учасники проекту RepRap, вигадали аналогічний термін "fused filament fabrication" ("виробництво способом наплавлення ниток"), або FFF, для використання в обхід юридичних обмежень. Терміни FDM і FFF рівнозначні за змістом та призначенням. Тож FDM/FFF – це один із найпоширеніших методів 3D-друку, при якому об'єкт створюється шляхом екструзії розплавленого термопластичного матеріалу через сопло. Матеріал подається у вигляді нитки (філаменту), яка розплавляється і наноситься шар за шаром на платформу. Переваги: відносно низька вартість, простота експлуатації, велика різноманітність матеріалів. Недоліки: відносно невисока точність у порівнянні з іншими методами, обмеження по складності поверхонь та якості фінішної обробки.

У цій роботі ми розглянемо FDM друк так як він є доступним і широко розповсюдженим методом 3D друку, що дозволяє легко налаштовувати параметри друку та проводити експерименти з різними матеріалами. FDM

забезпечує достатню міцність і точність для створення функціональних деталей, що є важливим для наших досліджень впливу параметрів друку на механічні властивості частин для робототехнічних систем. Крім того, ця технологія дозволяє швидко і економічно виготовляти прототипи, що значно спрощує процес проведення експериментів.

Виробничий цикл (рис. 1.6) починається з обробки тривимірної цифрової моделі.

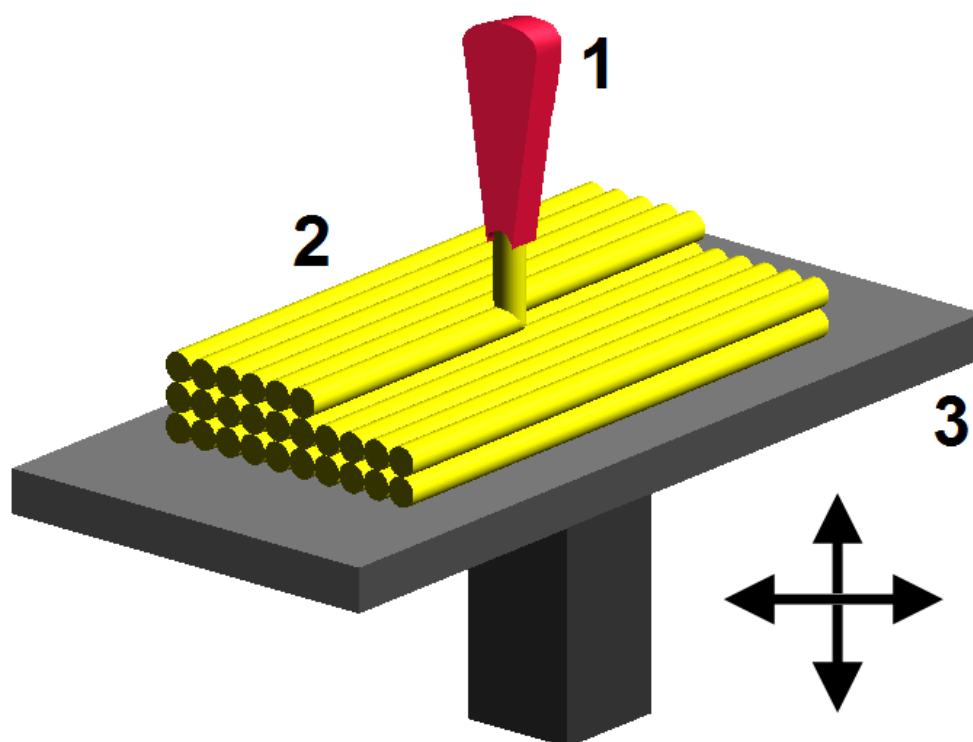


Рисунок 1.6 – Екструдер (1) переміщається у горизонтальній та вертикальній площинах та створює модель шар за шаром (2) на платформі (3)

Модель у форматі STL ділиться на шари та орієнтується найбільш підходящим чином для друку. Процес підготовки моделі для друку називається slicing, в результаті якого генерується G-code [15]. У ньому закладаються всі параметри друку, переміщення екструдера, при необхідності генеруються підтримуючі структури, необхідні друку нависаючих елементів.

Деякі пристрої дають змогу використовувати різні матеріали під час одного виробничого циклу. Наприклад, можлива друк моделі з одного матеріалу з печаткою опор з іншого легкорозчинного матеріалу, що дозволяє з легкістю видаляти підтримуючі структури після завершення процесу друку. Альтернативно, можливий друк різними кольорами одного і того ж виду пластику при створенні єдиної моделі. Після підготовки моделі та генерації G-code, виробничий цикл переходить до фази фізичного друку. Процес FDM-друку відбувається шляхом екструзії термопластичного матеріалу через гарячий екструдер, який розплавляє пластик і наносить його шар за шаром на робочу платформу. Кожен шар охолоджується і твердне, після чого наноситься наступний, забезпечуючи таким чином надійне з'єднання між шарами. Важливим аспектом FDM є те, що параметри друку, такі як швидкість друку, температура екструдера та платформи, висота шару і спосіб заповнення, впливають на кінцеву якість і міцність деталей. У нашому дослідженні ці параметри будуть варіюватися для оцінки їх впливу на механічні характеристики надрукованих деталей, що особливо актуально для створення елементів робототехнічних систем, де необхідна висока міцність і надійність конструкцій.

1.3 Матеріали FMD 3Д друку

PLA є одним з найпоширеніших матеріалів для FDM-друку завдяки легкості друку, екологічності та доступності. Він біорозкладний і не виділяє токсичних речовин при нагріванні, що робить його популярним для домашнього та освітнього використання. Однак PLA має обмежену стійкість до високих температур і механічного навантаження, що обмежує його застосування у більш вимогливих середовищах.

ABS – це міцний та термостійкий матеріал, який часто використовується для створення функціональних прототипів та компонентів. Він добре підходить

для виготовлення механічних деталей, оскільки має високу стійкість до ударів. Проте друк ABS може супроводжуватись виділенням шкідливих парів, тому його рекомендують використовувати в добре вентильованих приміщеннях.

PETG, або модифікований PET, є прозорим і нетоксичним матеріалом, що забезпечує баланс між гнучкістю та міцністю. Він стійкий до впливу хімічних речовин і вологи, тому підходить для створення деталей, що контактують з водою або іншими рідинами. PETG популярний у харчовій промисловості та для виготовлення медичних виробів.

TPU – це гнучкий матеріал, що має високу стійкість до зносу. Він підходить для друку деталей, яким потрібна еластичність, наприклад, захисних накладок, ущільнень, шлангів та різних амортизаторів. Однак друк TPU може бути більш складним через його м'якість та еластичність.

Nylon – це високоміцний і гнучкий матеріал, стійкий до впливу хімічних речовин і високих температур. Його часто використовують для створення механічних компонентів, які повинні витримувати значні навантаження. Водночас, Nylon має тенденцію до поглинання вологи з повітря, що може впливати на якість друку та потребує спеціального зберігання.

ASA є альтернативою ABS з покращеною стійкістю до ультрафіолетового випромінювання, що робить його підходящим для зовнішніх застосувань. Він має високу стійкість до погодних умов і добре підходить для створення деталей, які будуть використовуватись на відкритому повітрі.

Полікарбонат (PC) є надзвичайно міцним матеріалом, який витримує високі температури і має високу ударостійкість. Однак, друк полікарбонатом вимагає високих температур і спеціальних умов, що обмежує його використання[16-17].

В цій роботі фокус буде зроблено на матеріал для друку CoPET. Він також є популярним матеріалом для FDM 3D друку. Він схожий на PETG, але має деякі відмінні властивості, які роблять його корисним для промислових застосувань.

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик матеріалів для друку

Матеріал	Температура друку (°C)	Температура платформи (°C)	Механічна міцність	Гнучкість	Стійкість до вологи	Складність друку
PLA	180-220	20-60	Висока	Низька	Низька	Низька
ABS	220-250	80-110	Висока	Середня	Середня	Середня
PETG	220-240	70-90	Висока	Середня	Висока	Середня
TPU	200-230	20-60	Середня	Висока	Висока	Середня
Nylon	240-260	80-100	Дуже висока	Висока	Дуже висока	Висока
ASA	230-260	80-100	Висока	Середня	Середня	Середня
PC	250-300	100-120	Дуже висока	Низька	Низька	Висока
CoPET	235-260	70-90	Висока	Низька	Висока	Середня

Серед переваг CoPET можна виділити такі характеристики CoPET:

- висока прозорість. CoPET є прозорим, що дозволяє створювати естетично привабливі вироби з високою оптичною якістю;
- нетоксичність. Цей матеріал безпечний для харчових продуктів, тому часто використовується для створення упаковок для харчових продуктів, пляшок для води та медичних виробів;
- висока міцність і зносостійкість. CoPET забезпечує високу міцність, що робить його підходящим для виготовлення деталей, які піддаються постійним навантаженням. Він добре тримає форму навіть за змінних температур і механічних навантажень;
- стійкість до вологи та хімічних речовин. CoPET не вбирає вологу з повітря так інтенсивно, як інші полімери, і стійкий до багатьох хімічних речовин, що збільшує його надійність та довговічність у різних умовах.

Завдяки своїм властивостям CoPET часто використовують у промисловості для виготовлення міцних, прозорих та безпечних деталей. Це

також підходящий матеріал для виробництва виробів, які потребують високої точності та стабільності, таких як медичні інструменти або деталі для пакувальної промисловості. У вашому дослідженні CoPET виділяється як матеріал для тестування, оскільки його характеристики дозволяють досягти балансу між міцністю, екологічністю та безпекою для здоров'я.

1.4 Кінематики FDM 3D принтерів

Кінематика є ключовим аспектом конструкції 3D-принтерів [18-19], який визначає, як саме рухаються друкуючі вузли та платформа під час роботи пристрою. Саме від кінематики залежить точність, швидкість і стабільність друку, а також можливості обладнання для створення складних моделей. У випадку FDM 3D-принтерів (Fused Deposition Modeling), які працюють за принципом пошарового нанесення розплавленого пластику, кінематика визначає, як буде реалізовано переміщення екструдера та робочої платформи для створення виробу.

У цьому розділі розглянуто основні види кінематики FDM 3D-принтерів, їхні принципи роботи, а також особливості, які роблять кожен тип придатним для різних сфер застосування. Це дозволяє зрозуміти, як конструкція та кінематика пристрою впливають на результат друку і як вибір тієї чи іншої системи відображається на можливостях обладнання.

Принтери з рухомим столом по осі Y, які використовують декартову систему координат, відзначаються високою точністю друку завдяки стаціонарному положенню екструдера та переміщенню платформи по осі Y. Це рішення дозволяє досягати якісного друку навіть для складних деталей. Однак конструкція потребує додаткового простору для переміщення столу, що обмежує можливість друку великих моделей у компактних умовах. Через цю особливість такі принтери зазвичай використовують для створення точних і компактних

деталей. Вони однаково добре підходять як для домашнього використання, так і для професійних завдань, де важливі висока точність і деталізація.

Консольні одностійкові принтери, або принтери з одною вертикальною опорою, характеризуються компактністю й простотою конструкції. Вони ідеально підходять для настільного використання та невеликих моделей. Основна перевага цього типу принтерів – їхня зручність і мобільність, що дозволяє використовувати їх у будь-якому обмеженому просторі. Однак через одну стійку цей тип принтерів може втрачати стабільність при друку великих або важких деталей на високих швидкостях, що обмежує їх застосування в професійних проєктах. Попри це, вони залишаються популярними для домашнього друку, створення прототипів невеликого розміру та простих навчальних завдань. Завдяки своїй простоті, такі принтери ідеальні для початківців, які тільки знайомляться з технологіями 3D-друку, оскільки їх легко налаштувати та використовувати навіть без глибоких технічних знань.

CoreXY (рис. 1.7) принтери мають особливу систему ременів, яка дозволяє екструдеру рухатися одночасно по осях X та Y.

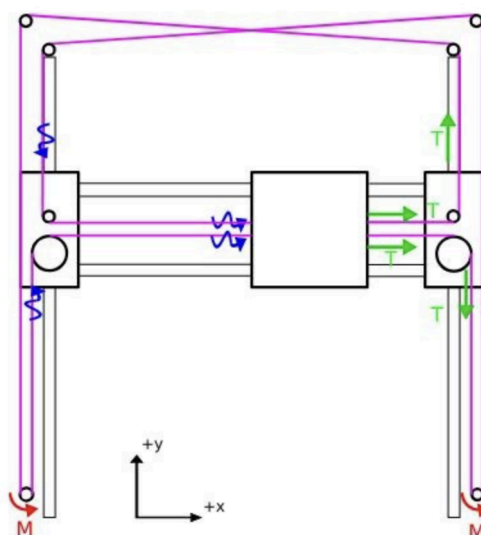


Рисунок 1.7 – Схема CoreXY принтера

Це знижує вагу рухомих частин і забезпечує високу швидкість та точність друку, що є важливим при створенні складних деталей. Водночас налаштування CoreXY принтерів є досить складним, тому вони краще підходять для досвідчених користувачів, які потребують високої точності.

Конвеєрні принтери вирізняються стрічковою платформою, яка безперервно рухається, що дозволяє друкувати об'єкти необмеженої довжини. Завдяки цьому вони ефективні для серійного виробництва, адже можуть автоматично переміщати готові об'єкти зі стрічки, звільняючи місце для нових. Такі принтери найчастіше використовуються в промислових умовах, де потрібне автоматизоване виробництво, хоча їхній кутовий друк може вимагати специфічного налаштування моделі.

Дельта-принтери (рис. 1.8) побудовані за принципом трьох вертикальних стійок, що формують трикутник, і керують екструдером через троси або ремені. Це дозволяє швидко друкувати високі, симетричні моделі з гарною якістю, але обмежує робочу площу, що ускладнює друк великих і плоских об'єктів. Дельта-принтери часто обирають для друку високих деталей, де важлива швидкість та стабільність.

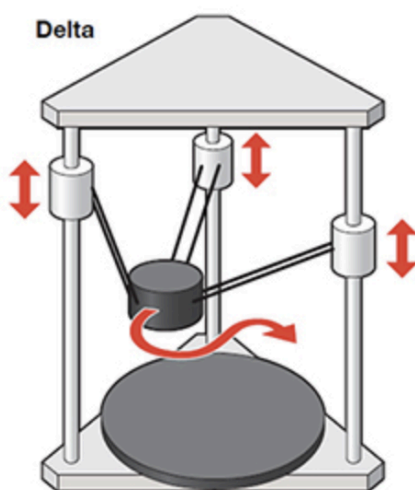


Рисунок 1.8 – Схема Дельта принтера

Отже, різні типи 3D-принтерів відповідають конкретним потребам. Принтери з рухомим столом ідеальні для невеликих і точних виробів, консольні підходять для компактних моделей, CoreXY дають високу точність для складних задач, конвеєрні пристрої забезпечують безперервне виробництво, а дельта-принтери спеціалізуються на друку високих і симетричних об'єктів.

1.5 Підготовка моделі

Підготовка моделі для 3D-друку – важливий етап, що забезпечує якість і точність кінцевого виробу. Цей процес включає кілька кроків: створення макету, нарізання моделі на шари, налаштування параметрів друку та конвертацію файлу в формат G-коду, зрозумілого для 3D-принтера.

Процес підготовки починається з розробки 3D-моделі, яка може бути створена в спеціалізованих програмах для 3D-моделювання, як-от Autodesk Fusion 360, Tinkercad або Blender. Модель розробляється з урахуванням розмірів, деталей та інших особливостей, які мають бути збережені під час друку. Інші варіанти включають завантаження готових моделей з інтернет-ресурсів, таких як Thingiverse або MyMiniFactory.

Після завершення створення 3D-моделі її необхідно підготувати до друку, що включає важливий етап нарізання моделі на шари. Ці шари являють собою горизонтальні перерізи моделі, кожен з яких має певну товщину, що визначається налаштуваннями друку. Саме нарізання є ключовим процесом, який перетворює тривимірний об'єкт у зрозумілу для принтера інструкцію, де зазначається, як екструдер має рухатися для пошарового створення деталі.

Процес нарізання виконується за допомогою спеціалізованих програм, відомих як "слайсери". Вони аналізують геометрію моделі, оптимізують її структуру для друку та генерують G-код – набір команд, що управляє роботою принтера.

До популярних слайсерів належать Ultimaker Cura (рис. 1.9), PrusaSlicer та Simplify3D. Кожна з цих програм пропонує широкий набір інструментів для точного налаштування параметрів друку, таких як товщина шару, швидкість друку, заповнення, кількість зовнішніх стінок, тип підтримки для навислих частин тощо.

Окрім основної функції розрізання моделі, слайсери також забезпечують візуалізацію процесу друку, дозволяючи користувачеві переглядати кожен шар і оцінювати, як саме принтер буде створювати об'єкт. Це особливо важливо для складних моделей, де необхідно враховувати підтримки, правильне орієнтування та оптимізацію часу друку. Завдяки використанню слайсерів забезпечується висока якість друку, ефективність витрати матеріалів та можливість налаштування моделі під специфіку конкретного принтера.

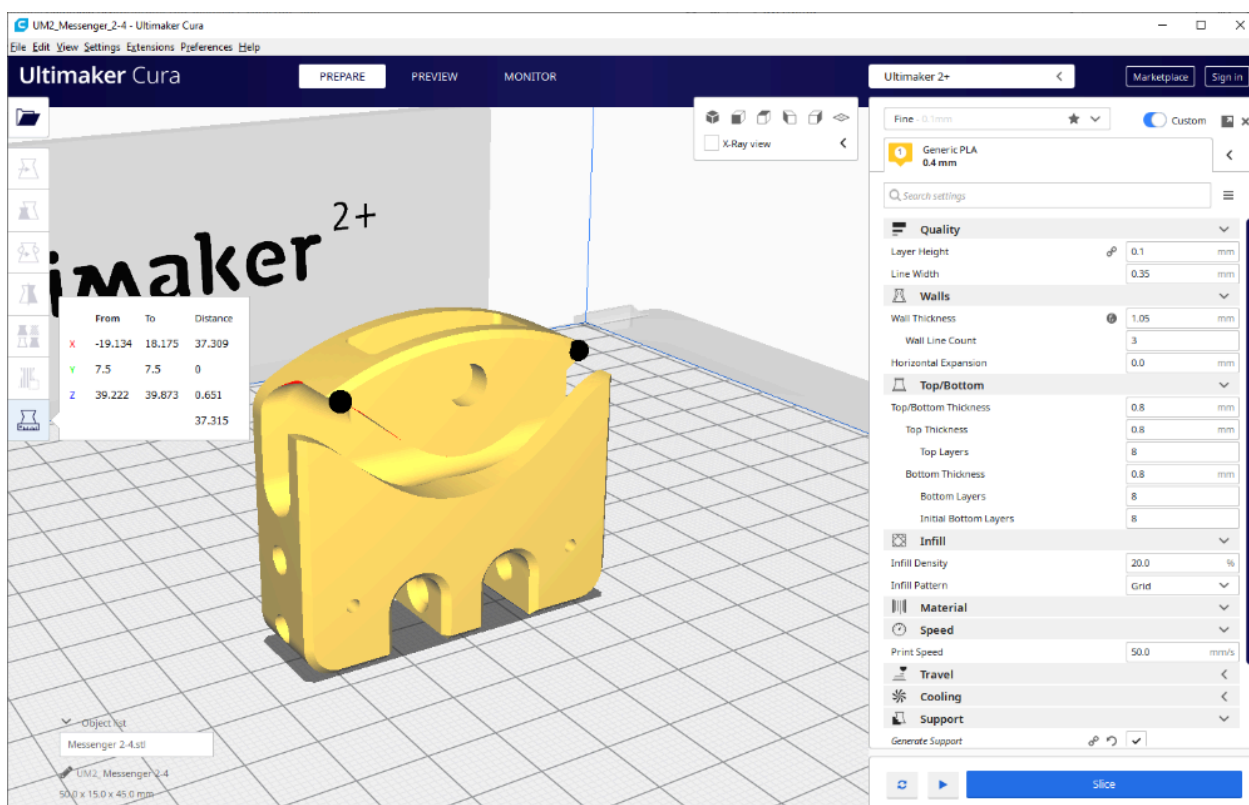
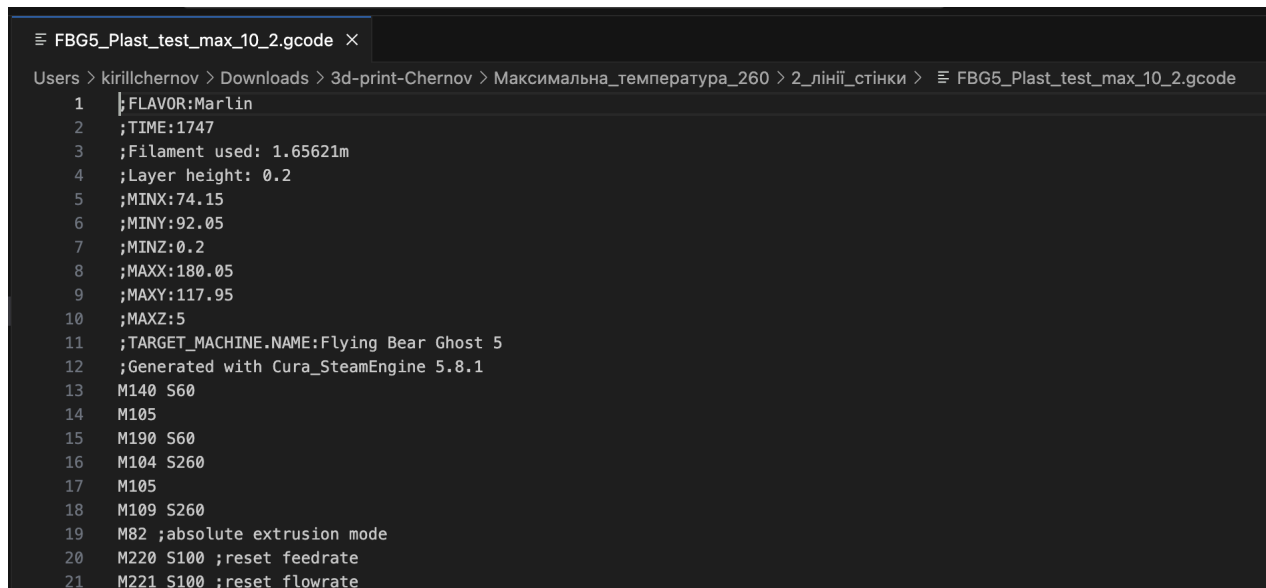


Рисунок 1.9 – Інтерфейс вибору параметрів для друку в Ultimaker Cura

Слайсери перетворюють модель у набір команд, де кожен шар включає інструкції для принтера щодо швидкості, напрямку, параметрів екструзії та інших налаштувань. Прикладом важливих параметрів, які визначаються на цьому етапі можуть бути: Товщина шару – впливає на якість поверхні та швидкість друку. Заповнення – визначає щільність внутрішньої структури моделі. Швидкість друку – параметр, що впливає на час друку та точність.

Далі встановлюються параметри, які впливають на механічні властивості та зовнішній вигляд деталі. Залежно від вимог до міцності та якості, налаштовується заповнення, кількість зовнішніх стінок, тип підтримок, які будуть утримувати навислі елементи під час друку, і тип підкладки (якщо потрібна стабільність першого шару).

Після визначення параметрів друку слайсер створює G-код (рис. 1.10) інструкції, які керують рухом екструдера та платформою принтера під час друку.



```
FBG5_Plast_test_max_10_2.gcode X
Users > kirillchernov > Downloads > 3d-print-Chernov > Максимальна_температура_260 > 2_лінії_стінки > FBG5_Plast_test_max_10_2.gcode
1 | ;FLAVOR:Marlin
2 | ;TIME:1747
3 | ;Filament used: 1.65621m
4 | ;Layer height: 0.2
5 | ;MINX:74.15
6 | ;MINY:92.05
7 | ;MINZ:0.2
8 | ;MAXX:180.05
9 | ;MAXY:117.95
10 | ;MAXZ:5
11 | ;TARGET_MACHINE.NAME:Flying Bear Ghost 5
12 | ;Generated with Cura_SteamEngine 5.8.1
13 | M140 S60
14 | M105
15 | M190 S60
16 | M104 S260
17 | M105
18 | M109 S260
19 | M82 ;absolute extrusion mode
20 | M220 S100 ;reset feedrate
21 | M221 S100 ;reset flowrate
```

Рисунок 1.10 – Приклад G-коду

G-код містить всі команди для принтера: від позиціонування та екструзії матеріалу до налаштування температури. Файл G-коду завантажується на

3D-принтер (через карту пам'яті, USB або Wi-Fi, залежно від моделі принтера), і після перевірки параметрів можна розпочинати друк.

Цей етап є вирішальним, оскільки саме G-код відповідає за точність друку і відображає всі налаштування, встановлені під час слайсингу. Правильно налаштовані параметри та точний G-код гарантують, що друкована модель відповідатиме задуму дизайнера.

1.6 Висновки до першого розділу

У результаті аналізу предметної області стало очевидним, що якість та характеристики друкованих деталей залежать від багатьох факторів. Серед них особливе значення мають вибір технології 3D-друку, кінематика принтера, тип і властивості матеріалу для друку, а також налаштування параметрів друку. Кожен із цих аспектів має прямий вплив на кінцеві механічні, фізичні та естетичні властивості надрукованого об'єкта, визначаючи його міцність, довговічність і функціональність.

Різноманіття можливих варіацій у цих параметрах створює значні можливості для оптимізації друкованих деталей, але водночас ускладнює аналіз їхнього впливу. Зважаючи на це, у даній роботі було прийнято рішення звузити область дослідження, зосередившись на технології FDM-друку із застосуванням пластику CoPET. Цей матеріал обраний завдяки його високим механічним характеристикам, стійкості до впливу зовнішніх факторів і популярності у виробництві функціональних деталей.

Особливу увагу у дослідженні буде приділено вивченню таких ключових параметрів друку, як «Кількість ліній стінки», «Щільність заповнення» та «Температура». Ці параметри є одними з найважливіших для забезпечення міцності та довговічності друкованих деталей, оскільки саме вони визначають внутрішню структуру об'єкта та якість його поверхні.

Такий підхід дозволить глибше зрозуміти вплив кожного з обраних параметрів на механічні властивості деталей, виготовлених із CoPET. Це має особливе значення для робототехнічних систем, де критично важливою є здатність деталей витримувати високі навантаження, залишаючись функціональними та довговічними навіть за складних умов експлуатації. Таким чином, результати дослідження сприятимуть подальшій оптимізації процесу 3D-друку для створення високоякісних деталей, що відповідають сучасним технічним вимогам.

2 ВИГОТОВЛЕННЯ МОДЕЛІ ТА ПЛАН ТЕСТУВАННЯ

2.1 Структура макету

Для тестування деталі на міцність необхідно зробити макет, на якому можна буде закріпити деталь для тестування її властивостей. На рисунку 2.1 наведена схема макету.

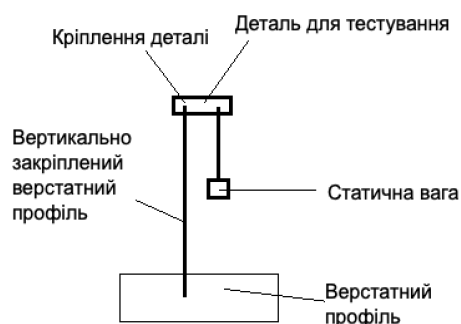


Рисунок 2.1 – Схема макету

Це схема випробувального стенда для тестування міцності надрукованих деталей. Конструкція побудована на основі вертикально закріпленого верстатного профілю. Далі будуть перераховані ключові елементи схеми.

Вертикально закріплений верстатний профіль – основа конструкції, яка утримує всі елементи. Він прикріплений до стабільної платформи або підставки внизу, забезпечуючи стійкість макета.

Кріплення деталі – елемент, який фіксує тестову деталь. Кріплення прикріплене до верстатного профілю таким чином, щоб забезпечити стабільність деталі під час випробувань.

Деталь для тестування – сама деталь, виготовлена методом 3D-друку, яка піддається випробуванням на міцність. Вона розташована в точці фіксації й призначена для витримування навантажень.

Статична вага – вантаж, який прикріплюється до тестової деталі або підвішується на неї для створення контрольованого навантаження. Вага забезпечує статичне навантаження на деталь, щоб оцінити її міцність при різних значеннях навантаження.

Цей макет дозволяє експериментально визначити механічну міцність надрукованих деталей, зокрема, здатність витримувати вагу на певній відстані від кріплення, що може бути критично важливим для розрахунку навантажень у реальних умовах використання.

2.2 Комплектуючі для макету

Для макету будемо використовувати верстатний профіль 2020 V-slot як основу для стенду. Він зроблений з алюмінієвого сплаву 6063-T5, який забезпечує міцність, легкість і стійкість до корозії. Даний сплав також відрізняється високою пластичністю та добрими механічними властивостями, що дозволяє легко обробляти профіль і створювати точні конструкції.

Завдяки своїй конструкції (рис. 2.2) V-slot профіль забезпечує зручність монтажу.



Рисунок 2.2 – Верстатний профіль 2020 V-slot

Це дозволяє використовувати стандартні кріплення та аксесуари без необхідності додаткової обробки. Це дозволяє швидко збирати каркаси та легко адаптувати конструкцію до потреб експерименту або модифікацій.

Для проведення вимірювань міцності конструкції використовується датчик тиску для Arduino від Sparkfun, який забезпечує точне визначення навантаження на тестовану деталь. Результати вимірювань виводяться на дисплей OLED 0,91 дюйма білого кольору з інтерфейсом I2C (рис. 2.3), що дозволяє оперативно відстежувати показники під час тестування.



Рисунок 2.3 – Дисплей OLED 0,91 дюйма з інтерфейсом I2C

Обробка отриманих даних виконується за допомогою мікроконтролера Arduino Pro Mini 5V (рис. 2.4), який відповідає за запис і обробку показників з датчика, а також передачу інформації на дисплей для відображення в реальному часі.

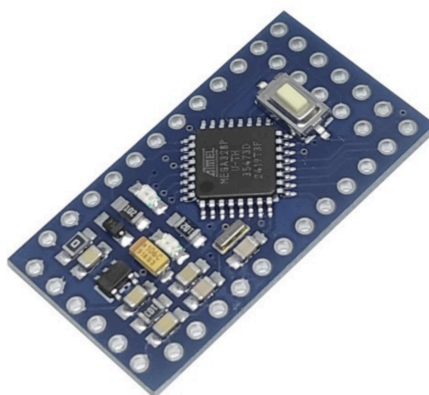


Рисунок 2.4 – Arduino Pro Mini 5V

Arduino Pro Mini 5V – це компактна і потужна плата мікроконтролера, яка широко використовується у проєктах, де потрібні невеликі розміри пристрою та ефективність. Вона базується на мікроконтролері ATmega328P і пропонує всі необхідні функції для розробки електронних систем і прототипів. Він має наступні характеристики:

Вхідна напруга: від 5В до 12 В, конектор живлення: RAW, контролер: ATmega328p, програмна пам'ять: 32 кБ, Оперативна пам'ять: 2 кБ, енергонезалежна пам'ять: 1 кБ, цифрові піни: 14 (з них 6 можуть використовуватися для ШІМ), аналогові піни: 6, частота: 16 МГц, інтерфейси: UART TTL, I2C (TWI), SPI, розмір: 33 мм x 18 мм, вага: 3,8 г.

Така система дозволяє швидко та точно вимірювати та візуалізувати результати тестування деталей на міцність.

Обробку значень напруги планується здійснювати за допомогою Датчик тиску для Arduino від Sparkfun (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Датчик тиску для Arduino від Sparkfun

Цей резистор-датчик змінює свій опір залежно від сили, що додається до нього. Чим більший тиск, тим менший опір. Без тиску опір становить понад 1 МОм. Резистор може фіксувати вагу від 100 г до 10 кг. Контакти резистора розташовані з відривом 2,54 мм друг від друга. Це дає можливість встановлювати резистор на борту дошки. Зворотний бік диска зроблено з матеріалу, який дозволяє приклеїти сенсор до поверхні.

Для кріплення деталі на стенді також потрібні закладні Т гайки (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Закладні Т гайки

У контексті FDM 3D-друку закладні Т-гайки часто використовуються для закріплення елементів каркаса принтера, кріплення рухомих частин або інтеграції додаткових елементів. Тому така деталь не буде дефіцитною.

2.3 3D модель

Для проведення дослідження було спроектовано 3D-модель стенда для перевірки міцності тестових деталей. Конструкція стенда розроблена таким чином, щоб забезпечити надійне закріплення деталі під час випробувань і створити можливість прикладення контрольованого навантаження.

Водночас при проектуванні стенда ми прагнули досягти мінімалізму в конструкції. Це дозволило зменшити витрати на виготовлення, спростити процес збирання та забезпечити зручність у використанні. Завдяки компактному дизайну стенд залишився функціональним і стабільним, зберігши всі необхідні елементи для проведення точних і повторюваних вимірювань. Мінімалізм у конструкції також забезпечив можливість легкої модифікації та адаптації стенда для інших експериментальних задач (рис. 2.7).

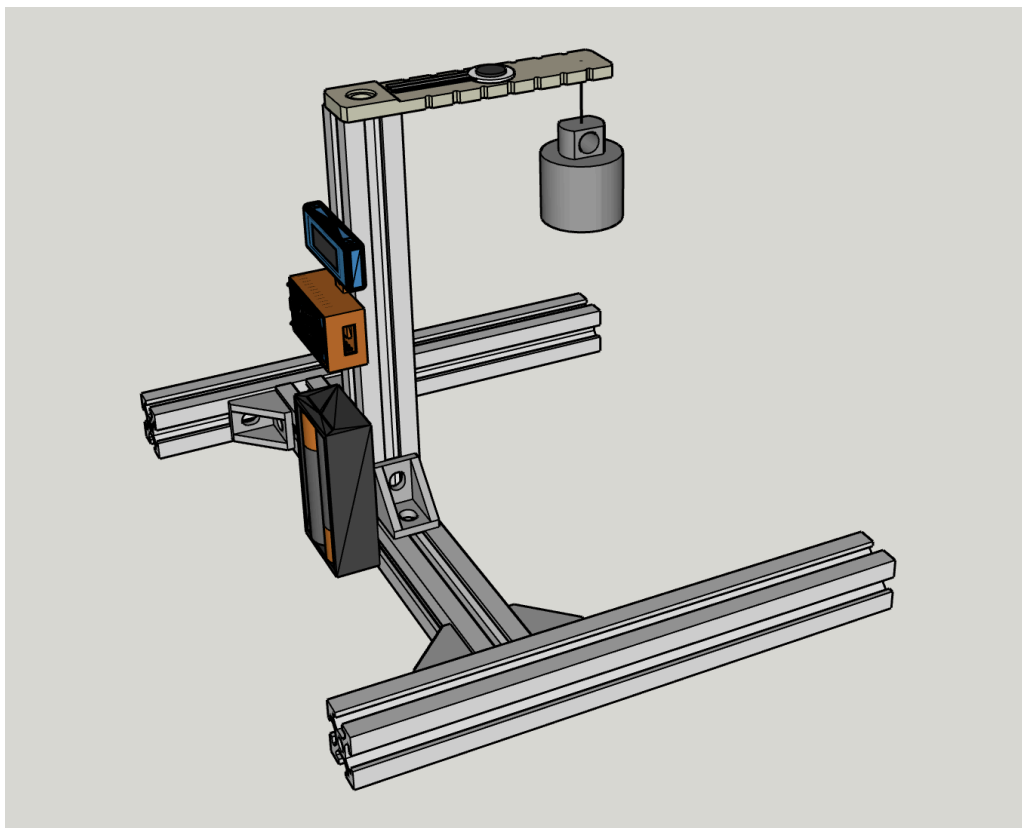


Рисунок 2.7 – 3Д модель стенда для тестування міцності

Зверху на стенд були закріплені тестові деталі, виготовлені на 3D-принтері з CoPET пластику. Кожна деталь проходила випробування, під час якого до неї кріпилася статична вага, створюючи необхідне навантаження. Міцність деталей визначалася за допомогою тензорезистора, який фіксував показники напруження та дозволяв отримувати точні дані про стійкість

матеріалу до прикладеного навантаження. Такий підхід забезпечив можливість детального аналізу кожної деталі та впливу заданих параметрів друку на їхні характеристики.

2.4 Опис тестового зразка

В якості тестового зразка було створено деталь, яка за буде закрплена до станда за допомогою отвору (рис. 2.8 та рис. 2.9).

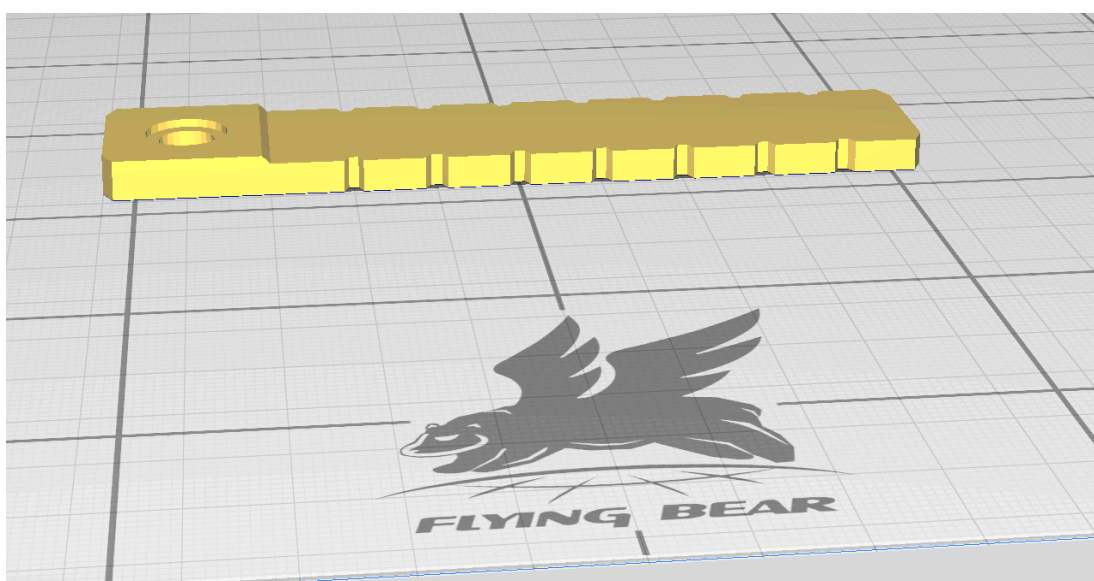


Рисунок 2.8 – Деталь, що буде тестуватися

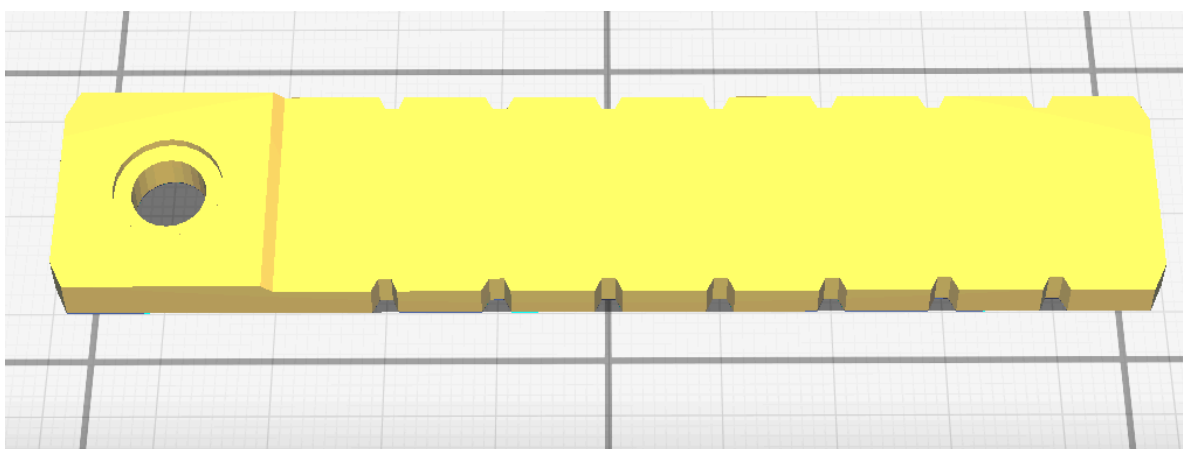


Рисунок 2.9 – Деталь для тестування

Також у конструкції стенда було спроектовано сім окремих точок для закріплення вантажу. Такий підхід дає змогу створити гнучку систему для тестування, яка дозволяє змінювати розташування навантаження на деталь. Це рішення забезпечує можливість використання одного й того самого вантажу для створення різних рівнів напруження залежно від вибраної позиції.

Таке конструктивне рішення відкриває перспективу розширення функціоналу стенда. У майбутньому це дозволить проводити додаткові дослідження, пов'язані з розподілом навантаження на різні точки деталі, а також оцінювати її міцність за різних умов. Завдяки цьому стенд стає універсальним інструментом для експериментів із різними типами деталей та умовами випробувань.

3 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Під час проведення експерименту було виконано серію вимірювань з тестовими деталями, які відрізнялися між собою за ключовими параметрами друку. Зокрема, було змінено такі характеристики, як “Кількість ліній стінки” (2, 4 та 6) та “Щільність заповнення”, що варіювалася в діапазоні від 10% до 100% з кроком 10% (рис. 3.1). Таке налаштування дозволило оцінити вплив кожного з цих параметрів на міцність та стійкість надрукованих деталей, забезпечивши можливість порівняння результатів для подальшого аналізу.

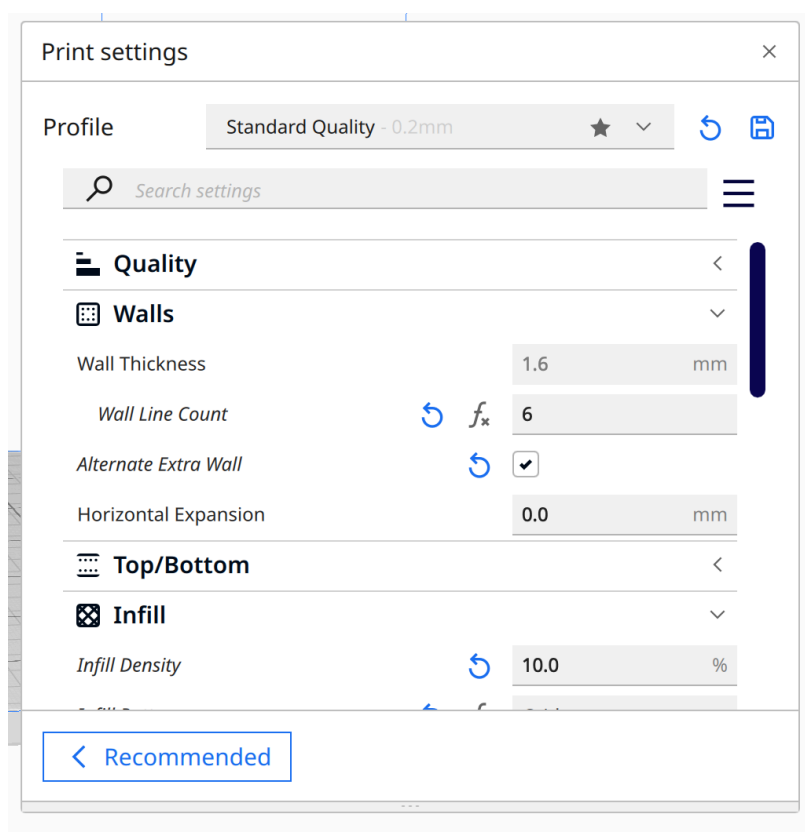


Рисунок 3.1 – Налаштування кількості ліній стінки та щільності заповнення

Також деталі були надруковані з використанням двох температурних режимів, що відповідають мінімальній та максимальній допустимим температурами для матеріалу CoPET (рис. 3.2). Мінімальна температура

становить 235 градусів за Цельсієм, що забезпечує достатнє зчеплення шарів і запобігає їх відшаруванню під час друку. Максимальна температура – 260 градусів за Цельсієм – є граничною для цього матеріалу і дозволяє досягти більш рівномірного розплавлення пластика, що може позитивно вплинути на якість зчеплення між шарами. Вибір таких температурних режимів є важливим, оскільки вони прямо впливають на механічні властивості готових деталей, а також на процес друку в цілому, включаючи час виготовлення і ймовірність виникнення дефектів.




Material ▼			
Printing Temperature	 f_x	260.0	°C
Printing Temperature Initial Layer		260.0	°C
Initial Printing Temperature		260.0	°C
Final Printing Temperature		260.0	°C
Build Plate Temperature		60	°C
Build Plate Temperature Initial Layer		60	°C
Flow		100.0	%

Рисунок 3.2 – Налаштування температури

Приклад розподілу деталі на шари, що є важливим етапом підготовки моделі до 3D-друку, можна побачити далі.

На рисунку 3.3 продемонстровано, як модель розбивається на окремі шари, кожен з яких буде надрукований окремо. Такий процес дозволяє оптимізувати використання матеріалу, забезпечити стабільність друку та досягти бажаних механічних властивостей готової деталі. Розподіл на шари є

необхідним для визначення товщини кожного шару, параметрів заповнення і інших характеристик, що впливають на якість і міцність кінцевого виробу.

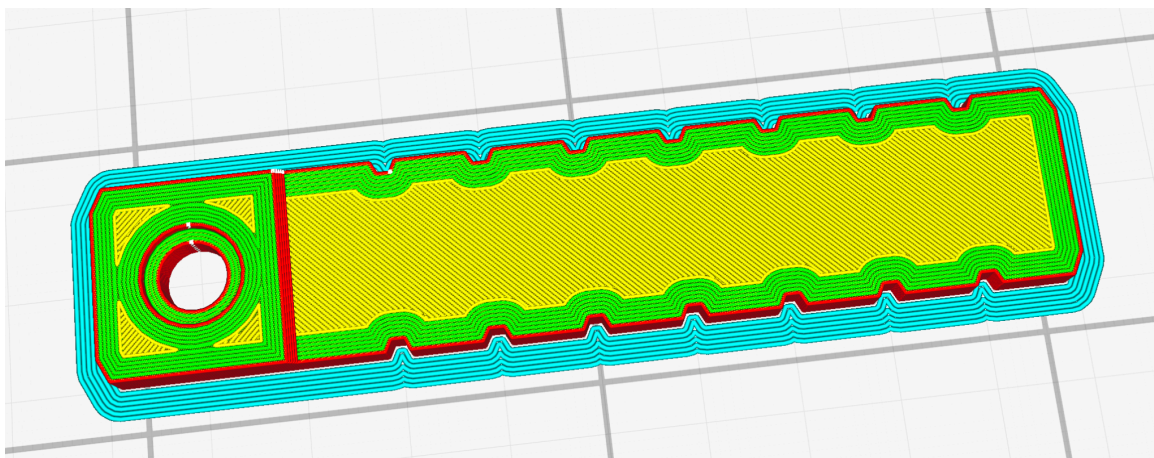


Рисунок 3.3 – Розподілення деталі на шари

Усього було створено 60 деталей (рис. 3.4), кожна з яких виготовлена з використанням різних комбінацій параметрів друку, що дозволило детально вивчити вплив кожного з них на міцність та якість готових виробів.



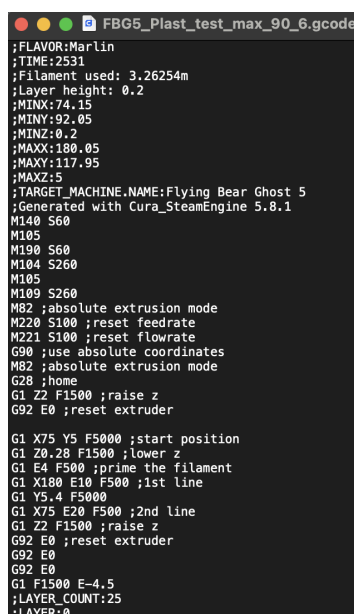
Рисунок 3.4 – Деталі для експерименту

Вибір параметрів, таких як кількість стінок, щільність заповнення та температурні режими, був здійснений на основі попередніх досліджень і рекомендацій щодо оптимізації процесу 3D-друку.

Кожен набір параметрів було ретельно проаналізовано для забезпечення репрезентативності результатів, враховуючи особливості матеріалу CoPET, що використовується у цьому дослідженні. Особливу увагу приділено підбору температури екструзії, адже цей параметр значною мірою впливає на адгезію між шарами виробу, що визначає його загальну міцність.

Результати виготовлення кожної серії деталей були детально задокументовані, що забезпечило можливість статистичного аналізу та виявлення закономірностей між параметрами друку і властивостями готових виробів. Це дозволило побудувати повну картину впливу ключових параметрів на якість і надійність 3D-друкованих елементів, що є важливим для створення продукції з високими вимогами до механічної міцності.

На рисунку 3.5 наведено приклад G-коду, що відповідає налаштуванням для побудови деталі з кількістю стінок 6, заповненням 90% та максимальною температурою 260 градусів за Цельсієм.



```
;FLAVOR:Marlin
;TIME:2531
;Filament used: 3.26254m
;Layer height: 0.2
;MINX:74.15
;MINY:92.05
;MINZ:0.2
;MAXX:186.05
;MAXY:117.95
;MAXZ:5
;TARGET_MACHINE_NAME:Flying Bear Ghost 5
;Generated with Cura_SteamEngine 5.8.1
M140 S60
M105
M190 S60
M104 S260
M105
M109 S260
M82 ;absolute extrusion mode
M220 S100 ;reset feedrate
M221 S100 ;reset flowrate
G90 ;use absolute coordinates
M82 ;absolute extrusion mode
G28 ;home
G1 Z2 F1500 ;raise z
G92 E0 ;reset extruder

G1 X75 Y5 F5000 ;start position
G1 Z0.28 F1500 ;lower z
G1 E4 F500 ;prime the filament
G1 X180 E10 F500 ;1st line
G1 Y5.4 F5000
G1 X75 E20 F500 ;2nd line
G1 Z2 F1500 ;raise z
G92 E0 ;reset extruder
G92 E0
G92 E0
G1 F1500 E-4.5
;LAYER_COUNT:25
;LAYER:0
```

Рисунок 3.5 – G-код для побудови деталі

G-код є серією інструкцій, що визначають рухи друкарської головки, швидкість друку, температуру екструдера та інші параметри, необхідні для точного відтворення моделі. Це дозволяє отримати деталі з заданими характеристиками, що є важливим для подальшого аналізу міцності та якості виготовлених компонентів.

Як вже було зазначено раніше для проведення вимірювань була створена експериментальна установка на базі Arduino, яка дозволяє отримувати дані про напругу, що знімається з тензорезистора. З отриманих даних розраховувалося значення тиску в H/m^2 .

Для збирання схеми підключення тензорезистора було реалізовано наступні етапи:

- один з виводів тензорезистора було підключено до джерела живлення VCC (5V на Arduino);

- другий вивід тензорезистора з'єднали з одним кінцем резистора (10 кОм);

- інший кінець резистора підключили до землі (GND);

- точку з'єднання тензорезистора і резистора підключили до аналогового входу Arduino (наприклад, A0), що забезпечує вихідний сигнал подільника напруги.

Програмне забезпечення для Arduino було налаштовано таким чином, щоб проводити зчитування аналогових значень і виконувати їх перетворення у фізичні параметри. Для переведення напруги у значення тиску використовувалася формула, яка передбачає масштабування вихідного сигналу.

Першим етапом аналізу є розрахунок тиску, який створюється додатковою масою. Загальний тиск розраховується за формулою: тиск дорівнює відношенню загальної сили до площі, на яку вона діє. Таким чином, тиск обчислюється як загальна сила, поділена на площу.

Загальна сила, яка діє на балку, складається з двох компонентів: ваги самої балки та додаткової ваги, що додається до конструкції. Вага балки

залежить від її матеріалу, об'єму та прискорення вільного падіння. Для її обчислення потрібно знати густину матеріалу балки, об'єм балки та стандартне значення прискорення вільного падіння, яке дорівнює приблизно 9,81 метра на секунду у квадраті. Після цього вага балки обчислюється як добуток густини, об'єму та гравітаційного прискорення.

Додаткова вага визначається як добуток маси додаткового вантажу на гравітаційне прискорення. Після того як всі значення ваги будуть визначені, загальна сила обчислюється як сума ваги балки та додаткової ваги.

Знаючи загальну силу та площу, на яку ця сила діє, можна визначити тиск. Після обчислення тиску важливо знайти напруження, яке відповідає одиниці вимірювання тиску, тобто 1 Н/м^2 . Це можна зробити, використовуючи відоме напруження, яке було виміряно за допомогою тензорезистора. Напруження, що відповідає 1 Н/м^2 , розраховується як відношення виміряного напруження до загального тиску.

Розглянемо приклад для кращого розуміння. Припустимо, що густина матеріалу балки дорівнює 600 кг/м^3 , її об'єм становить $0,1 \text{ м}^3$, додаткова маса складає 5 кг , а площа контакту становить $0,2 \text{ м}^2$. Якщо виміряне напруження, зафіксоване тензорезистором, дорівнює 2 В , то, застосовуючи наведені формули, можна визначити як загальний тиск, так і напруження, що відповідає 1 Н/м^2 . Усі результати та розрахунки наведені у додатку А.

4 СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Регресійний аналіз є найбільш поширеним статистичним методом обробки експериментальних даних з метою отримання емпіричних залежностей. Метою регресійного аналізу є отримання за експериментальними даними математичної моделі, що описують поведінку деяких характеристик об'єкта в залежності від множини факторів.

Етапи побудови регресійної моделі.

1. Специфікація моделі (визначення виду регресійної залежності).
2. Вибір методу оцінювання параметрів моделі та реалізація процедури оцінювання.
3. Перевірка статистичної значущості оцінок параметрів моделі.
4. Перевірка адекватності моделі.
5. Інтерпретація результатів.

Нижче наведено опис кожного з перерахованих етапів [20-23].

Етап 1. Вид функції регресії заздалегідь невідомий, тому необхідно за наявними вибірковими даними та виходячи з сутності досліджуваного явища висунути гіпотезу щодо форми моделі. Починають найчастіше з найпростішої лінійної форми залежності.

Етап 2. Оцінки параметрів моделі знаходяться за допомогою методу найменших квадратів (МНК). Як критерій оптимальності оцінок розглядається функціонал

$$F = \sum e_i^2 = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (4.1)$$

де Y_i, \hat{Y}_i – відповідно реальне та модельне значення залежної змінної.

Щодо величин e_i приймаються такі припущення: відхилення e_i є реалізаціями випадкової величини e ; математичне очікування випадкової величини e дорівнює нулю; дисперсія відхилень є незмінною; відхилення e_i є незалежними випадковими величинами.

Етап 3. У результаті перевірки значущості оцінок параметрів моделі встановлюється статистична значимість або незначність відмінності їх від нуля $H_0: a_i = 0; H_1: a_i \neq 0$.

Для такої перевірки використовується статистика:

$$t_i = \frac{a_i}{\sigma_{a_i}}, \quad (4.2)$$

де a_i – значення i -того параметра моделі;

σ_{a_i} – середньоквадратична помилка розрахунку МНК оцінки a_i .

Якщо $\left| t_{a_i} \right| \leq t_{\text{табл}}(k)$, взятого з довірчим рівнем α і ступенем свободи $k = n - m - 1$, то з імовірністю помилки $p = 1 - \alpha$ приймається гіпотеза $H_0: a_i = 0$ (відповідний фактор незначуще впливає на результативну ознаку).

Якщо значення $\left| t_{a_i} \right| > t_{\text{табл}}(k)$, то приймається гіпотеза $H_1: a_i \neq 0$ (параметр a_i є статистично значущим за критерієм Стюдента з ймовірністю $1 - \alpha$), а відповідний фактор значуще впливає на результативну ознаку.

Етап 4.

На поточному етапі розраховуються та інтерпретуються значення коефіцієнтів множинної детермінації та кореляції.

Мірою того, наскільки добре модель (рівняння регресії) описує дану систему спостережень, є коефіцієнт детермінації.

R^2 є відношенням поясненої (через регресійну модель) варіації результативної ознаки до всієї варіації в цілому, тобто:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (4.3)$$

Коефіцієнт детермінації показує, яка частка мінливості Y пояснюється зміною X (побудованою моделлю), в загальній варіації.

Множинний коефіцієнт кореляції показує тісноту зв'язку Y з сукупністю факторів X в моделі.

Для перевірки адекватності моделі необхідно зіставити залишкову дисперсію з незалежною оцінкою дисперсії експерименту. При адекватній моделі відмінність між ними має бути суто випадковою, в іншому випадку залишкова дисперсія повинна бути значно (невипадково) більшою. Зіставлення двох оцінок дисперсій проводиться за допомогою F -критерію. Для цього обчислюється статистика:

$$F = \frac{R^2 \cdot (n - m - 1)}{(1 - R^2) \cdot m}. \quad (4.4)$$

Якщо значення $F > F_{\text{табл}}(\alpha, k_1, k_2)$, взятого з довірчим рівнем α і числами ступенів свободи $k_1=m$, $k_2=n-m-1$, то модель статистично значуща в цілому за критерієм Фішера і адекватна реальним даним з ймовірністю α .

Під час побудови моделі у випадку, якщо верифікація (оцінювання точності) показує, що модель не є адекватною, то здійснюється повернення до вибору специфікації моделі. Виділяють такі типи помилок специфікації моделі: в моделі помилково враховано чинник, який не робить істотного впливу на результуючу змінну; в моделі не врахований фактор, що робить істотний вплив

на результуючу змінну; обрана неправильна форма математичної залежності, яка описує взаємозв'язок між досліджуваними змінними.

Практична реалізація моделі.

Розглянемо вихідні дані та визначимо залежну та незалежні змінні моделі. Початкова модель має вигляд $Y=f(x_1, x_2, x_3)$, Y – міцність, x_1 – температура, x_2 – кількість стінок, x_3 – заповнення.

Змінна Y представлена у порядковій шкалі. Змінна x_1 приймає лише 2 значення, 235 та 260, тому фактично можна сказати, що вона представлена у номінальній шкалі. Змінна x_2 приймає три можливих значення (2,4 або 6) – номінальна шкала. Змінна x_3 приймає десять можливих значень, в рамках дослідження припустимо, що ще інтервальна шкала.

На рис. 4.1 наведено початкові дані та вікно параметрів інструменту «Регресія».

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	x1	x2	x3	x1	x24	x26	x3	Y							
2	260	2	10	1	0	0	10	0,169							
3	260	2	20	1	0	0	20	0,189							
4	260	2	30	1	0	0	30	0,213							
5	260	2	40	1	0	0	40	0,224							
6	260	2	50	1	0	0	50	0,252							
7	260	2	60	1	0	0	60	0,276							
8	260	2	70	1	0	0	70	0,296							
9	260	2	80	1	0	0	80	0,323							
10	260	2	90	1	0	0	90	0,343							
11	260	2	100	1	0	0	100	0,359							
12	260	4	10	1	1	0	10	0,209							
13	260	4	20	1	1	0	20	0,249							
14	260	4	30	1	1	0	30	0,277							
15	260	4	40	1	1	0	40	0,288							
16	260	4	50	1	1	0	50	0,304							
17	260	4	60	1	1	0	60	0,32							
18	260	4	70	1	1	0	70	0,335							
19	260	4	80	1	1	0	80	0,347							
20	260	4	90	1	1	0	90	0,363							
21	260	4	100	1	1	0	100	0,381							

Рисунок 4.1 – Початкові дані та вікно параметрів інструменту «Регресія»

Виходячи з наявної ситуації зі змінними, що представлені у різних шкалах, потрібно здійснити певні попередні перетворення вихідних даних, а саме замінити змінні x_1 та x_2 на даммі-змінні.

Значення змінної x_1 замінюються наступним чином:

Якщо початкове значення дорівнює 235, перетворене значення дорівнює 0; якщо початкове значення дорівнює 260, перетворене значення дорівнює 1.

Змінна x_2 замінюється на дві нових змінних, x_{24} та x_{26} . Змінна x_{24} приймає значення 1, якщо $x_2=4$, і значення 0 в усіх інших випадках; змінна x_{26} приймає значення 1, якщо $x_2=6$, і значення 0 в усіх інших випадках.

Таким чином, потрібно оцінити параметри наступної моделі:

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_{24} x_{24} + a_{26} x_{26} + a_3 x_3. \quad (4.5)$$

Параметри моделі оцінюються за допомогою МНК, усі розрахунки здійснено в MS Excel за допомогою інструмента «Регресія».

На рис. 4.2 наведено результати розрахунків параметрів моделі, а також оцінки статистичної значущості параметрів та оцінки адекватності моделі.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3	<i>Регресійна статистика</i>						
4	Множинний R	0,980911309					
5	R-квадрат	0,962186996					
6	Нормований R-квадрат	0,959436959					
7	Стандартна похибка	0,01434479					
8	Спостереження	60					
9							
10	<i>Дисперсійний аналіз</i>						
11		<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значущість F</i>	
12	Регресія	4	0,287984669	0,071996167	349,881517	2,10783E-38	
13	Залишок	55	0,011317515	0,000205773			
14	Ітого	59	0,299302183				
15							
16		<i>Коефіцієнти</i>	<i>Стандартна похибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значення</i>	<i>Нижні 95%</i>	<i>Верхні 95%</i>
17	Y-перетин	0,139972222	0,005127691	27,29731958	1,1683E-33	0,1296961	0,15024834
18	x_1	0,0091	0,003703809	2,456930287	0,01719594	0,001677401	0,0165226
19	x_{24}	0,04455	0,004536221	9,820950464	1,0617E-13	0,03545921	0,05364079
20	x_{26}	0,08555	0,004536221	18,85931116	1,1185E-25	0,07645921	0,09464079
21	x_3	0,002076869	6,4475E-05	32,21198217	2,2017E-37	0,001947658	0,00220608

Рисунок. 4.2 – Результати розрахунків параметрів моделі

Фінальна модель має вигляд:

$$Y=0,13997+0,0091x_1+0,04455x_2+0,08555x_3+0,0021x_4. \quad (4.6)$$

По колонці Р-значення можна зробити висновок, що для усіх параметрів моделі, окрім коефіцієнта a_1 , значення р-value є значно меншим, ніж 0,05. Це означає, що параметри є статистично значущими (їх значення суттєво відрізняються від 0).

Множинний коефіцієнт детермінації дорівнює 0,96 – це означає, що 96% мінливості залежного показника Y пояснюється мінливістю незалежних факторів, включених до моделі.

Значення статистики Фішера дорівнює 349,88 і також є статистично значущим (рівень р-value є значно меншим, ніж 0,01).

Таким чином, модель є прийнятною для використання.

Розглянемо інтерпретацію параметрів моделі:

– $a_1=0,0091$ – означає, що якщо температура збільшується з 235 до 260, Y збільшується на 0,0091;

– $a_2=0,04455$ – означає, що якщо кількість стінок змінюється з 2 до 4, Y збільшується на 0,04455;

– $a_3=0,08555$ – означає, що кількість стінок змінюється з 2 до 6, Y збільшується на 0,08555;

– $a_4=0,0021$ – означає, що зміна показника x_4 на одиницю призводить до зміни Y на 0,0021.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Техніка безпеки під час процесу 3D-друку є критично важливим аспектом для забезпечення безпеки працівників та надійної роботи обладнання. Для запобігання нещасним випадкам необхідно строго дотримуватись встановлених технологічних інструкцій, стандартів безпеки та технічних умов.

Перед початком роботи з 3D-принтером працівник повинен переконатися, що всі пристрої налаштовані відповідно до інструкцій виробника, а робоче місце очищене від зайвих предметів. Важливо перевірити, чи не має пошкоджень обладнання, особливо нагрівальних елементів та подачі матеріалів.

Приміщення, в якому проводиться 3D-друк, повинно бути добре вентиляльованим для зменшення концентрації шкідливих випарів від пластика чи інших матеріалів, що використовуються для друку. Для цього рекомендується забезпечити наявність витяжної вентиляції та фільтраційних систем, що зменшують кількість шкідливих випарів, особливо під час друку з матеріалів, що можуть виділяти токсичні або подразнюючі речовини.

Особливу увагу слід приділяти роботі з гарячими елементами принтера, зокрема з нагрівальними платформами та екструдером, що можуть досягати високих температур. Працівник повинен носити спеціальний захисний одяг, зокрема рукавички, щоб уникнути опіків. Для роботи з матеріалами, що можуть вивільняти токсичні гази при нагріванні, необхідно використовувати захисні маски та респіратори.

Під час роботи з принтером слід постійно контролювати температурний режим, особливо якщо використовуються матеріали, що вимагають високих температур для плавлення. У випадку аномальних змін температури або несправностей в обладнанні потрібно негайно припинити роботу та звернутися до кваліфікованого технічного персоналу.

При аварійних ситуаціях, таких як відключення електроенергії чи поломка обладнання, необхідно відключити 3D-принтер від електричної мережі за допомогою головного вимикача, а також вимкнути всі інші електронні прилади. В разі виникнення загорання або диму, що може виникнути через перегрів елементів, слід негайно евакуюватися з приміщення та скористатися вогнегасниками, призначеними для роботи з електричними приладами.

Приміщення, де знаходяться 3D-принтери, повинно бути обладнане аварійним освітленням для безпечної евакуації працівників у разі відключення основного освітлення. Це освітлення має бути достатньо яскравим і працювати навіть при відключенні електропостачання, щоб забезпечити безпеку та видимість шляхів евакуації.

Такий підхід до охорони праці дозволяє не лише мінімізувати ризики травмування працівників, а й забезпечити належний рівень безпеки під час експлуатації 3D-принтерів.

Хороша вентиляція критично важлива для безпечного 3D-друку. Ось кілька рекомендацій: Використовуйте 3D-принтер у добре провітрюваному приміщенні. Відкрийте вікна і двері для поліпшення циркуляції повітря. Розгляньте можливість використання витяжного вентилятора або очищувача повітря з HEPA-фільтром. Для додаткової безпеки можна використовувати закриті 3D-принтери з системою фільтрації повітря.

При роботі з 3D-принтером рекомендується використовувати такі засоби захисту: Респіратор або маска з фільтром для захисту від УТЧ і ЛОС Захисні окуляри для запобігання потрапляння частинок в очі Рукавички при роботі з гарячими деталями або хімічними речовинами

Правильне обслуговування вашого 3D-принтера не тільки покращує якість друку, але й підвищує безпеку: Регулярно очищуйте принтер від залишків пластику та пилу Перевіряйте і замінюйте зношені деталі Слідкуйте за правильною калібруванням принтера для запобігання невдалим друкам і зайвим

викидам Докладніше про правильне обслуговування 3D-принтера читайте в нашій статті Як налаштувати ваш новий 3D-принтер.

Для домашніх користувачів 3D-принтерів особливо важливо дотримуватися заходів безпеки: Розмістіть принтер в окремому, добре провітрюваному приміщенні, не в спальні або кухні. Використовуйте переважно PLA або інші низькотемпературні матеріали. Обмежте доступ дітей та домашніх тварин до принтера, що працює. Встановіть детектор диму і вуглекислого газу в приміщенні з принтером. Не залишайте принтер, що працює, без нагляду на тривалий час.

У промислових умовах, де 3D-друк використовується більш інтенсивно, потрібні додаткові заходи безпеки: Установка професійних систем вентиляції та фільтрації повітря. Створення окремих зон для 3D-друку з обмеженим доступом. Регулярний моніторинг якості повітря та рівня викидів. Навчання персоналу правилам безпеки при роботі з 3D-принтерами. Використання промислових 3D-принтерів з вбудованими системами безпеки.

Важливо: У промислових умовах необхідно дотримуватися всіх нормативних вимог з охорони праці та техніки безпеки, застосованих до 3D-друку.

Для великомасштабного виробництва рекомендується використовувати професійні 3D-принтери з поліпшеними системами безпеки. Наприклад, професійні 3D-принтери часто оснащені закритими камерами та вбудованими системами фільтрації.

3D-друк, безумовно, відкриває величезні можливості для творчості та інновацій. Однак, як і будь-яка технологія, вона вимагає відповідального підходу до використання. Розуміння потенційних ризиків і прийняття відповідних заходів безпеки дозволяє максимально знизити негативний вплив 3D-друку на здоров'я. Ось ключові моменти, які варто запам'ятати: Вибирайте безпечні матеріали для друку, віддаючи перевагу PLA або PETG. Забезпечте хорошу вентиляцію в приміщенні, де проводиться 3D-друк. Використовуйте

засоби індивідуального захисту при роботі з принтером. Регулярно обслуговуйте і перевіряйте ваш 3D-принтер. Дотримуйтесь рекомендацій щодо безпеки для домашнього або промислового 3D-друку. Пам'ятайте, що технологія 3D-друку постійно розвивається, і нові дослідження можуть виявити додаткові ризики або способи їх мінімізації. Тому важливо залишатися в курсі останніх новин і рекомендацій з безпеки у сфері 3D-друку [24].

ВИСНОВКИ

У результаті виконаного дослідження були досягнуті основні поставлені цілі та отримані важливі результати, що мають як теоретичне, так і практичне значення. Проведена робота дозволила вивчити вплив параметрів FDM 3D-друку на міцність друкованих деталей, визначити ключові залежності та побудувати статистичну модель для прогнозування результатів.

Аналіз предметної області показав, що якість друкованих деталей залежить від численних факторів, таких як кінематика принтера, вибір матеріалу, а також налаштування друку. Для дослідження було обрано технологію FDM із застосуванням пластику CoPET, що дозволило сфокусуватися на ключових параметрах: кількість ліній стінки, щільність заповнення та температура друку.

Проведення експерименту дало змогу виготовити 60 тестових зразків із різними комбінаціями параметрів друку. Усі зразки були піддані випробуванням на міцність за допомогою тензорезистора. Це дозволило отримати емпіричні дані, які стали основою для подальшого аналізу.

Статистичний аналіз результатів здійснювався за допомогою регресійного аналізу, який дозволив побудувати математичну модель, що описує залежність міцності деталей від температури друку, кількості стінок і щільності заповнення. Модель продемонструвала високий рівень точності:

Множинний коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,96$ свідчить про те, що 96% варіації залежної змінної пояснюється включеними в модель факторами. Значення F-критерію (349,88) підтвердило статистичну значущість моделі на високому рівні достовірності.

Інтерпретація параметрів моделі показала, що найбільший вплив на міцність деталей має параметр кількості стінок.

Практичне значення дослідження полягає у можливості використання побудованої моделі для прогнозування міцності друківаних деталей залежно від параметрів друку. Це дозволяє оптимізувати процес друку, обираючи такі параметри, які забезпечують максимальну міцність при мінімальних витратах матеріалу.

Отже, результати дослідження підтверджують, що правильно обрані параметри друку відіграють ключову роль у забезпеченні високої якості та надійності друківаних деталей. Побудована модель може стати основою для подальших досліджень, зокрема для оптимізації процесів FDM 3D-друку в робототехніці, машинобудуванні та інших галузях, де критично важливими є механічні властивості надруківаних деталей.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипченко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. 49 с.

3. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. № 50. – Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademichnu-dobrochesnist.pdf.

4. Збірник студентських наукових статей «Автоматизація та приладобудування» «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2024 (Випуск 2) [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://drive.google.com/file/d/1u_rEiXZx-TIR7n1sBHkL_OuFF5w7kOb1/view

5. 3D printing. A Practical Guide / Redwood Ben, Garrat Brian, Chauffeur Philemon. – М.: DMK-Press, 2020.

6. Посібник Із Стереолітографії (SLA) 3D-Друку – Служба 3D-Друку FacFox [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ua.insta3dm.com/info/guide-to-stereolithography-sla-3d-printing-71998974.htm>
1.

7. Посібник Із Селективного Лазерного Спікання (SLS) 3D-Друку – Служба 3D-Друку FacFox [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ua.insta3dm.com/info/guide-to-selective-laser-sintering-sls-3d-pr-71989124.html>.

8. Що таке DLP 3D друк [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://pro3d.com.ua/a393155-scho-take-dlp.html>.

9. Порошковий 3D-друк Multi Jet Fusion [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://3dprint.infomir.eu/multi-jet-fusion-technology/>.

10. HP MJF vs SLS: порівняння технологій 3D-друку [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://3dprint.infomir.eu/hp-mjf-vs-sls-porivnyannya-tehnologij-3d-druku/>

11. 5 найвагоміших причин вибрати 3D-друкування Multi Jet Fusion [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://3dprint.infomir.eu/5-najvagogomishyh-prychyn-vybraty-3d-drukuvannya-multi-jet-fusion/>.

12. Манжілевський О. Д., Іскович-Лотоцький Р. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування Навчальний посібник, Вінниця: ВНТУ, 2021, 105 с.

13. FDM-друк і чим він відрізняється від MJF [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://3dprint.infomir.eu/fdm-druk-i-chym-vin-vidriznyayetsya-vid-mjf/>.

14. Від дрібних деталей до багатоповерхових будинків: як розвивалася технологія 3D-друку [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.rbc.ua/rus/styler/vid-dribnih-detaley-bagatopoverhovich-budinkiv-1711383172.html>.

15. Як конвертувати STL файли в G-код [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://3dway.com.ua/blog/how-to-convert-stl-files-to-g-code>.

16. Матеріали для 3D-друку: що потрібно знати? [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://lbl-corp.com/blog/materialy-dlia-3d-druku>.

17. Найкращі матеріали для 3D-друку для використання на відкритому повітрі [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://artline.ua/uk/blogs/luchshie-materialy-dlya-3d-pechati-dlya-ispolzovaniya-na-otkrytom-vozdukhe>.

18. Кінематика 3D-принтерів. Види та особливості. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.3dprinter.ua/kinematyka-3d-prynteriv-vydy-ta-osoblyvosti-robymo-svij-vybir/>.

19. Мицик І. С. Перспективні види кінематики для 3D-принтерів [Електронний ресурс] / І. С. Мицик // Матеріали LI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 31 травня 2022 р. – Електрон. текст. дані. – 2022. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2022/paper/view/14985>.

20. Bradley Efron, Trevor Hastie (2021) Computer Age Statistical Inference. Algorithms, Evidence, and Data Science. Cambridge University Press.

21. Peter Bruce, Andrew Bruce (2017) Practical Statistics for Data Scientists: 50 Essential Concepts. O'Reilly Media, Inc.

22. Статистичний аналіз даних вимірювань: навч. посіб. / Єременко В.С., Куц Ю.В., Мокійчук В.М., Самойліченко О.В. – К.: НАУ, 2013.– 320 с.

23. Герич М.С., Синявська О.О. Математична статистика: навч.посіб. Ужгород: ДВНЗ «УжНУ», 2021. – 146с.

24. Чи є 3D-друк токсичним? Все, що вам потрібно знати, щоб залишатися в безпеці! [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://3d4u.com.ua/uk/blog/post/139-is-3d-printing-toxic-safety-guide>.