

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)

Модель впливу технологічних параметрів 3D-друку на можливість друку без підтримок
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи КТРСм-22-1
Пилипенко В.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

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

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

Керівник проф. Замірець М.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР


(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

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.

«22» січня 2024 р.



Пилипенко В. В.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
 Кафедра _____ КІТАР _____
 Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
 Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
 Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
 Освітня програма Комп'ютеризовані та робототехнічні системи _____
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«03» листопада 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Пилипенку Віталію Вікторовичу _____
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Модель впливу технологічних параметрів 3D-друку на можливість друку без підтримок _____

Затверджена наказом по університету від 03.11.2023 № 1288Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 22.01.2024р. _____

3. Вихідні дані до роботи технологія FDM, пластики PLA, CoPET, ABS, технологія п'ятиосьового 3D-друку. _____

Параметри якості: механічна міцність, шорсткість, відповідність розмірів. _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Аналіз предметної області _____

4.2 Аналіз технології FDM 3D-друку _____

4.3 Аналіз видів та принципів роботи FDM 3D-принтерів _____

4.4 Аналіз технології п'ятиосьового FDM 3D-друку _____

4.5 Аналіз моделі впливу технологічних факторів на параметри якості без підтримок _____

4.6 Моделювання 5-осьового FDM 3D-принтера _____

4.7 Експериментальні дослідження _____

4.8 Охорона праці _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt)– 20с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області	05.11.2023	Виконано
2	Аналіз технології FDM 3D-друку та її видів	14.11.2023	Виконано
3	Моделювання 5-осьового FDM 3D-принтера	25.11.2023	Виконано
4	Аналіз моделі впливу технологічних факторів на параметри якості без підтримок	10.12.2023	Виконано
5	Експериментальні дослідження	20.12.2023	Виконано
6	Охорона праці	01.01.2024	Виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	05.01.2024	Виконано
8	Подання у ЕК	22.01.2024	Виконано

Дата видачі завдання 03.11.2023р.

Студент _____

(підпис)

Пилипенко В. В.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____

(підпис)

проф. Замірець М.В.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка передатестаційної роботи містить в своєму складі: 101 с., 7 табл., 89 рис., 3 дод., 27 джерел.

3D-ДРУК, AM, CAD, CURA, FDM, МОДЕЛЮВАННЯ, PLA, PRUSA, PVA.

Актуальність теми – дослідження моделі впливу технологічних параметрів 3D-друку на можливість друку без підтримок є дуже актуальним у сучасному світі. Зростання інтересу до 3D-друку та його використання в різних сферах, включаючи промисловість, медицину, дизайн і багато інших, викликає потребу вдосконалення існуючої технології 3D-друку задля зменшення витрат часу та матеріалів.

Дослідження впливу технологічних параметрів, таких як швидкість друку, температура екструзії, матеріал та інші, на можливість друку без підтримок, а також запровадження нових апаратних та програмних шляхів вирішення проблеми може відкрити нові можливості для вирішення технічних викликів. Ефективні засоби друку без підтримок можуть сприяти зменшенню витрат матеріалу, часу та зусиль, що важливо для підвищення продуктивності та вигідності процесу 3D-друку, а також дати можливість друкувати більш точні та затребувані елементи.

3D-друк найбільш широко використовується у виробництві одиночних екземплярів, де важливо досягти високих стандартів якості для деталі, таких як точні розміри та гладкість поверхні. При наявності підтримок, ці параметри значно погіршуються через обмеження, які накладає використання підтримок.

Мета роботи – розробити модель впливу технологічних параметрів 3D- друку на можливість друку без підтримок.

Методи дослідження – в якості методів дослідження використовувалися змішані методи, що включають в себе емпіричний метод, зокрема використовувалися експериментальні дослідження, зрівняння, виміри, структурний аналіз.

Об’єкт дослідження – технологія 3D-друку без підтримок методом FDM.

Предмет дослідження – модель впливу технологічних параметрів 3D-друку на можливість друку без підтримок.

Із теоретичного методу використовувалися аналіз, уявне модулювання, індукція та дедукція.

THE ABSTRACT

Explanatory note pre-certification work contains in its composition: 101 page, 7 table applications, 89 drawings, 3 additions, 27 sources.

3D-PRINTING, AM, CAD, CURA, FDM, MODELING, PLA, PRUSA, PVA.

The relevance of the topic-Studying the model of the influence of 3D printing technological parameters on the ability to print without supports is very relevant in the modern world. The growing interest in 3D printing and its use in various fields, including industry, medicine, design, and many others, necessitates the improvement of existing 3D printing technology to reduce time and material costs.

Investigating the impact of process parameters such as print speed, extrusion temperature, material, and others on the ability to print without supports, as well as introducing new hardware and software solutions to the problem, can open up new opportunities to address technical challenges. Effective unsupported printing tools can help reduce material, time and effort, which is important for increasing the productivity and profitability of the 3D printing process, as well as enable the printing of more precise and sought-after items.

3D printing is most widely used in the production of single pieces, where it is important to achieve high quality standards for the part, such as accurate dimensions and surface smoothness. In the presence of supports, these parameters are significantly degraded due to the limitations imposed by the use of supports.

Purpose-to develop a model of the influence of technological parameters of 3D printing on the ability to print without supports.

Research methods-mixed methods were used as research methods, including the empirical method, in particular, experimental studies, comparisons, measurements, and structural analysis were used.

The object of research is 3D printing technology without supports by the FDM method.

The subject of the study is a model of the influence of technological parameters of 3D printing on the possibility of printing without supports.

The theoretical method used was analysis, imaginary modulation, induction and deduction.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	11
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	14
1.1 Адитивне виробництво	14
1.2 Технологія 3D-друку FDM	18
1.3 Види та принцип роботи FDM 3D-принтерів.....	24
1.4 Будова та принцип роботи FDM 3D-принтера.....	34
1.5 Висновки до першого розділу.....	39
2 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ДРУКУ БЕЗ ПІДТРИМОК В FDM 3D-ПРИНТЕРАХ	40
2.1 Недоліки друку з підтримками в FDM 3D-друці.....	40
2.2 Методи та засоби друку на FDM 3D-принтерах без підтримок.....	44
2.3 Аналіз будови 5-осьового FDM 3D-принтера.....	51
2.4 Висновки до другого розділу	55
3 МОДЕЛЮВАННЯ 5-ОСЬОВОГО FDM 3D-ПРИНТЕРА	56
3.1 Моделювання елементів обертання 5-осьового FDM 3D-принтера.....	56
3.2 Електрична частина 5-осьового FDM 3D-принтера	63
3.3 Генерація G-коду та кінематика	67
3.4 Висновки до третього розділу	70
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	72
4.1 Вплив технологічних параметрів на якісні показники.....	72
4.2 Багатофакторний регресійний аналіз.....	79
4.3 Висновки до четвертого розділу.....	93
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	95
ВИСНОВКИ.....	97
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	98
ДОДАТОК А Апробація наукових результатів дослідження	102
ДОДАТОК Б Результати експериментальних досліджень та розробка математичної моделі проведеного досліджу.....	113

ДОДАТОК В Демонстраційний матеріал у вигляді презентації..... 116

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

САПР – Система Автоматизованого Проектування;
УФ – Ультрафіолет;
3D – 3 dimensions;
ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene;
AM – Additive Manufacturing;
Binder 3DP – Binder Jetting 3D Printing;
CAE – Computer-Aided Engineering;
CAD – Computer-Aided Design;
CAM – Computer-Aided Manufacturing;
FDM – Fused Deposition Modeling;
DLP – Digital Light Processing;
LENS – Laser Engineered Net Shaping;
LOM – Laminated Object Manufacturing;
PETG – Polyethylene Terephthalate Glycol;
PLA – Polylactic Acid;
SCARA – Selective Compliance Articulated Robot Arm;
SLA – Stereolithography;
SLS – Selective Laser Sintering;
SLM – Selective Laser Melting.

ВСТУП

Моделювання методом наплавлення – це процес адитивного виробництва, який часто використовується для виготовлення прототипів і деталей геометрично складної форми. Він набуває популярності, оскільки скорочує час циклу розробки продукту без необхідності використання дорогих інструментів.

Однак використання технології FDM у різних промислових застосуваннях наразі обмежене через кілька недоліків, таких як недостатні механічні властивості, низька якість поверхні та низька точність розмірів.

На якість продукції, виробленої FDM, впливають різні параметри процесу, наприклад, товщина шару, орієнтація конструкції або швидкість друку.

Вважається, що оптимальне налаштування параметрів покращує якість тривимірних надрукованих деталей і може скоротити час постобробки.

Таким чином метою магістерської випускної атестаційної роботи є дослідження впливу параметрів та факторів на можливість друку без підтримок, а також на кінцеву якість надрукованої моделі за технологією 3D-друку методом пошарового наплавлення.

Також буде представлено вирішення проблеми друку з підтримками.

Об'єкт дослідження – технологія 3D-друку без підтримок методом FDM.

Предмет дослідження – модель впливу технологічних параметрів 3D-друку на можливість друку без підтримок.

Методи дослідження – експеримент, спостереження, аналіз, індукція, дедукція, математичний аналіз.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати наявні технології адитивного виробництва;
- розглянути технологію FDM, види та будову наявних 3D-принтерів, що працюють за нею;

- проаналізувати необхідні умови для якісного друку без використання підтримок;
- проаналізувати можливі варіанти вирішення проблеми друку з підтримками;
- обрати оптимальний варіант вирішення проблеми та провести повний розбір.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1] та керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [2], методичними вказівками [3] та публікацією, що була надрукована в збірнику конференції: АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ТА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ» [електронне видання][4].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Адитивне виробництво

Адитивне виробництво (АМ) включає технології, які створюють деталь шляхом додавання матеріалу шар за шаром. Матеріалом може бути полімер, бетон, метал або навіть композит. Щоб виробничий процес класифікувався як технологія АМ, він повинен включати наступні три важливі аспекти:

а) Використання комп'ютера та систем автоматизованого проектування (САПР) для створення візуальних 3D-моделей. Для створення 3D-моделей використовуються декілька інструментів САПР, серед яких AutoCAD, Inventor®, Solidworks®, CATIA ТМ та багато інших. Професійне використання користувачем інструментів САПР дозволяє створити будь-яку форму складних 3D-моделей продуктів;

б) Нарізка та генерація траєкторій інструменту. 3D-моделі, згенеровані CAD, мають бути підготовлені у форматі, який може бути інтерпретований машиною для адитивного виробництва. Програмне забезпечення для нарізки перетворює 3D-дизайн у багат шарові моделі, які верстат може легко відстежити та побудувати;

в) Перетворення 3D-моделі на реальний продукт. 3D-принтер перетворює 3D-модель на реальний продукт за допомогою матеріалів, таких як пластик, металевий порошок, композити тощо.

Існують різні технології, класифіковані відповідно до матеріалу та технології, що використовуються у виробництві деталей.

Існує сім основних технологій адитивного виробництва [5], які наведено нижче:

Першою було розглянуто технологію стереолітографії (SLA).

У SLA використовується ванна з рідкою фотополімерною смолою, яка полімеризується під дією УФ-випромінювання. Для кожного шару промін

лазера проходить по траєкторії лінії по площі поверхні рідкої смоли, яка відповідає площі перерізу об'єкта на цьому рівні.

Завдяки впливу УФ-лазера область обраної форми полімеризується і спікається із попереднім шаром [6]. Принцип дії зображено на рисунку 1.1.

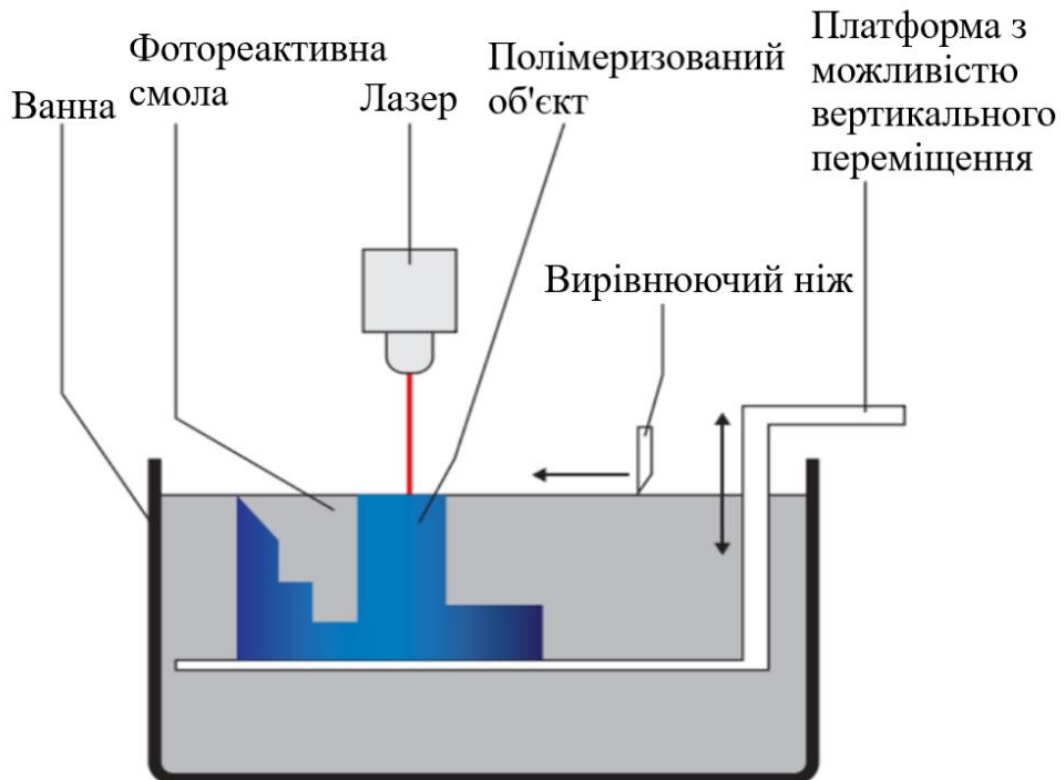


Рисунок 1.1 – Технологія стереолітографії

Також, до цього методу можна віднести і метод цифрової світлодіодної проєкції (DLP).

DLP є методом друку, в якому також використовуються фоточутливі полімери. Хоча загалом метод дуже схожий на стереолітографію, ключовою відмінністю є джерело світла. У методі DLP замість лазера, який буде траєкторію руху, використовуються DLP проєктори, які одночасно засвічують шари в необхідних місцях деталі.

Подібною до DLP є технологія, що використовується у фотополімерних принтерах типу LCD (Liquid Crystal Display).

В ній використовуються LCD-екрани з світлодіодною матрицею, які використовуються для процесу полімеризації смоли, аналогічно до обладнання на базі технології DLP.

Як і у випадку з DLP, LCD-друк полягає в одночасному засвіченні цілих шарів для полімеризації фотополімеру, але без застосування дзеркал.

Натомість потужні УФ лампи випромінюють світло через рідкокристалічний екран, який має маску, що відповідає кожному шару об'єкта, що друкується.

Рідкокристалічний екран пропускає світло тільки через ділянки, що підлягають затвердінню, на готову деталь, спрощуючи процес і усуваючи необхідність будь-яких дзеркал (рис. 1.2).

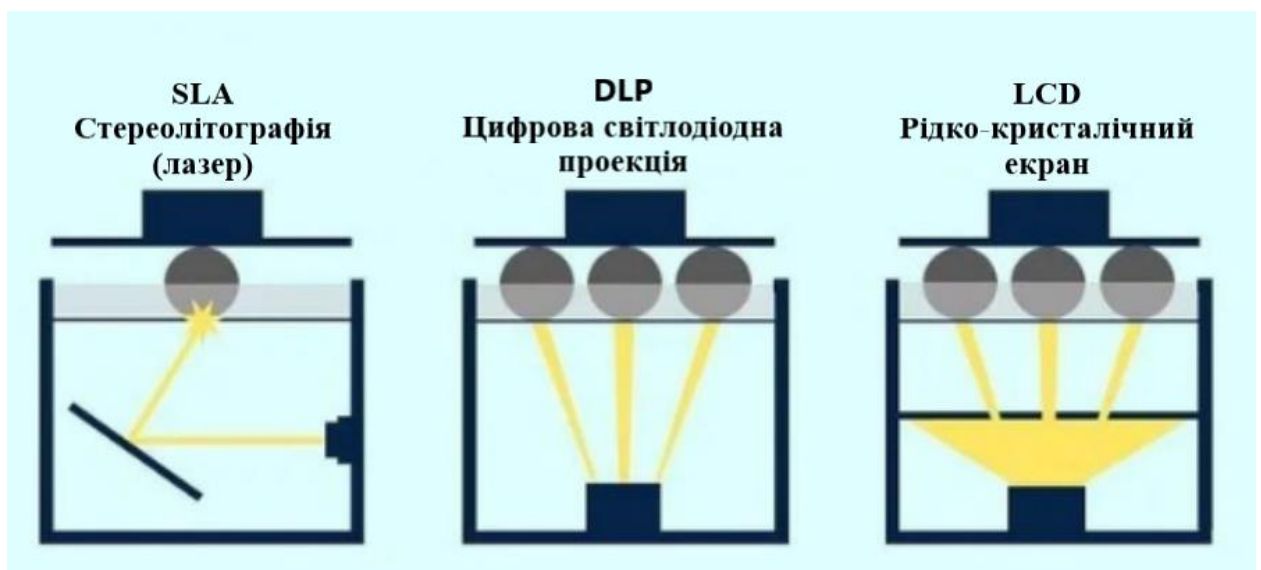


Рисунок 1.2 – Принцип роботи технологій SLA, DLP, LCD

Наступною є технологія моделювання методом наплавлення (FDM).

FDM – це технологія отримання виробів шляхом продавллювання в'язкого розплаву матеріалу через формуючий отвір сопла [7];

В технології Polyjet друк відбувається за допомогою рухомого блоку з набором головок. У кожній голівці є багато дрібних сопел, розташованих

рядами. Друкуючий блок переміщається горизонтальною площиною і наносить фотополімер.

Нанесений шар опромінюється ультрафіолетом і під його впливом швидко твердне. Так повторюється шар за шаром, доки не сформується модель. В результаті виходить тверда деталь, яку не потрібно піддавати додатковому обробленню перед використанням.

Струменеве нанесення сполучного матеріалу, по-іншому – Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP) [8].

Binder 3DP – технологія пошарового нанесення сполучного матеріалу на порошковий матеріал. Камера побудови опускається при кожному шарі, а валик наносить шар, потім головка друкує наносить сполучно. Товщина шару від 50 до 100 мікрон, матеріалом виступають пісок, кераміка та деякі види пластику. Кінематика руху частин верстата ідентична методами «SLS/SLM».

Виготовлення об'єктів методом ламінування (LOM) [8].

LOM – технологія адитивного виробництва, що використовує листовий тип сировини. Виготовлення об'єктів методом ламінування має на увазі поетапне склеювання листів паперу, пластику або металевої фольги з подальшим формуванням контуру за допомогою лазерного різання.

Селективне лазерне спікання (SLS). SLS – це технологія адитивного виробництва, в якій використовується потужний лазер для спікання порошку у тверду структуру на основі тривимірної моделі.

Плавка шляхом створення форми лазером. Laser Engineered Net Shape (LENS) – це технологія адитивного виробництва, яка дозволяє виробляти деталь безпосередньо з моделі CAD використовуючи принцип наплавлення металевим порошком або проволокою, що подається в захисному струмені газу в область дії лазерного променя [8].

Адитивним технологіям віддають перевагу перед звичайними завдяки наступним перевагам:

а) адитивні технології дозволяють створювати об'єкти, додаючи матеріал лише там, де він потрібен. Це зменшує втрати матеріалу порівняно із традиційними виробничими методами, такими як обрізка або фрезерування;

б) не потребує великої кількості допоміжних інструментів, таких як інструменти, пристосування, пристосування тощо;

завдяки адитивним технологіям можна виготовляти складні геометричні форми та структури, які були б важко або неможливо виготовити іншими методами;

в) можливість гнучкого виробництва великої кількості деталей, адже адитивні технології забезпечують майже безперервний процес друку;

г) можливість швидко створювати прототипи дозволяє швидше тестувати та вдосконалювати деталі.

Недоліками даних адитивних технологій є розмір деталей, які можуть бути виготовлені, поверхневі та мікроструктурні недоліки та висока вартість обладнання для АМ. Процеси друку в залежності від складності деталі, що друкується, можуть займати багато часу, тому вони є не найкращим варіантом для масового виробництва складних за формою деталей [8].

1.2 Технологія 3D-друку FDM

Моделювання методом наплавлення (FDM) – це технологія адитивного виробництва, який часто використовується для виготовлення прототипів і деталей геометрично складної форми.

Принтери, які використовують технологію FDM, мають наступні переваги відносно інших типів 3D-принтерів.

Низька вартість матеріалів та їх доступність роблять цю технологію зручною для домашнього використання та прототипування. Широкий вибір термопластичних матеріалів, таких як PLA, ABS і PETG, розширює можливості виробництва.

Простота використання та налаштування, а також велика кількість програмного забезпечення з відкритим кодом дозволяють ефективно працювати з цими принтерами. FDM 3D-принтери ідеально підходять для швидкого прототипування та тестування дизайну.

Проста конструкція та невисока складність обладнання сприяють зручності обслуговування та ремонту. Нарешті, можливість виготовлення великих деталей робить FDM-принтери популярними в різних виробничих галузях.

Однак технології FDM у різних промислових застосуваннях наразі обмежені через кілька недоліків, таких як недостатні механічні властивості, низька якість поверхні та низька точність розмірів.

На якість продукції, виробленої FDM, впливають різні параметри процесу, наприклад, товщина шару, орієнтація конструкції, ширина растру, наявність підтримок або швидкість друку. Налаштування параметрів процесу та їх діапазон залежить від механічних особливостей та видів кінематики цих принтерів [9].

Кінцеві параметри деталей, що друкуються залежать від групи факторів, серед яких – тип філаменту, розміри сопел, кінематика принтеру, налаштування екструдера тощо.

Принтер може друкувати в різному діапазоні параметрів, таких як швидкість друку, роздільна здатність та мінімальна товщина шару, і ці налаштування впливатимуть на якісні показники кінцевої деталі. Ця гнучкість відкриває широкий простір для вибору оптимальних умов виробництва відповідно до конкретних вимог проекту.

Оптимальне налаштування параметрів покращує якість надрукованих деталей і може скоротити цикл їх постобробки.

Основні параметри процесу друку: товщина шару, орієнтація конструкції, температура екструзії, щільність заповнення, тип заповнення, швидкість друку та температура термообробки.

Орієнтація конструкції – орієнтація збірки визначається як спосіб орієнтації частини на платформі збірки відносно осей X , Y та Z.

Температура екструзії матеріалу – температура, при якій філамент нагрівається до температури плавлення та видавлюється на робочу поверхню під час процесу FDM. Температура екструзії залежить від різних аспектів, наприклад, типу філаменту, швидкості друку, наявності і потужності охолодження.

Основним елементом, що контролює цей параметр являється екструдер.

Проаналізувавши технологію його роботи варто зазначити, що важливим моментом є різкий градієнт температур між нижньою та верхньою частиною сопла.

Саме для цієї мети і встановлюється вентилятор та термобар'єр.

При переході порога температури склювання пластик стає м'яким, але ще досить в'язким, збільшуючись в об'ємі. У цьому стані зростає тертя матеріалу із внутрішніми стінками сопла.

Пластик повинен плавитися тільки в соплі, а частина пластику, яка знаходиться зверху, повинна бути тверда, щоб з легкістю проштовхувати вже розплавлений в соплі пластик (рис. 1.3) [10].

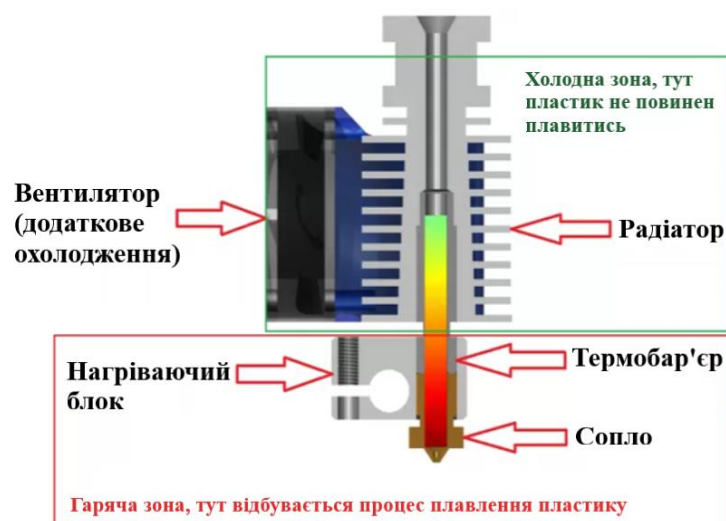


Рисунок 1.3 – Будова та принцип роботи екструдера

Якщо довжина і площа цієї ділянки занадто велика, то сумарний коефіцієнт тертя може стати занадто великим для того, щоб механізм зміг просунути пластик далі до сопла.

Таким чином, довжина ділянки сопла з нерозплавленою ниткою і довжина ділянки з розплавленим матеріалом не мають особливого значення, а довжина ділянки з пластиком при температурі склювання повинна бути якомога меншою (рис. 1.4).

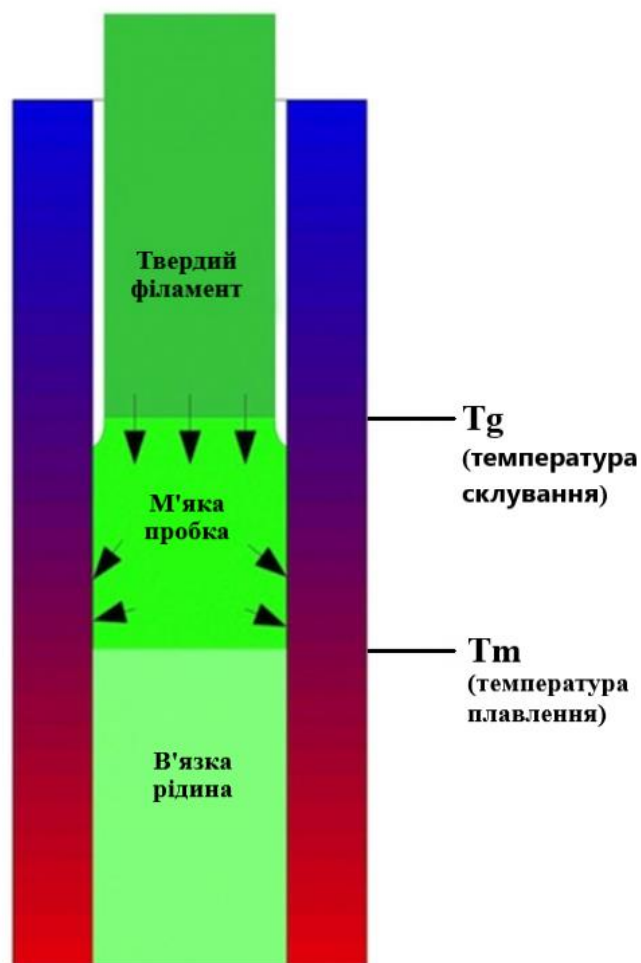


Рисунок 1.4 – Діаграма переходу пластикової нитки із твердого стану у в'язкий

Це означає, що «гарячу зону» необхідно різко відсікати, чим менше буде висота перехідної зони (від гарячого до холодного), тим краще. Якщо пластик буде плавитися не тільки в соплі, але і в термобор'єрі, то утворюватиметься

«пробка» (розм'якшена ділянка пластику), яка не зможе проштовхнути пластик у соплі через свій агрегатний стан.

Для того щоб отримати холодну зону з різким відсіканням від гарячої, розробники екструдерів часто використовують вставки з тефлону, алюмінієвий радіатор, активне охолодження, а також матеріали з низькою теплопровідністю, наприклад, нержавіюча сталь. Всі ці заходи можуть застосовуватися як усі разом, так і окремо.

Час перебування пластику в розплавленому стані теж мінімізується, бо багато термопластиків втрачають пластичність після тривалого перебування при високих температурах, а тверді частки, що утворюються, можуть забити сопло.

Що стосується сопла, зазвичай сопла виготовляють із латуні або алюмінію. Найпоширеніший діаметр сопла 0,4 мм, але їх розміри можуть варіюватись від 0,1 мм до 1,2 мм.

Чим менший діаметр сопла, тим роздруковані моделі виходять якісніші, але витрачається більше часу. Залежно від завдань підбирається оптимальний діаметр (рис. 1.5).

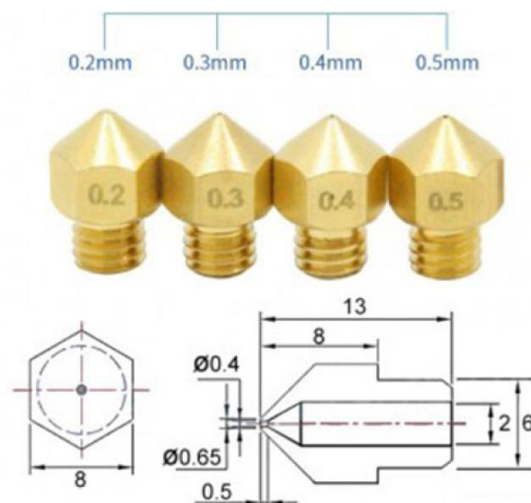


Рисунок 1.5 – Будова та вигляд латунного сопла [11]

Щільність заповнення – це відсоток об’єму заповнення внутрішнього простору деталі матеріалом філаменту, заповнення може мати різні форми, розміри та типи, що безпосередньо впливає на міцність і масу деталей [9].

Різні типи заповнення використовуються в частинах для створення міцної та довговічної внутрішньої конструкції. Зазвичай використовуються шестикутні, ромбові та лінійні шаблони заповнення (рис. 1.6).

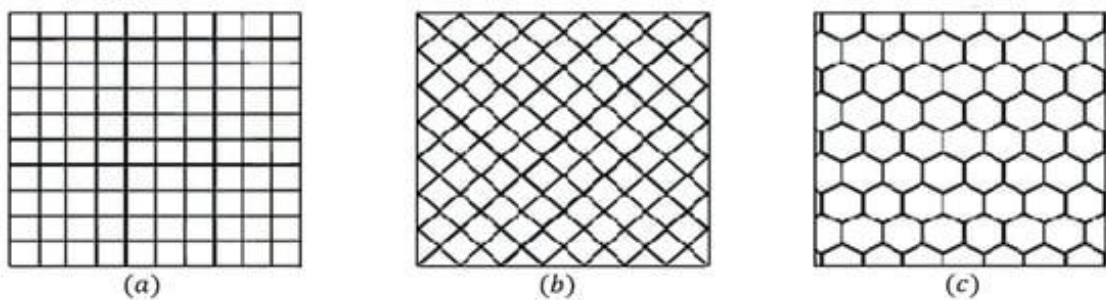


Рисунок 1.6 – Схема заповнення: (а) лінійна; (б) алмаз; (в) шестикутна

Товщина шару – це параметр який регулює шорсткість поверхні, висота нанесених шарів уздовж осі Z, яка зазвичай є вертикальною віссю машини FDM. В залежності від діаметру сопла цей параметр може змінюватись та по-різному впливати на якісні характеристики отриманої поверхні [9].

Швидкість друку – це відстань, яку проходить екструдер уздовж площини XY за одиницю часу під час екструдування і вимірюється в мм/с.

В результаті, на саму процедуру друку методом наплавлення (FDM) впливає чимало різних параметрів, підсумовані вони на рис. 1.7 [12].

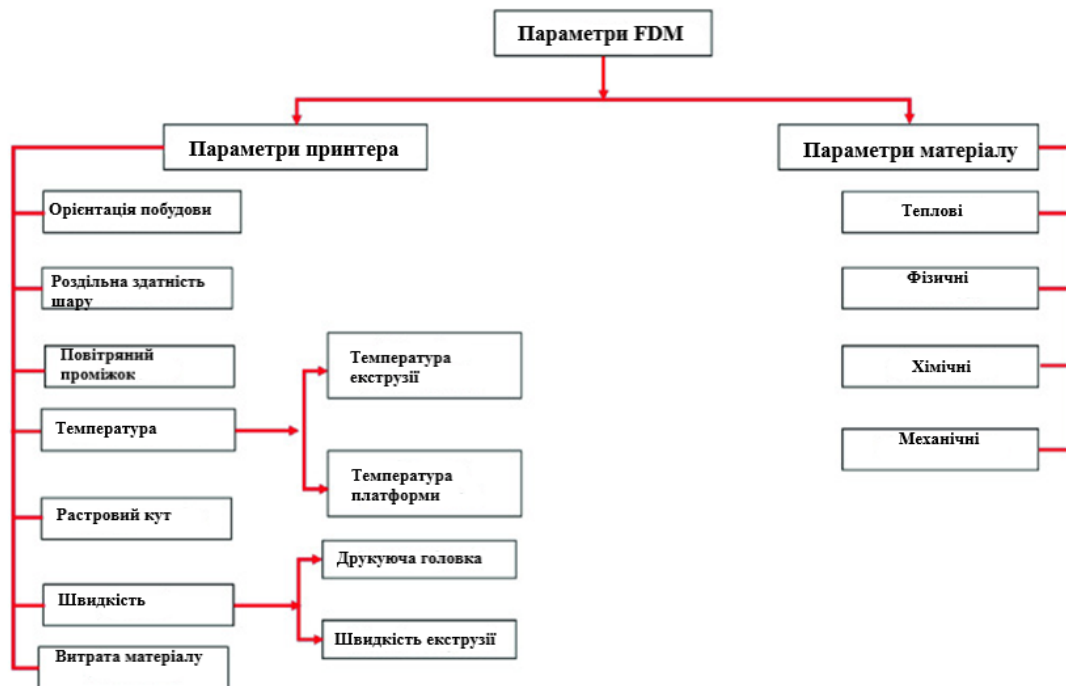


Рисунок 1.7 – Параметри, що впливають на процес FDM 3D-друку

1.3 Види та принцип роботи FDM 3D-принтерів

На основі технології FDM побудована велика кількість принтерів з різноманітними типами кінематики.

Принтери типу Delta, CoreXY, H-bot, SCARA та стрічкові відносяться до декартової класифікації та рухаються за координатами X, Y, Z.

Проте їх здебільшого не характеризують як "картезіанські", оскільки вони суттєво відрізняються за своїми характеристиками, будовою та принципом роботи та мають більш конкретні терміни опису (рис. 1.8) [12].

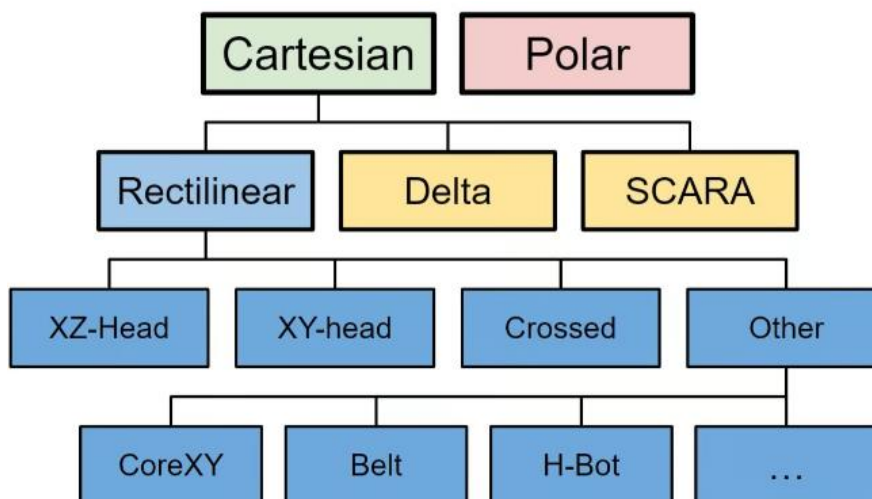


Рисунок 1.8 – Види принтерів FDM принтерів та інтерпретація зв'язків між ними

Класифікація принтерів як "декартових" стає неінформативною, оскільки більшість FDM-принтерів відносяться до цього типу. Розглянемо та проаналізуємо кожен з семи типів принтерів, враховуючи їх системи координат, механічні особливості, кінематику та принцип роботи [12].

3D-принтери типу Polar, відзначаються використанням альтернативної системи координат, полярних координат (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – 3D-принтери типу Polar

На відміну від інших принтерів, що розглядались, полярні 3D-принтери використовують полярну систему координат, подаючи точки на круглу сітку, а не прямокутну. В даному випадку, у двох вимірах полярні принтери оперують кутом і відстанню, а не відстанями X і Y , для розташування точок відносно початку координат.

Принтери Polar використовують круглу обертову платформу для друку об'єктів шар за шаром. Під час руху ручки друкуючої головки вздовж осі Z ця обертова платформа обертається, забезпечуючи необхідний рух для створення об'єкта [13].

Такі типи декартових принтерів як Delta та SCARA вирізняються своїми механічними особливостями: Delta використовує три координаційні руки, а SCARA фактично і являється рукою робота.

3D-принтери типу Delta представляють собою підтип принтерів FDM, що використовують декартові координати для визначення просторового положення. Невдовзі розглянути ці технології зазнали деяких відмінностей від традиційних прямолінійних принтерів (рис. 1.10) [12].

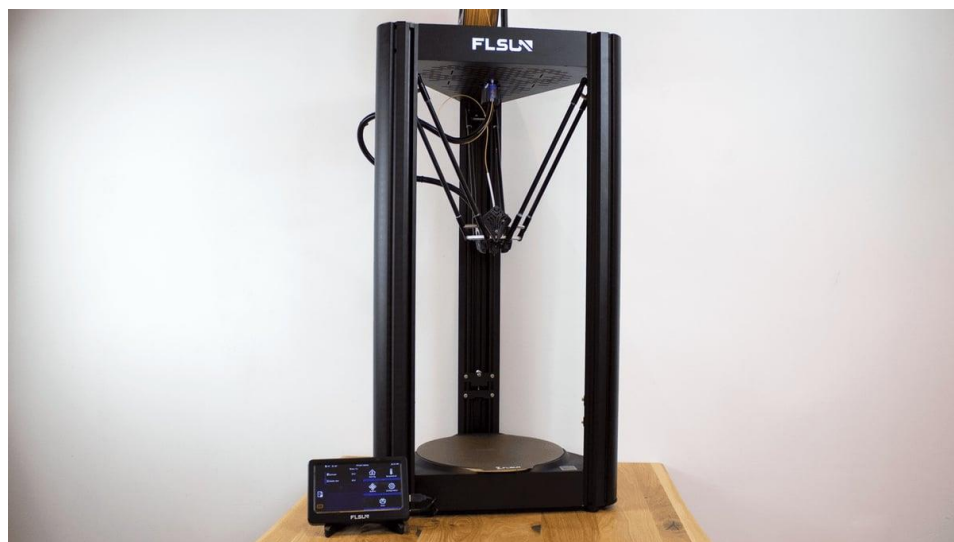


Рисунок 1.10 – FDM 3D-принтер типу Delta [14]

Механіка роботи 3D-принтерів Delta заснована на використанні трьох або більше кронштейнів, які прив'язані до вертикальних рейок.

Друкуюча головка з'єднана з кінцями кожного кронштейна за допомогою петель, а їх рухи спільно визначають положення друкуючої головки відносно друкувальної поверхні в просторі XYZ.

Механічно відрізняючись від інших FDM-принтерів, 3D-принтери Delta керують рухом друкуючої головки за допомогою рухомих направляючих, не зафіксованих осей. Водночас, їхня операційна система координат залишається такою ж, як і в інших декартових принтерах (рис. 1.11) [12].



Рисунок 1.11 – Друкуюча голова 3D-принтера типу Delta з кронштейнами

Наступним видом FDM 3D-принтерів є 3D-принтери типу SCARA.

Принтери SCARA, використовують декартову систему координат, але вони визначаються своєю особливою механічною будовою, що нагадує маніпулятор та цим відрізняє їх від інших підтипів.

Ключовою особливістю принтерів SCARA є обладнання маніпулятора друкуючою головкою, що приводиться в рух двома двигунами. Ці двигуни, приєднані до зв'язок, відповідають за переміщення головки по площині XY, а третій двигун керує рухом уздовж осі Z. Останній відповідає за підняття усієї системи зв'язок із друкуючою головкою для кожного наступного шару під час друку (рис. 1.12) [12].

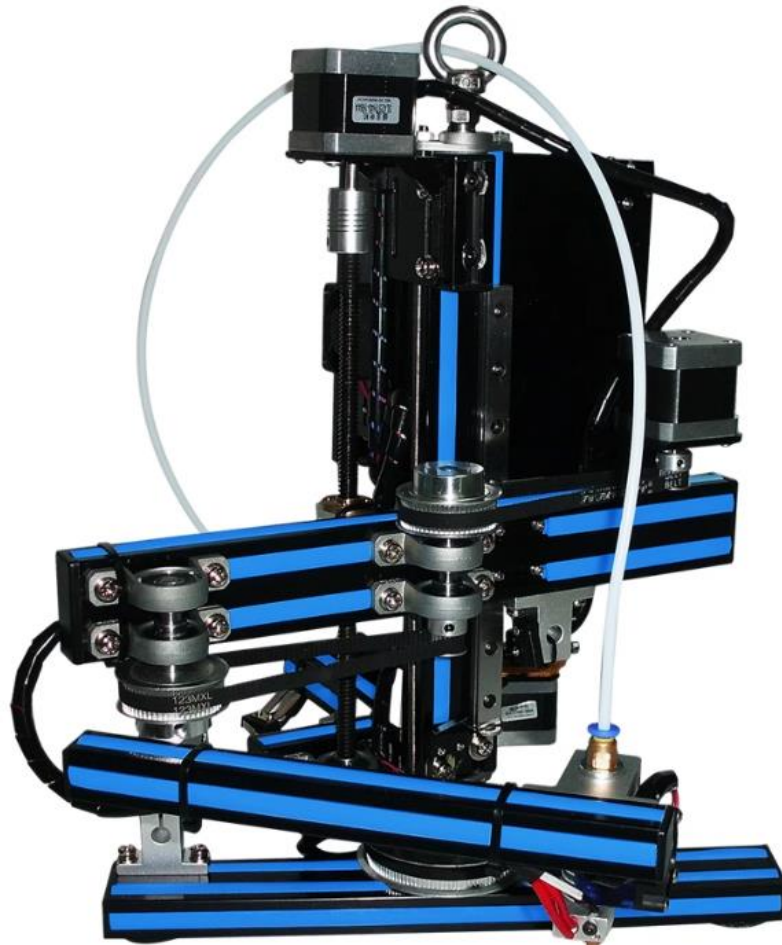


Рисунок 1.12 – FDM 3D-принтер SCARA [15]

Скоординований рух цих елементів дозволяє точно контролювати положення друкуючої головки в просторі, керуючи висотою осі Z і розташуванням осям XY відносно друкувальної поверхні. Принципова особливість полягає в тому принтери SCARA вирізняються від інших типів FDM-принтерів унікальною системою управління рухом друкуючої головки в площині XY, побудованою на рухомих кінцівках, а не фіксованих осях.

Декартові принтери, включаючи загальні види, такі як XZ-головка, XY-головка та спеціальні стилі, як H-bot, CoreXY, стрічкові принтери, характеризуються квадратними або коробчастими рамками та лінійними напрямними.

Розглянемо прямолінійні принтери. Це типові представники FDM 3D-принтерів, часто позначені як "декартові".

Прямолінійні принтери є найпоширенішими серед 3D-принтерів, використовуючи прямокутні рами та лінійні осі. Серед підтипів є принтери з декартовою XZ-головкою, перехрещеними принтерами у стилі UltiMaker та консольними принтерами, які часто зустрічаються в компактних моделях, таких як Prusa Mini та Mini+ (рис. 1.13) [12].



Рисунок 1.13 – Прямолінійний принтер з XZ-головкою фірми Prusa

Прямолінійні принтери використовують лінійні рухи вздовж осей X, Y і Z для позиціонування друкуючої головки та створення тривимірного об'єкта. Друкуюча головка зазвичай рухається вздовж осі X або Y, яка в свою чергу переміщується вздовж осі Z. Рух може варіюватися залежно від конкретного принтера.

Крім того, прямолінійні принтери, на відміну від непрямолінійних, використовують прості лінійні рухи для позиціонування сопла відносно робочої поверхні. Ці принтери часто мають квадратну або прямокутну форму, і рух по одній осі не залежить від руху по інших осях.

Принтери CoreXY, представляють новий тип FDM 3D-принтерів. Ці принтери класифікуються як декартові за системою координат, але вони використовують математичну систему руху, що робить їх відмінними від традиційних декартових моделей (рис. 1.14) [12].



Рисунок 1.14 – FDM 3D-принтер за типологією CoreXY

Принцип руху в принтерах CoreXY базується на використанні системи ременів і шківів для координованого переміщення екструдера в площині XY (рис. 1.15).

Ця концепція включає в себе використання двох крокових двигунів, які контролюють кожен ремінь, сприяючи точному позиціонуванню головки [16].

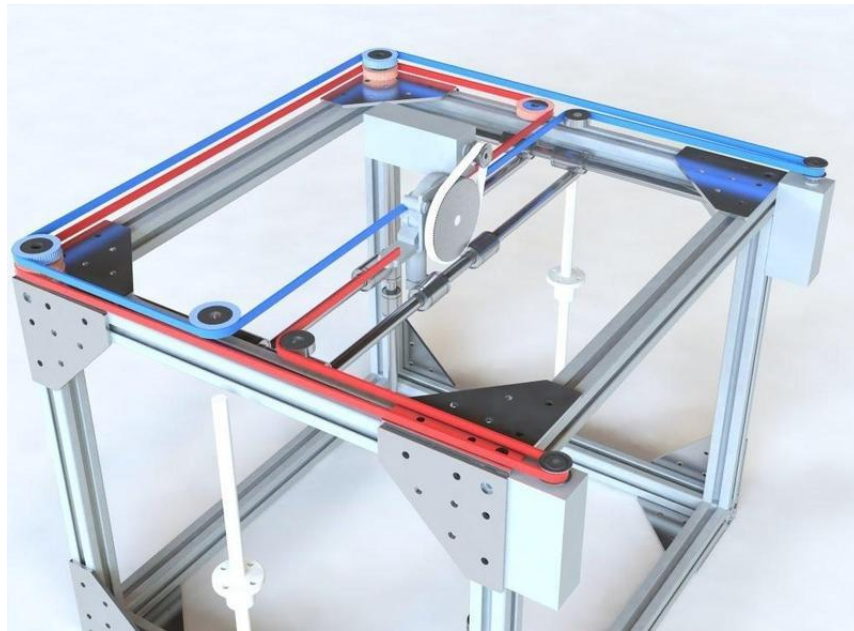


Рисунок 1.15 – Система руху в FDM 3D-принтерах за типологією CoreXY

Одночасно друкуюча платформа розташована на системі переміщення по осі Z на лінійних направляючих. Ця система відповідає за вертикальний рух платформи, забезпечуючи можливість нанесення шарів матеріалу для формування необхідної деталі.

Характерно, що принтери CoreXY часто мають кубоподібну форму для досягнення максимальної стійкості у процесі роботи.

Принтери CoreXY дуже схожі на принтери типу H-bot. Навіть при чималій схожості, відзначається відмінність у системах ременів CoreXY, яка забезпечує менший крутний момент і навіть більшу стабільність у вигляді менших вібрацій.

Їх легко відрізнити за формою поясів, особливо при огляді зверху: пояс H-bot формує букву H, тоді як пояси CoreXY мають більше квадратну форму літери A (рис. 1.16) [16].

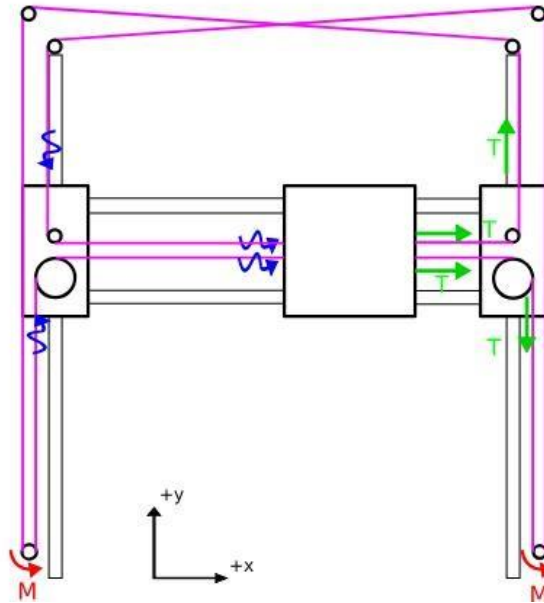


Рисунок 1.16 – Кінематика руху 3D-принтера типу CoreXY

В порівнянні з принтерами, що мають кінематику CoreXY, принтери H-bot мають подібну кінематику але мають один ремень, що кріпиться на екструдері, та відповідно рухом двигунів та ременів приводиться в рух.

Коли обидва двигуни обертаються в одному напрямку, екструдер рухається вздовж осі X, коли вони обертаються в різних напрямках, екструдер рухається вздовж осі Y. Коли один із двигунів не рухається, екструдер рухається по діагоналі (рис. 1.17) [16].

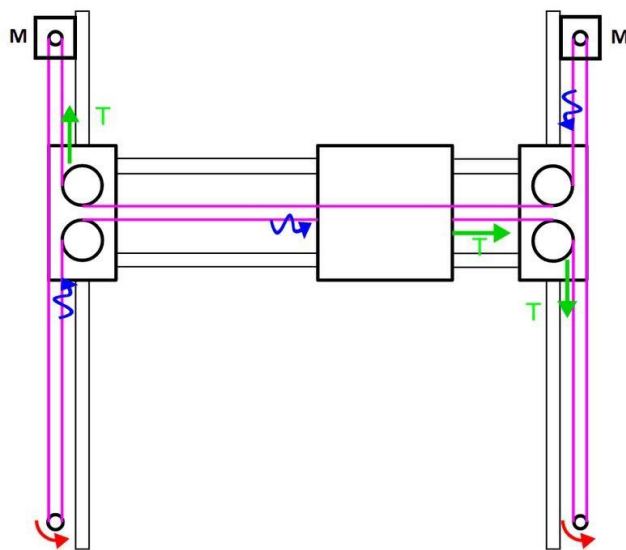


Рисунок 1.17 – Кінематика руху 3D-принтера типу H-bot

Незважаючи на відмінності, обидві машини відрізняються від інших прямолінійних принтерів, оскільки вони використовують ремені та шківи для переміщення друкуючої головки одночасно по двох осях.

Конвеєрні або ж стрічкові 3D-принтери особливі тим, що використовують рухливий ремінь, що функціонує як конвеєр, для переміщення друкуючої головки із залишками матеріалу через комбіновані осі Z і Y (рис. 1.18) [12].

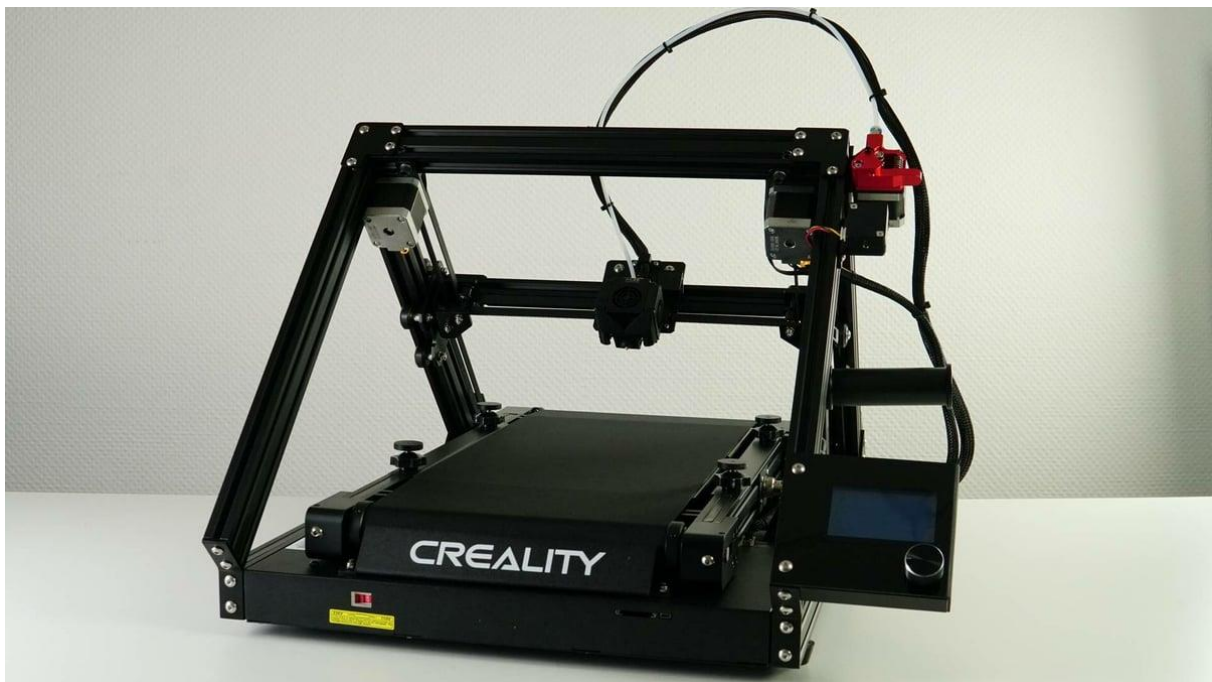


Рисунок 1.18 – Стрічковий FDM 3D-принтер

Конвеєрні 3D-принтери мають декартову систему координат, яка схожа з принтерами CoreXY, але мають раму нахилену під кутом 45 градусів, що робить цей принтер фактично системою CoreXZ.

На відміну від інших принтерів, де платформа рухається, у конвеєрних принтерів вона рухається неперервно. Ремінь переміщається вздовж осей Z і Y, а екструдер відповідає за додавання нового шару матеріалу для друку, рухаючись вздовж осі X [13].

Цей принцип дозволяє виготовляти довгі або нескінченно довгі об'єкти, такі як стрічки або труби. Постійний рух конвеєра забезпечує стійку подачу

матеріалу і дозволяє економити час, оскільки не потрібно чекати, доки платформа переміститься для наступного шару. Такі принтери можуть бути використані для виробництва серійних виробів або неперервного виготовлення деталей, що робить їх ефективними для деяких виробничих потреб.

Особливості стрічкових 3D-принтерів включають нахил осі Z, яку не мають інші типи принтерів, та використання унікального типу друкарської платформи, що має різноманітні функції. Важливо відзначити, що стрічкові принтери мають обмеження швидкості та не можуть працювати з нитками, що вимагають високотемпературного нагрівання [12].

1.4 Будова та принцип роботи FDM 3D-принтера

3D-принтер складається з кількох ключових елементів (рис. 1.19), кожен з яких виконує свою роль у процесі друку.

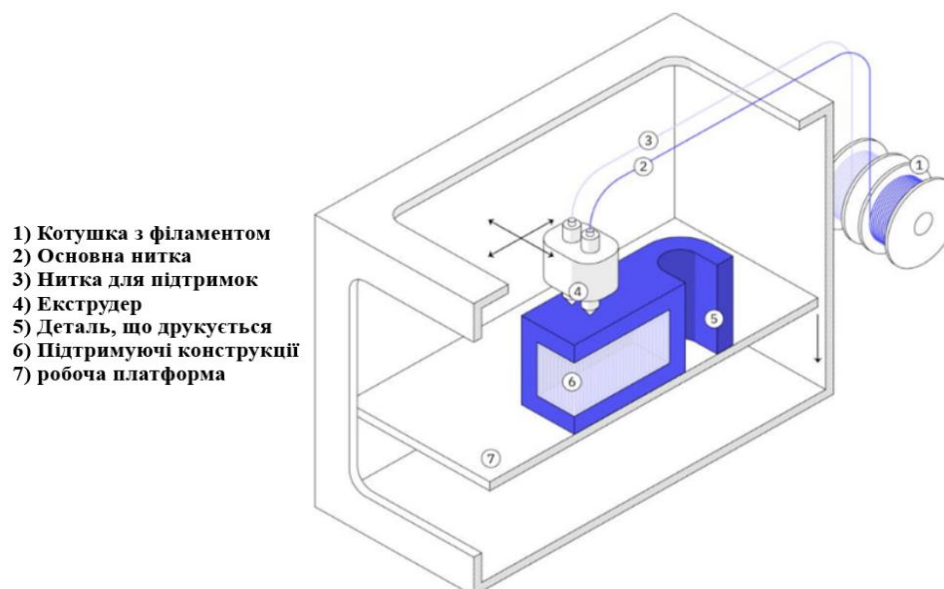


Рисунок 1.19 – Будова FDM 3D-принтера

Рама – це жорстка конструкція, яка утримує всі інші компоненти і забезпечує стійкість системи. Друкуюча головка – головний орган принтера,

який розташований на кінці рухомого механізму. Вона відповідає за розплавлення та нанесення матеріалу для створення об'єкта.

Робоча платформа – поверхня на яку кріпиться друкуюча деталь. Деякі платформи можуть мати нагрівачий елемент для поліпшення адгезії матеріалу. Екструдер – це механізм, який подає філамент у друкуючу головку.

Рухомий механізм – включає системи моторів, ременів, штанг та гайок, що відповідають за переміщення друкуючої головки та ліжка по трьох вимірах – X, Y, Z. Система керування – мікроконтролер або комп'ютер, що виконує програмне забезпечення для керування всіма рухомими частинами та друкарським процесом.

Інтерфейс – деякі 3D-принтери мають сенсорні екрани або кнопкові панелі для введення команд та моніторингу стану друку.

Живлення – блок живлення, який постачає необхідну енергію для всіх компонентів.

Ці елементи працюють у взаємодії для точного виготовлення тривимірних об'єктів з різних матеріалів.

Кінематика руху зображена на рисунку 1.20.

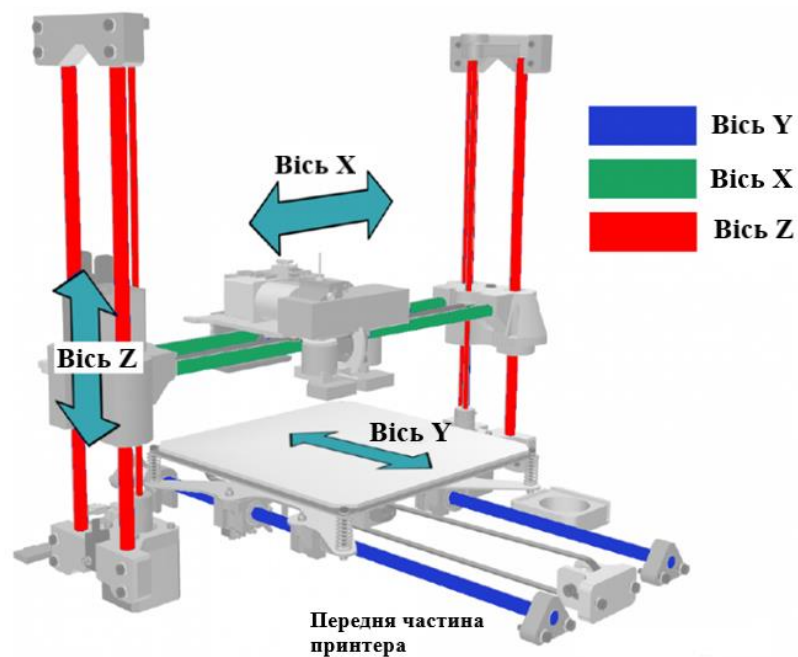


Рисунок 1.20 – Кінематика руху FDM 3D-принтера

Процес тривимірного друку досить простий. Рухомий екструдер формує перший шар розплавленого пластику, після чого платформа опускається на товщину шару [17].

Принцип роботи даної технології зображено на рисунку 1.21 [18].

Процес повторюється для наступного шару, який накладається на попередній. Після завершення друку кожного шару платформа опускається, продовжуючи цикл друку до виникнення готового об'єкта на платформі.

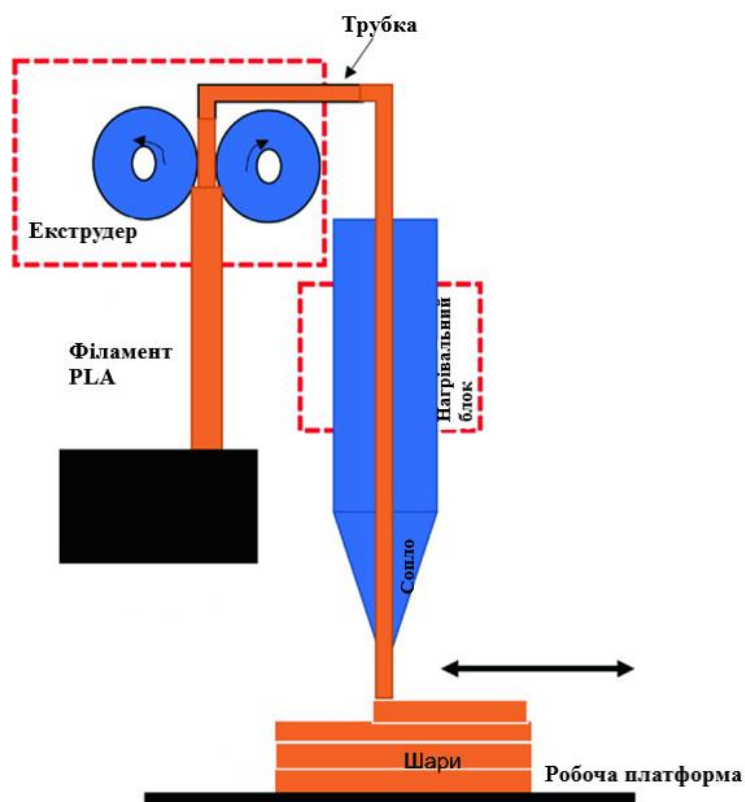


Рисунок 1.21 – Будова та принцип роботи FDM 3D-принтера

Екструдер є важливою частиною 3D принтера, яка фактично здійснює друк. Він складається з двох основних частин: корпусу з механізмом, що подає філамент, і хотенду [19].

Будова цих елементів може змінюватись конструктивно, але в цілому містять однакові базові компоненти:

- механізм подачі протягуючий механізм для подачі нитки в сопло;

- сопло, що служить для плавки нитки та екструзії розплавленого матеріалу;
- нагрівальний елемент для підігріву сопла;
- вентилятор;
- термобар'єр, що регулює температуру в зоні нагрівання.

У більшості 3D-принтерів використовується система прямої подачі, де кроковий двигун екструдера знаходиться в одному корпусі з екструдером, що друкує. Він проштовхує пластикову нитку безпосередньо в hotend – хотенд. Екструдери із прямою подачею називаються «direct» (рис. 1.22).



Рисунок 1.22 – Екструдер із прямою подачею

Другий тип екструдера називається «Bowden». Така модель екструдера відокремлює корпус з механізмом, що подає, від хотенду (рис. 1.23).



Рисунок 1.23 – Екструдер типу «Bowden»

Пластикова нитка подається віддалено від механізму подачі по PTFE трубці до хотенду. Такий екструдер дозволяє перенести важкий кроковий двигун разом із корпусом на раму 3D-принтера, тим самим полегшуючи вагу каретки з голівкою.

Полегшена каретка дозволяє переміщатися системі з вищою швидкістю, проте, щоб проштовхнути нитку по довгій трубці, двигуну потрібно більше зусиль.

Наступний конструктивний елемент FDM 3D-принтера, про який необхідно згадати – робоча платформа, на якій відповідно і відбувається процес друку моделі (рис. 1.24).

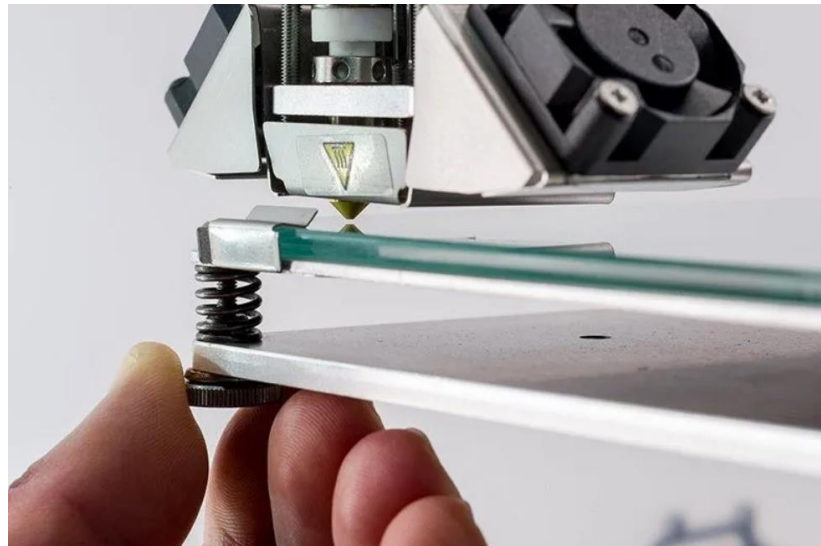


Рисунок 1.24 – Регулювальні гвинти столу

Матеріали, які застосовуються для виготовлення робочих столів дуже різноманітні. Серед них можна згадати алюміній та сталь, які підтримують можливість встановлення підігріву столу.

Популярним вибором останнім часом стало скло, що обумовлюється високою стійкістю до деформацій та легкості досягнення ідеально рівної поверхні при виробництві. Деякі виробники навіть використовують вулканічне скло через низьку теплопровідність, що дозволяє уповільнювати охолодження початкових шарів моделі.

1.5 Висновки до першого розділу

В першому розділі, проаналізували технології 3D-друку за принципом FDM. Проведений аналіз охопив вивчення переваг та недоліків адитивного виробництва загалом, розкриття його ключових особливостей та різноманітних видів. Було розглянуто та детально проаналізовано будову і принцип роботи різних типів 3D-принтерів, які використовують технологію FDM. При цьому було висвітлено їхні принципи функціонування та особливості в роботі.

Наша робота також включила визначення особливостей, переваг та недоліків самої технології FDM. Було проаналізовано параметри якості, які встановлюються для друкованих виробів, і розглянули вплив різних факторів на ці параметри. Висвітлено та досліджено якість друку та взаємозв'язок між параметрами та характеристиками об'єктів, виготовлених за допомогою технології FDM.

В цьому розділі нам вдалося широко розглянути технології FDM та розкрили різноманітні аспекти, що допоможуть у зрозумінні її застосування та можливостей у сфері адитивного виробництва.

2 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ДРУКУ БЕЗ ПІДТРИМОК В FDM 3D-ПРИНТЕРАХ

2.1 Недоліки друку з підтримками в FDM 3D-друці

Підтримки в 3D друці – це додаткові структури, які створюються під час друку для підтримання висячих або витягнутих деталей. Вони допомагають уникнути деформацій або обвалення деталі під час процесу друку, забезпечуючи стабільну опору для матеріалу, що наноситься.

Але при цьому, наявність підтримок можна вважати суттєвим недоліком у всьому процесі АМ, адже вони несуть за собою певні обмеження, щодо деталей, що друкуються [19].

По-перше, додавання підтримуючих конструкцій означає, що принтер витрачає додатковий час на їх створення. Це значно збільшує загальний час виготовлення деталі.

По-друге, якість поверхні деталі, з якою суміжна опорна конструкція, зазвичай має дефекти та в цілому низька.

По-третє, деталь, що побудована з опорними конструкціями, вимагає додаткової постобробки та видалення підтримок, що також займає чималу кількість часу.

Також, використання опорних конструкцій вимагає додаткового матеріалу, що негативно впливає на фактор собівартості кожної друкованої деталі, а також збільшується кількість залишків матеріалу, які в подальшому буде не можливо використати.

Хоча опорні конструкції і вирішують проблеми пов'язані з створенням елементів, що нависають або мають складну геометрію, але важливо розуміти їхні обмеження та вплив на якість кінцевого виробу. Тому існує необхідність уникати або принаймні зменшувати кількість опорних структур у FDM 3D-друці.

Підтримки зображені на рисунку (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Підтримувальні конструкції та готовий виріб

Наприклад, на цифровій моделі, що розглядається, друк розпочинається знизу, і ті частини, які контактують з робочою платформою, легко друкуються. Але якщо є елементи, які висять у повітрі і не мають контакту з платформою, для екструдера немає опори, щоб закріпити наступний шар та виникає проблема провисань або зміни початкових розмірів [19].

За структурою підтримки можна розділити на два основні види: вертикальні та деревоподібні. Деревоподібні дозволяють економити на матеріалі, полегшують постобробку і підходять для більшості структур, що нависають (рис. 2.2) [20].

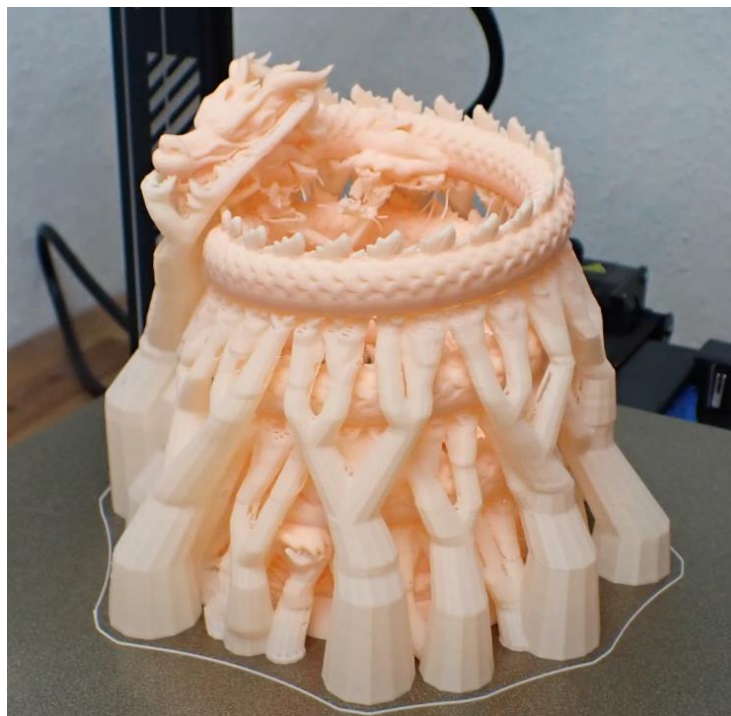


Рисунок 2.2 – Використання деревоподібних підтримок в 3D-друці

Лінійні ж дають більш щільну площу контакту і тому добре підходять навіть у найскладніших випадках, але ціною підвищеної витрати матеріалу та більш трудомісткої постобробки з підвищеним ризиком пошкодження поверхонь моделей (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Використання лінійних підтримок в 3D-друці

Задача вибору між лінійними та деревоподібними підтримками в 3D друці визначається рядом переваг та недоліків кожного виду. Лінійні підтримки мають більш спрощену структуру побудови і їх перевага в легкості видалення. Їхня проста конструкція також може сприяти швидшому процесу друку [19].

Однак лінійні підтримки можуть залишати сліди або подряпини на поверхні деталі, що може вплинути на якість отриманої деталі. Також, вони є менш стабільними для великих та важких деталей.

Деревоподібні підтримки, в свою чергу, забезпечують більш естетичний вигляд заготовки, особливо для складних та деталізованих моделей. Вони забезпечують кращу стабільність для великих та важких деталей.

Проте, видалення деревоподібних підтримок може бути більш складним та часомістким процесом порівняно з лінійними. Також, деревоподібні

підтримки можуть залишати дефекти на поверхні деталі після видалення, але їх вплив на поверхню зазвичай менший порівняно з лінійними.

У випадку наявності в 3D-моделі виступаючих ділянок або містків, необов'язково використовувати підтримки. Важливо дотримуватися двох основних критеріїв при прийнятті рішення, щодо застосування підтримок. Якщо кут нахилу не перевищує 45 градусів і довжина містків не перевищує 5 мм, то використання підтримок не обов'язкове (рис. 2.4).

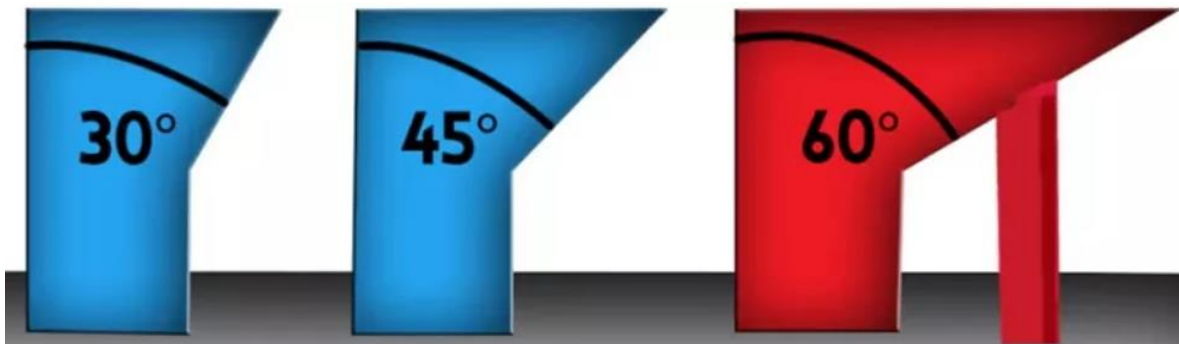


Рисунок 2.4 – Можливі варіанти друку з підтримками та без них

FDM 3D-принтери не вміють друкувати в повітрі, але вони здатні укладати шари зі зміщенням – так, щоб нова нитка лише частково спиралася на попередній шар. Якщо спирається хоча б половина ширини нової нитки, цього має бути достатньо. Якщо ж більше половини нависає, тут вже виникає ризик просідання, а тому потрібна підтримка.

Це є основною перешкодою, яка заважає друкувати деталі, що вимагають точності, адже після такого друку необхідне видалення підтримок, а цей етап доволі сильно може вплинути на точність поверхні кінцевого виробу.

Приблизно те саме і з містками: якщо дві вертикальні ділянки моделі з'єднані горизонтальним сегментом довжиною не більше 5 мм, швидше за все, підтримки не знадобляться. Якщо ж довжина перевищує п'ять міліметрів, матеріал, що ще не охолонув, може просісти під власною вагою, а значить знову ж, краще подбати про опорні структури.

2.2 Методи та засоби друку на FDM 3D-принтерах без підтримок

Існує 4 способи уникнути використання підтримуючих структур при FDM 3D-друці. Перший способом є модернізація екструдера та сопла шляхом нахилу під 45 градусів та додавання однієї або декількох осей обертання, приклад зображено на рисунку 2.5 [21].

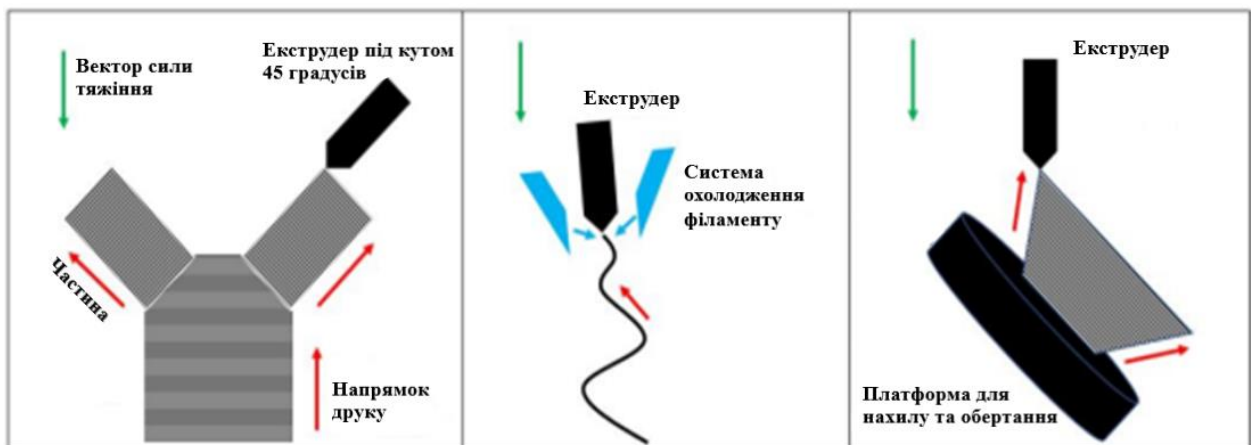


Рисунок 2.5 – Способи вирішення 3D-друку з підтримками

Такий спосіб можливий в 3D-принтері, який має 4 або більше вісей. У цьому випадку деталь, що створюється, ділиться на частини, таким чином для їх побудови не потрібно використання підтримок.

Працює це наступним чином: перша частина деталі друкується спочатку в звичайному режимі, в перпендикулярному положенні відносно робочої платформи. При початку друку іншої частини, яка створюється в іншій площині, робоча платформа змінює положення, а екструдер переорієнтовується і деталь будується так само і в такому ж положенні, як у звичайному процесі 3D-друку.

Один з таких варіантів реалізувала група німецьких дослідників. Їх рішення нахилити сопло друкуючої головки й інтегрувати додаткову вісь обертання.

У прототипі, до стандартного 3D-принтера додана рухома вісь обертання Z за допомогою якої сопло може обертатися. Крім того, сопло розташоване під кутом 45 градусів до рухомої робочої платформи, а не за звичайної перпендикулярної установки (рис. 2.6) [22].

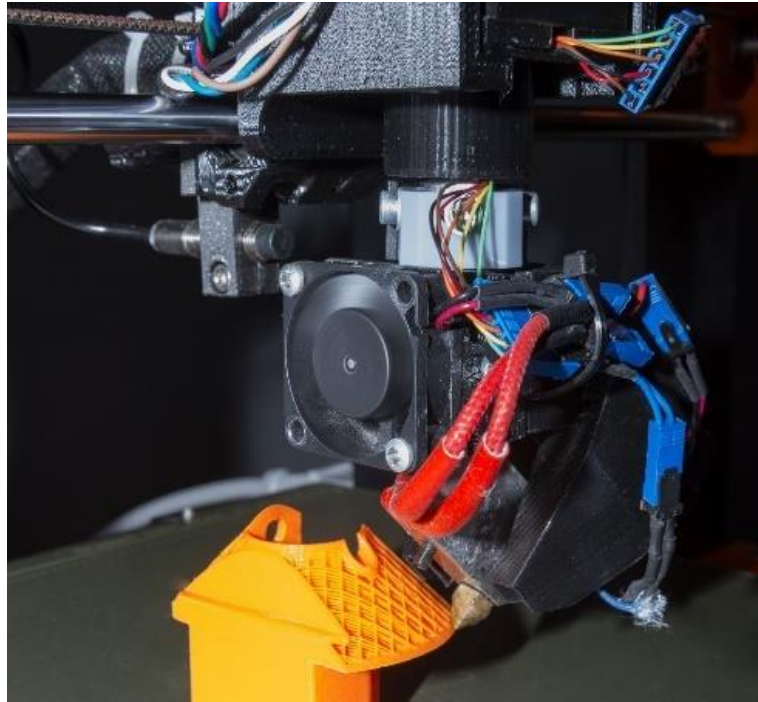


Рисунок 2.6 – Прототип, що дозволяє друкувати без підтримок

Така технологія 3D-друку без підтримок може бути реалізована на наявних принтерах за допомогою простого набору інструментів та деталей для модернізації.

Поворотне сопло означає, що потрібно менше матеріалу та суттєво скорочується час друку, також повністю виключається постобробка, тобто видалення допоміжного матеріалу.

Варто зауважити, що це дозволяє наносити шари таким чином, щоб підтримуючі конструкції не були потрібні для переважної більшості виступаючих елементів. Це особливо корисно для порожнистих деталей, де видалення матеріалу заповнення може бути особливо проблемним, а також для деталей з складною геометрією та деталізацією [22].

Також, існує інший варіант модернізації 3D-принтера.

В даному варіанті, було модернізовано Delta 3D-принтер, шляхом додавання 3-х кронштейнів осей для робочої платформи, фактично перетворивши її в Delta принтер, але перевернутий (рис. 2.7) [22].



Рисунок 2.7 – 6 осевий 3D-принтер [22]

Цим самим вирішивши питання друку деталей з навісними елементами без жодних підтримок, адже принтер просто повертає горизонтальну деталь зі складними виступами у вертикальне положення.

Процес роботи даної моделі принтера зображено на рисунку 2.8.



Рисунок 2.8 – Процес друку 6 осевого 3D-принтера без підтримок [22]

Принцип роботи принтера ґрунтується на тих же принципах що і в Delta принтерах, але при цьому до нижньої платформи додано 3 двигуни, які в свою чергу кріпляться до нижніх рухомих кронштейнів, та забезпечують їх рух, даючи можливість друкувати на нахиленій робочій платформі майже під кутом 90 градусів (рис. 2.9).

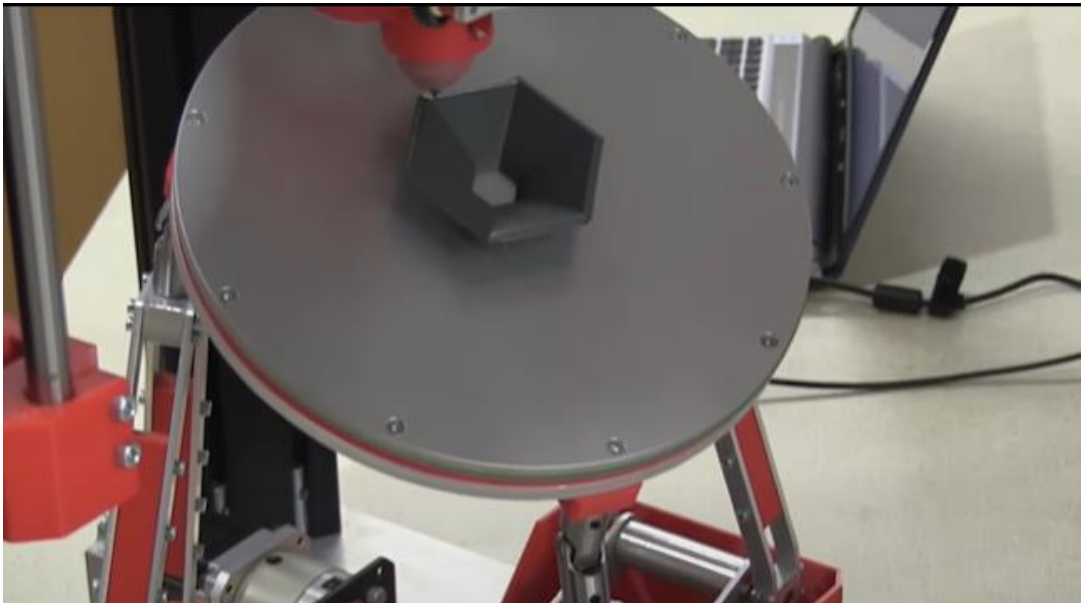


Рисунок 2.9 – Процес друку на нахиленій робочій платформі [22]

Другим способом є розробка та модернізація екструдера шляхом впровадження додаткового потужного охолодження філаменту, що наноситься (рис. 2.5). Також необхідно розробити абсолютно нове програмне забезпечення, адже стандартні програми для слайсингу не зможуть реалізувати щось подібне.

Інженерам довелося вирішити низку проблем, зокрема, нерівномірну подачу матеріалу і вібрації, а також вплив екструдера, що зростає, при роботі на більш високих шарах деталі, таким чином його вдалося компенсувати за допомогою програмного коду.

Такий спосіб дозволить будувати деталі будь-якої форми без підтримок, тому що матеріал швидко застигає та не провисатиме (рис. 2.10).



Рисунок 2.10 – Друк нависаючих конструкцій без підтримок

Пропонується друкувати новий шар не поверх попереднього, як в звичайній технології FDM друку, а відразу на матеріалі, що подається, тобто з більш боковим пятном контакту, ніж у звичайній технології, при цьому швидкість друку необхідно зменшити до 2 – 5 мм/с (рис. 2.11).

Завдяки своїм властивостям філамент ABS і PLA розплавляється і твердне весь час за тих самих умов. Подаючи матеріал дуже повільно, екструдер рухається з тією ж швидкістю, а вентилятори охолоджують пластик майже миттєво, він переходить в твердий стан як єдине ціле.



Рисунок 2.11 – Друк без підтримок у повітрі

Також, існують FDM 3D-принтери з двома екструдерами, які можуть в поєднанні з іншими технологіями, допомогти у вирішенні проблеми друку з підтримками (рис. 2.12) [23].

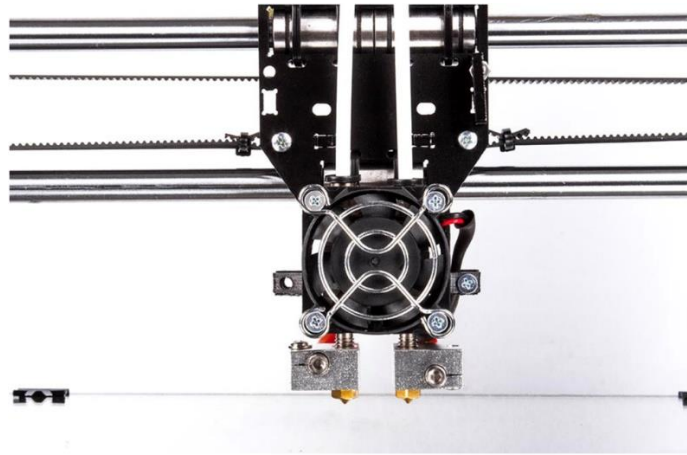


Рисунок 2.12 – FDM 3D-принтер з двома екструдерами

Ці принтери дають можливість друкувати деталі двома різними матеріалами водночас, особливо актуально в даному випадку, адже перший екструдер може друкувати заготовку основним матеріалом, а другий буде орієнтований на друк лише підтримок, за допомогою філаменту для 3D-друку, який, наприклад, розчиняється у воді (рис. 2.13) [23] [24].



Рисунок 2.13 – Процес використання водорозчинного філаменту PVA

Друк підтримок за допомогою 2-х екструдерів і розчинюваного у воді матеріалу є досить цікавим методом. Після завершення друку виріб

поміщається у воду, і матеріал підтримки розчиняється, залишаючи тільки вибрану форму (рис. 2.14).

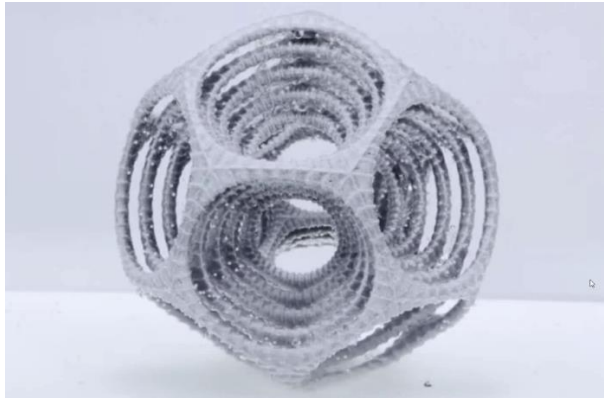


Рисунок 2.14 – Модель, що надрукована з водорозчинними підтримками [24]

Розчинні нитки для підтримуючих структур мають наступні переваги порівняно з використанням нерозчинних ниток.

Простота видалення підтримки. Оскільки підтримки розчиняються, необхідно просто занурити модель у відповідний розчинник і почекати, доки підтримки не зникнуть. Це дуже корисно для деталей із дуже складною формою та високим рівнем деталізації.

Поліпшена якість поверхні контакту. Оскільки матеріал легко видалається, можна створити міцну основу області, де потрібні опори, що дозволяє отримати гладку поверхню без залишків нитки.

Менше необхідності у постобробці моделі. Можливість друкувати складні 3D-моделі з високою якістю поверхні завдяки використанню розчинних ниток також знижує потребу у виконанні завдань подальшої обробки, таких як полірування, шліфування, склеювання та ін.

Це дозволяє створювати більш складні геометрії без необхідності вручну видаляти підтримку після друку. Використання водорозчинного матеріалу для підтримки може полегшити процес обробки друку та підвищити якість кінцевого виробу.

Але при цьому, залишається недолік підвищеного використання філаменту підтримок, що у випадку, якщо деталь має складну форму, буде означати підвищену собівартість виготовлення деталі.

Четвертий спосіб являє собою модифікацію в якій до стандартної робочої платформи впроваджується 2 або 3 осі обертання, а екструдер залишається стандартним з 3 осями руху та перпендикулярною установкою (рис. 2.5).

Даний спосіб є більш перспективним, через свою простоту складання а ефективність друку.

2.3 Аналіз будови 5-осьового FDM 3D-принтера

Трьохосьовий принтер модифікований за рахунок додавання двох осей, осей обертання V і U для формування п'ятиосьового принтера FDM. Додавання двох осей дозволяє друкарській платформі обертатися та забезпечує більшу свободу руху у всіх напрямках час процесу п'ятиосьового друку.

Модернізований за такою технологією та має наступні налаштування структури обертання: V обертається вздовж осі X, а U обертається вздовж осі Z (рис. 2.15).

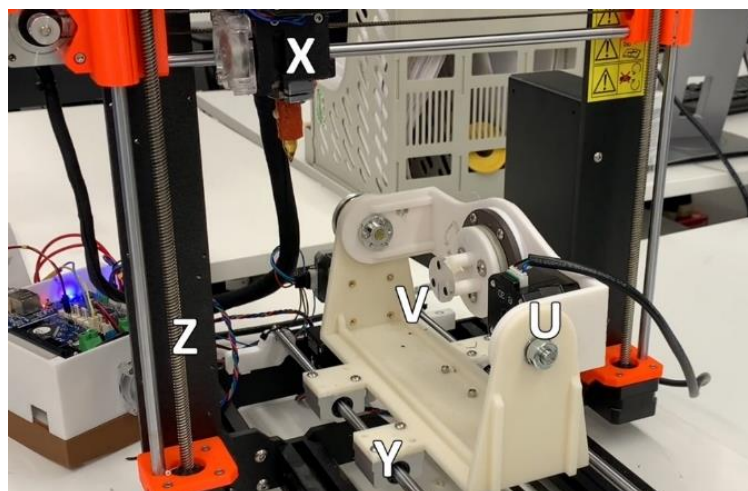


Рисунок 2.15 – 5-осьовий FDM 3D-принтер з двома додатковими осями [25]

У процесі зазначеної конструкції важливо відзначити, що екструдер, незважаючи на відсутність нахилу під кутом, як у його попередника, володіє унікальною властивістю.

Він здатний обертати робочий стіл як по осі Z, так і по горизонтальній осі X, що дає йому можливість друкувати на будь-якій площині заготовки, навіть при наявності виступаючих елементів деталі.

Детальна будова повертаючої установки з осями V та Y наведена на рисунку 2.16.

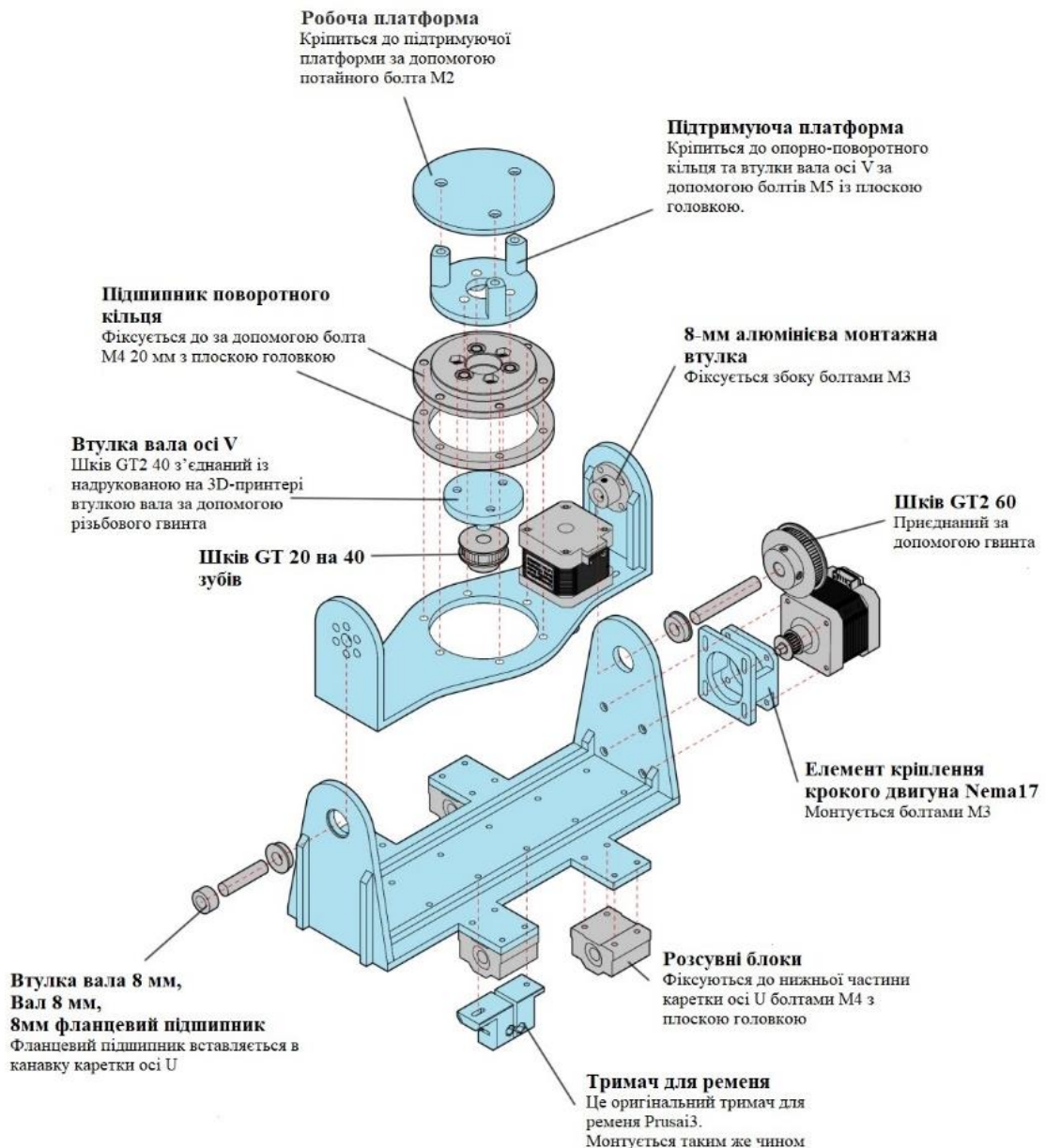


Рисунок 2.16 – Будова осей обертання V та Y [25]

Важливо відзначити, що всі компоненти були попередньо надруковані на звичайному FDM 3D-принтері, а необхідні металеві запчастини та інші деталі були придбані в інтернет-магазинах.

Зазначимо, що дана модель принтера була складена на основі FDM 3D-принтера Prusa i3 MK3s. Вибір цього принтера обумовлений його простотою та гнучкістю щодо можливості внесення модифікацій у сам принтер.

Принцип руху осей такого принтера показано на рисунку 2.17.

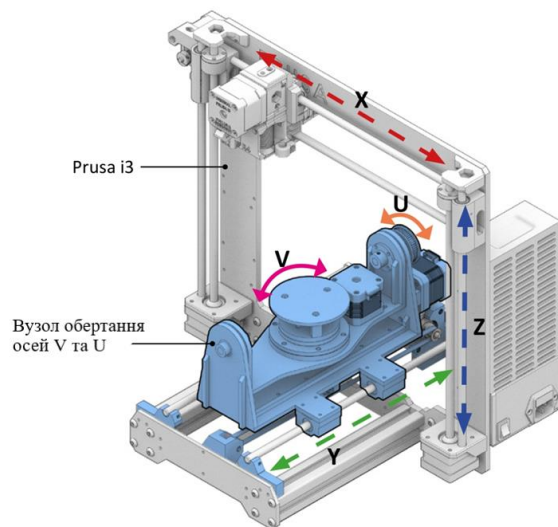


Рисунок 2.17 – Принцип руху осей 5-осьового FDM 3D-принтера [25]

Структурна схема процесу генерації G-коду представлена на рисунку 2.18.

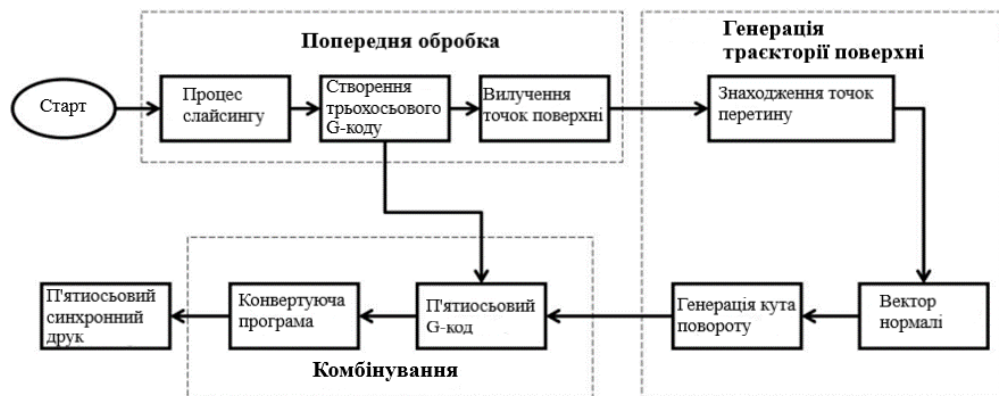


Рисунок 2.18 – Структурна схема процесу генерації G-коду

Спочатку обробляється траєкторія друку 3D-моделі. Це схоже на створення G-коду при звичайному процесі 3D-друку. Потім фільтруються необхідні дані з G-коду, що стосуються процесу вилучення точок поверхні деталі. Точки друку та точки поверхні сортуються одночасно, як показано на рис. 2.19, та зберігаються в окремі набори. В даний час існує безліч видів програмного забезпечення для автоматизованого 3D-проектуювання та друку [26].

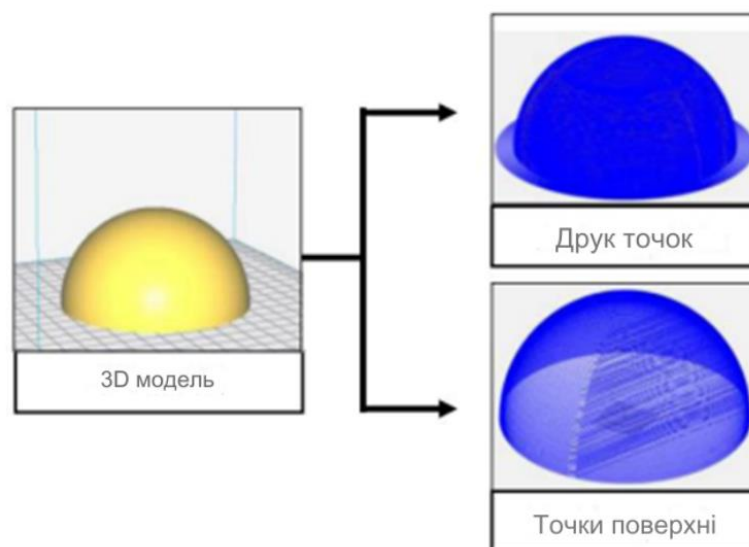


Рисунок 2.19 – Процес обробки G-коду для побудови траєкторії руху

Сукупність точок друку утворює траєкторію друку 3D-моделі. Надрукована модель є цільовим об'єктом обробки поверхні.

З іншого боку, набір точок поверхні, який є оболонкою 3D-моделі, підготовлений для генерації кутів повороту A в алгоритмі генерації траєкторії поверхні.

По-друге, генерація траєкторії друку поверхні є основою завдання п'ятиосьового друку. G-код п'ятиосьового друку складається з точок друку і точок траєкторії поверхні, які містять кут повороту, що є фінальною частиною комбінації в блок-схемі на рис. 2.18 [26].

2.4 Висновки до другого розділу

У даному розділі було проведено детальний аналіз недоліків, що можуть виникати під час друку з використанням підтримок, а також висвітлено різні можливі шляхи та методи усунення цих проблем. Основна увага приділена аналізу прототипів 3D-принтерів із технологією FDM, які дозволяють виконувати друк без використання підтримок.

В рамках дослідження ретельно розглянуто різноманітні прототипи FDM 3D-принтерів, які вирізняються здатністю до друку без необхідності використання підтримок. Кожен з цих пристроїв був ретельно проаналізований з метою визначення його переваг та недоліків у контексті уникнення проблем, пов'язаних із застосуванням підтримок.

Під час дослідження вдалося визначити найоптимальніший варіант для вирішення проблем, пов'язаних із друком з використанням підтримок. Було детально розглянуто його будову, структурну схему та принцип роботи, щоб визначити, наскільки ефективно цей пристрій може бути використаний для усунення проблем при друку з підтримками.

Отже, у результаті аналізу вибрано та проаналізовано ідеальний прототип 3D-принтера, який дозволяє здійснювати друк без використання підтримок, і подано вичерпну інформацію щодо його переваг та можливостей вирішення проблем, що виникають під час друку з підтримками.

3 МОДЕЛЮВАННЯ 5-ОСЬОВОГО FDM 3D-ПРИНТЕРА

3.1 Моделювання елементів обертання 5-осьового FDM 3D-принтера

Для моделювання елементів основної модернізованої частини (рис. 2.16) 5-осьового FDM 3D-принтера було обрано середовище Fusion 360.

Fusion 360 має численні переваги, які роблять його привабливим для 3D-моделювання та проектування.

Інтегрована платформа дозволяє об'єднувати різні інструменти, забезпечуючи зручність роботи без необхідності переходу між різними програмами.

Параметричне моделювання дозволяє легко змінювати розміри та параметри моделі, що робить проектну роботу більш гнучкою.

Інтегрований модуль САМ спрощує програмування CNC-верстатів та виробничий процес. Вбудовані інструменти симуляції та аналізу допомагають передбачити поведінку моделі та визначити її властивості.

Також, у Fusion 360 доступна вбудована функція слайсингу для підготовки 3D-моделей до друку. Ця функція відома як "Make" та "3D Print". Вона дає можливість використовувати її для створення G-коду та оптимізації налаштувань друку.

Основні кроки використання вбудованого слайсера у Fusion 360 виглядають так:

- створення моделі;
- обрання об'єкта;
- запуск функції "Make" або "3D Print";
- налаштування параметрів друку, таких як розмір, орієнтація, тип матеріалу та інші. Fusion 360 надає можливість вибирати між різними параметрами для оптимізації друку;
- експорт G-коду.

Ця вбудована функція робить процес підготовки та слайсингу 3D-моделі в Fusion 360 більш зручним та інтегрованим, дозволяючи користувачам ефективно підготовлювати свої проекти для друку.

Розробку та моделювання почали з деталі каретки осі Y, яка має елементи для кріплення осі обертання U, яка відповідає за рух по осі Y (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Каретка осі Y з елементами для кріплення осі обертання U

До осі Y, а саме до 2 валів, що відповідають за рух по осі Y, каретка кріпиться за допомогою спеціальних ковзаючих блоків лінійного підшипника SC8UU (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Ковзаючі блоки лінійного підшипника SC8UU

Необхідно зазначити, що самі тримачі для 2 валів осі Y, також були змодельовані (рис. 3.3).

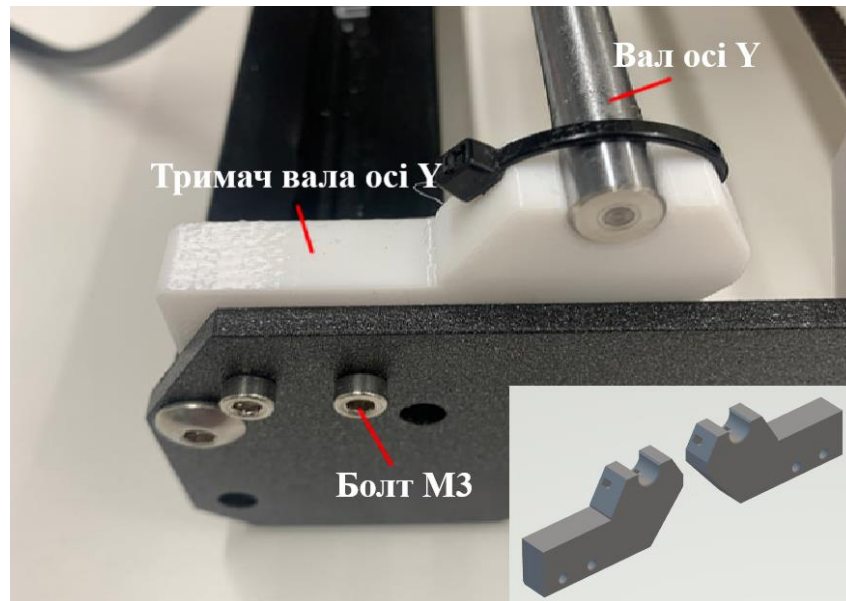


Рисунок 3.3 – Тримачі для 2 валів осі Y

Конструкція осі Y та принцип її роботи разом з розташованими на ній ковзаючими блоками лінійного підшипника SC8UU зображені на рисунку 3.4.

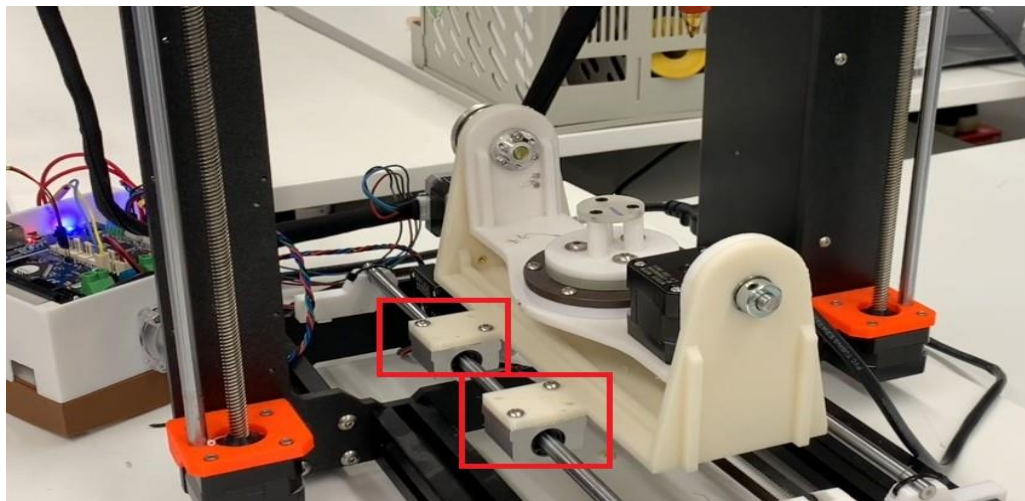


Рисунок 3.4 – Ось Y та ковзаючі блоки лінійного підшипника в конструкції принтера

Наступним ключовим елементом являється кроковий електродвигун NEMA 17 (рис. 3.5). Дана модель являється оптимальним варіантом, адже має чималу варіацію моделей двигунів, як і великих та потужних, так і тих, які чудово підходять для модернізації даного 3D-принтера.



Рисунок 3.5 – Кроковий електродвигун NEMA 17

Було обрано варіант двигуна, що має наступні характеристики:

- мінімальний кут обертання двигуна: $0,9^\circ$;
- номінальний струм: 1,68 А;
- довжина корпусу: 40 мм;
- довжина кабелю двигуна: 1 м.

Для фіксації двигуна до каретки було попередньо змодельовано деталь кріплення (рис. 3.6).

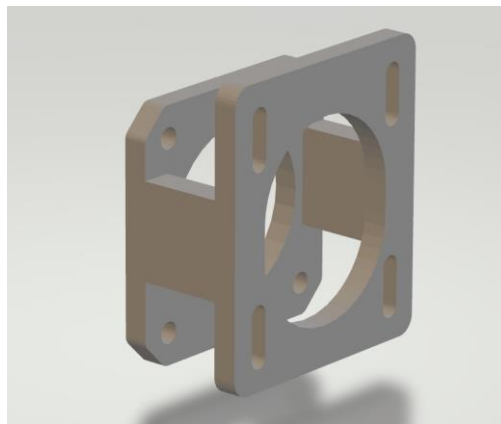


Рисунок 3.6 – Елемент кріплення електродвигуна до каретки

На валі двигуна буде закріплено алюмінієвий шків GT2 на 20 зубів з отвором 8 мм під вал двигуна, для ремінної передачі крутячого моменту двигуна (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Шків для валу двигуна GT2 20

А на каретці осі U, відповідно буде фіксуватись алюмінієвий шків GT2 на 60 зубів з аналогічним отвором під вал, який буде передавати крутячий момент безпосередньо на вісь U (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – Шків для валу двигуна GT2 60

Наступним кроком було змодельовано саму каретку осі обертання U, на якій відповідно згодом буде розміщено робочу платформу з віссю обертання V (рис. 3.9).



Рисунок 3.9 – Каретка осі обертання U з елементами для кріплення осі обертання V

На даному елементі моделі встановлюється компактний кроковий електродвигун NEMA 17 з аналогічним принципом кріплення і ремінною передачею як і для осі U.

Схема фіксації валу осі U зображено на рисунку 3.10.

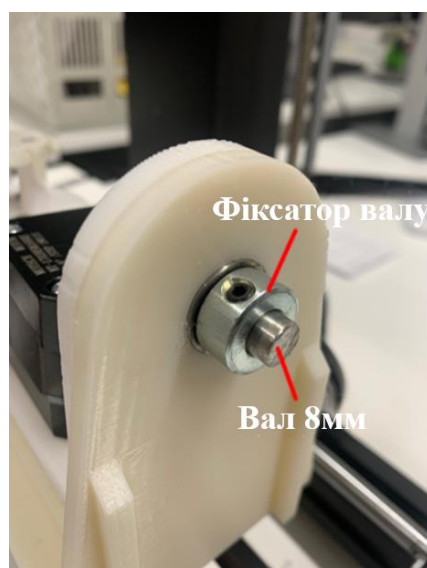


Рисунок 3.10 – Принцип фіксації валу обертання осі U

Наступним елементом було змодельовано втулку під шків осі обертання V, яка кріпиться безпосередньо на шків за допомогою фіксуєчих гвинтів на шківі (рис. 3.11).

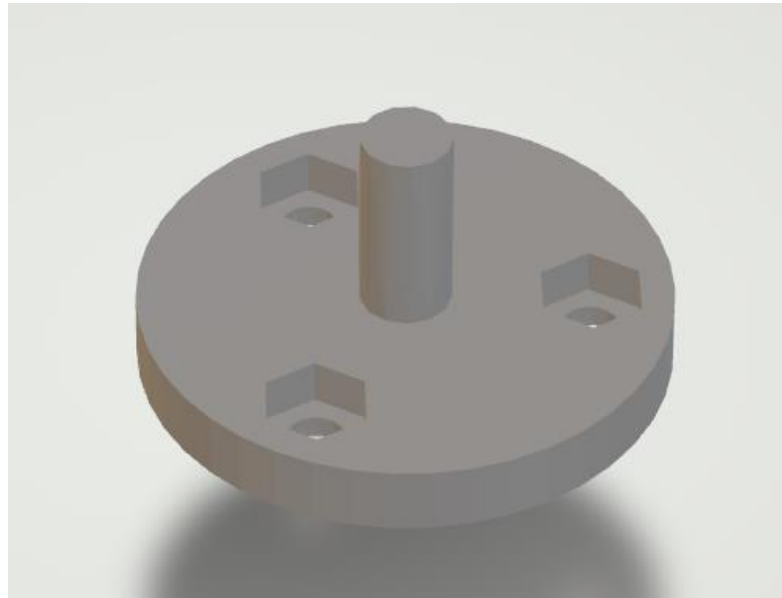


Рисунок 3.11 – Втулка під шків осі обертання V

Далі було змодельовано підставку під робочу платформу та саму платформу (рис. 3.12).

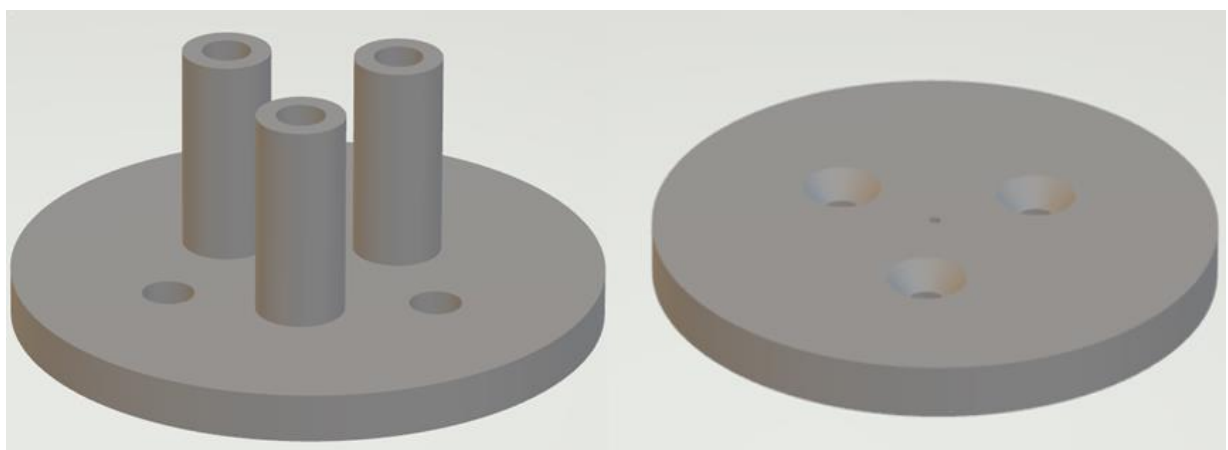


Рисунок 3.12 – Підставка під робочу платформу та сама платформа

Кінцева кількість елементів, що потрібна для збірки цього вузла показана на рисунку 3.13.

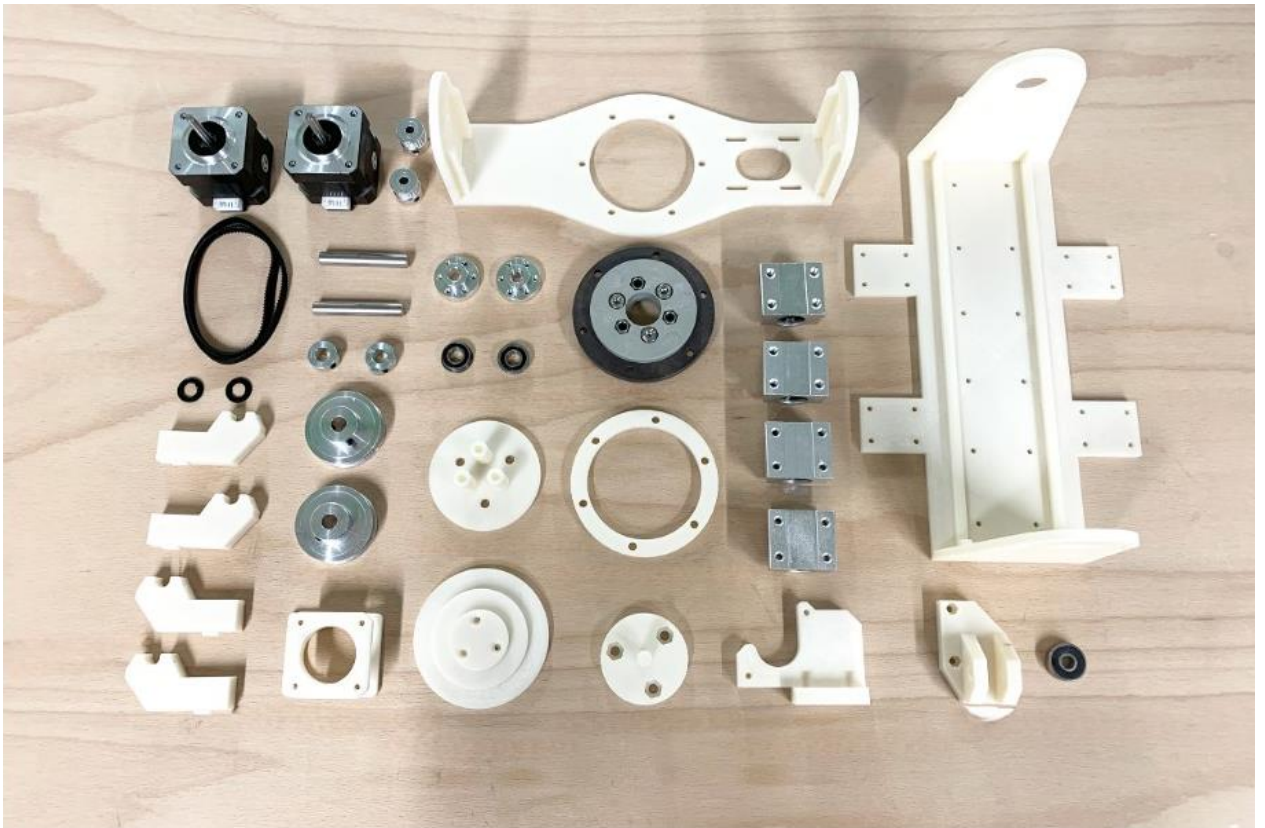


Рисунок 3.13 – Весь набір елементів для модернізації FDM 3D-принтера

В результаті моделювання маємо весь набір деталей, що потрібні для збірки та модернізації 3D-принтеру в 5-осьовий FDM 3D-принтер.

3.2 Електрична частина 5-осьового FDM 3D-принтера

Для прототипу розробленого 5-осьового FDM 3D-принтера заміняється оригінальна електронна плата Prusa i3 на плату для 3D-друку, сумісну з прошивкою RepRap, під назвою Duet 2 (рис. 3.14).

Duet 2 підтримує додавання плати розширення, що дозволяє встановити до 5 додаткових крокових двигунів. Для керування Duet 2 використовується прошивка RepRap версії 3.1.1.

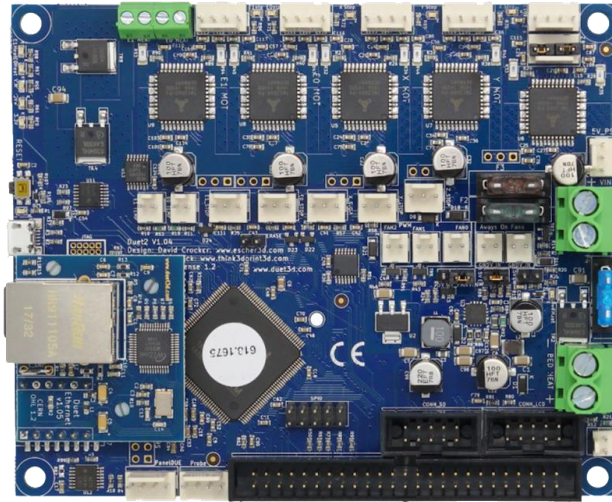


Рисунок 3.14 – Контролер Duet 2

Було реалізовано вихідний профіль верстата Prusa i3 за допомогою прошивки RepRap, а також додано новий профіль та конфігурації верстата, що відповідають даному 5-осьовому 3D-принтеру (рис. 3.15).

5-Axis Desktop 3DP Idle Send

Machine Status						Tools / Heaters					
Mode: FFF						Tool	Heater	Current	Active	Standby	
Head Position	X	Y	Z	U	V	Tool 0	Heater 1	25.4 °C	0	0	
	-79.10	0.10	0.00	0.00	0.00	T0	off				
Extruder Drives	Drive 0										
	0.0										
Speeds	Requested Speed		Top Speed								
	0 mm/s		0 mm/s								
Sensors	Vin		MCU Temp.		Z-Probe						
	23.7 V		30.8		1000						

Machine Control		Head Movement								Additional Axes								
Home All	Home X	< X-50	< X-10	< X-1	< X-0.1	X+0.1 >	X+1 >	X+10 >	X+50 >	Home U	< U-50	< U-10	< U-1	< U-0.1	U+0.1 >	U+1 >	U+10 >	U+50 >
Job Status	Home Y	< Y-50	< Y-10	< Y-1	< Y-0.1	Y+0.1 >	Y+1 >	Y+10 >	Y+50 >	Home V	< V-50	< V-10	< V-1	< V-0.1	V+0.1 >	V+1 >	V+10 >	V+50 >
G-Code Console	Home Z	< Z-25	< Z-5	< Z-0.5	< Z-0.05	Z+0.05 >	Z+0.5 >	Z+5 >	Z+25 >									
G-Code Files																		
Macros																		
Filaments																		
Settings																		

Рисунок 3.15 – Контролер Duet для 5-осьового 3D-принтера

Це контрастує з великою кількістю плоских слайсерів для плоских 3D-принтерів, які можуть легко генерувати G-код 3D-друку з бажаними налаштуваннями, такими як швидкість друку, висота шару та щільність заповнення.

За рахунок існуючих робіт з розрахунків траєкторії інструментів 5-осьового ЧПУ фрезера різними користувачами було створено власні конформні слайсери та вбудовано необхідне програмне забезпечення, що призначене для конформного 3D-друку.

В даному випадку інструмент конформного зрізу, розроблений за допомогою візуальних сценаріїв у Grasshopper, який використовується у програмному забезпеченні САПР Rhinoceros 3D. Перевагою використання Grasshopper є можливість створювати 3D-файли, розробляти конформні траєкторії інструменту, моделювати процес друку та експортувати G-код – все це в єдиному цифровому середовищі.

Процес нарізки складається з кількох етапів:

- створення конформної траєкторії інструменту;
- обчислення 5-осьової зворотної кінематики та траєкторії управління рухом;
- оптимізація 5-осьового руху для 3D-друку та експорт команд верстата у готовий до друку G-код.

В процесі створення траєкторії інструменту імпортується геометрія в Grasshopper. Після імпорту необхідно вибрати поверхню або геометрію, яка буде надрукована у 3D-форматі, і редактор автоматично генерує траєкторію інструменту на поверхні.

Параметри нарізки включають розмір сопла, висоту шару, висоту переміщення, напрямок малюнка заповнення тощо.

На відміну від декартового 3D-друку, при 5-осьовому друці сопло переміщується у 3D-просторі під час екструзії. Таким чином, довжина кожного сегмента визначає дозвіл конформного друку на додаток до висоти шару.

Було встановлено довжину сегмента, що дорівнює 0,2 мм, що приблизно вдвічі менше звичайного діаметра сопла для 3D-друку. Існує можливість змінювати параметри нарізки та перевіряти згенеровану траєкторію інструменту на екрані Rhino.

Як показано на рисунку 3.17, графічний інтерфейс конформного слайсера нагадує інтерфейс звичайних слайсерів для 3D-друку.

Щоб перейти від однієї траєкторії до іншої, потрібна функція відведення. Редактор траєкторій розраховує нормалі до поверхні в точках початку та кінця траєкторій, щоб визначити кут відведення. За потреби висоту ходу можна відрегулювати вручну, щоб уникнути зіткнення з підкладкою.

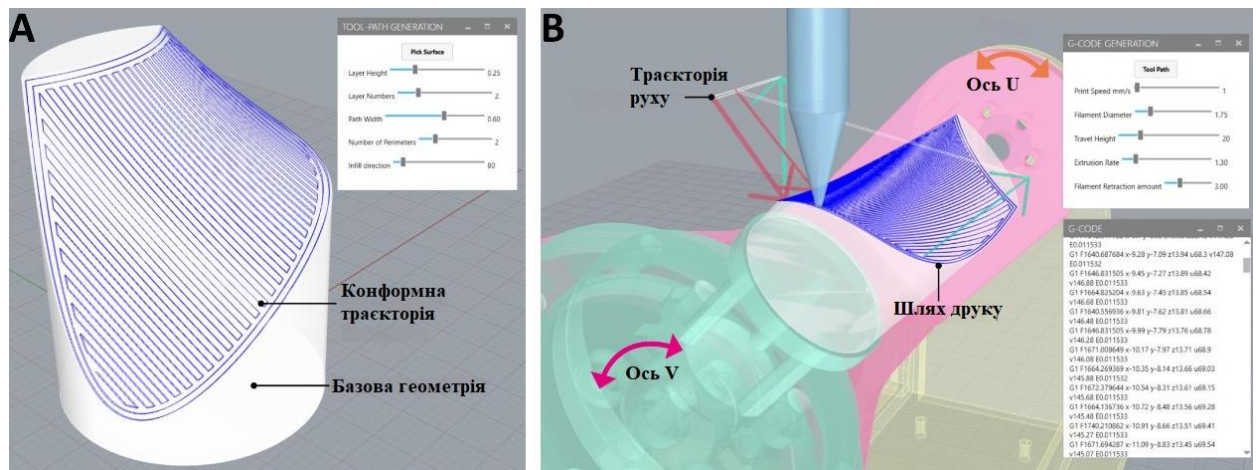


Рисунок 3.17 – Інструмент параметричного різання, інтегрований у Rhino3D: конформна траєкторія інструменту (а) та 5-осьовий генератор G-коду (б)

3.3 Генерація G-коду та кінематика

Після створення конформної траєкторії інструменту, потрібно налаштувати параметри машини, такі як швидкість друку, швидкість переміщення без друку, швидкість екструзії та ступінь втягування нитки.

Розрахунок G-коду, по траєкторії інструменту є більш складним у порівнянні з декартовим 3D-друком, особливо через величину осі Z, яка постійно змінюється.

Траєкторія інструменту розбивається на сегменти прямих ліній та точок, які визначають положення кінчика сопла. Початково визначається пряма кінематика, в якій положення точки на поверхні описано декартовими координатами (X, Y, Z) , а одинична нормаль поверхні в точці визначається як (I, J, K) , також заснована на декартових координатах.

Далі використовуються полярні координати та матриця обертання для виконання зворотної кінематики, а саме обертання ліжка та положення кінчика сопла.

Як показано на рисунку 3.18, ми використовуємо функції \arccos і atan2 , щоб знайти значення обертання θ_u і θ_v . Спочатку ми повертаємо початкову точку на θ_u на осі Y і повертаємо знову за допомогою θ_v на осі V . Напрямок осі V , що безперервно змінюється можна знайти за допомогою $[\sin\theta_u, 0, \cos\theta_u]$, описаного у векторних координатах. Ці два значення керують положенням наконечника сопла P' .



Рисунок 3.18 – Перетворення прямої кінематики в зворотню кінематику для 5-осьового FDM 3D-друку

На відміну від декартового 3D-друку, швидкість, з якою сопло рухається по поверхні підкладки, не корелює із швидкістю руху по кожній з осей. Для переміщення між двома точками по 5 осям відстань, яку необхідно пройти вздовж кожної осі, може бути значно більше або менше фактичної довжини сегмента. Це означає, що при 3D-друку по 5 осям, якщо всі осі налаштовані на

роботу з постійною швидкістю, швидкість сопла на поверхні підкладки буде постійно змінюватися.

Це в свою чергу впливає на процес екструзії та негативно впливає на якість друку. Щоб подолати цю проблему, для кожного сегмента, яким рухається сопло, розраховується співвідношення між загальною відстанню, яку принтер повинен подолати, і довжиною цього сегмента.

Було проаналізовано та взято розрахунки щодо оптимізації швидкості інструменту з літератури стосовно 5-осьового фрезерувального станка з ЧПУ. У розрахунку для визначення оптимальної швидкості було розглянуто обертальні рухи як лінійні та додано їх у необхідний розрахунок евклідової відстані.

Спершу знаходимо загальну Евклідову відстань між сегментами для всіх осей (3.1), включаючи виступ, використовуючи формулу:

$$d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 + \Delta u^2 + \Delta v^2 + \Delta e^2}. \quad (3.1)$$

Потім ділимо її на довжину відрізка, щоб знайти співвідношення між пройденою відстанню та довжиною відрізка.

Оптимізована швидкість друку (3.2) може бути досягнута шляхом множення бажаної швидкості друку на коефіцієнт компенсації швидкості, який дорівнює:

$$F' = F \cdot \frac{d}{l}. \quad (3.2)$$

Редактор G-коду Grasshopper також надає інформацію про швидкість кожної осі в будь-якій точці під час 3D-друку, щоб забезпечити, що швидкість осі не перевищує механічний поріг двигуна.

Окрім оптимізації швидкості, також впроваджено оптимізоване обертання друкарської платформи (ось V). Обертання станини визначається як

кут від 0 до 360°, але іноді це не дозволяє машині рухатися по найкоротшому маршруту.

Наприклад, якщо повернути з 355° на 1°, за замовчуванням буде створено шлях -354° замість +6°. Це збільшує час переміщення платформи і можливий ризик зіткнень.

Для вирішення цієї проблеми було реалізовано рішення відносної полярної координати, обчисливши дельти між абсолютними кутовими значеннями. Потім обробляються нові відносні значення за допомогою функцій *arcsin* і *sin*, щоб знайти найкоротший маршрут.

Всі ці розрахунки автоматично виконуються при імпорті траєкторії інструмента. Також можливо запустити візуальне моделювання процесу 5-осьового 3D-друку, прокручуючи моделювання в редакторі, щоб перевірити наявність потенційних зіткнень (рис. 3.19).

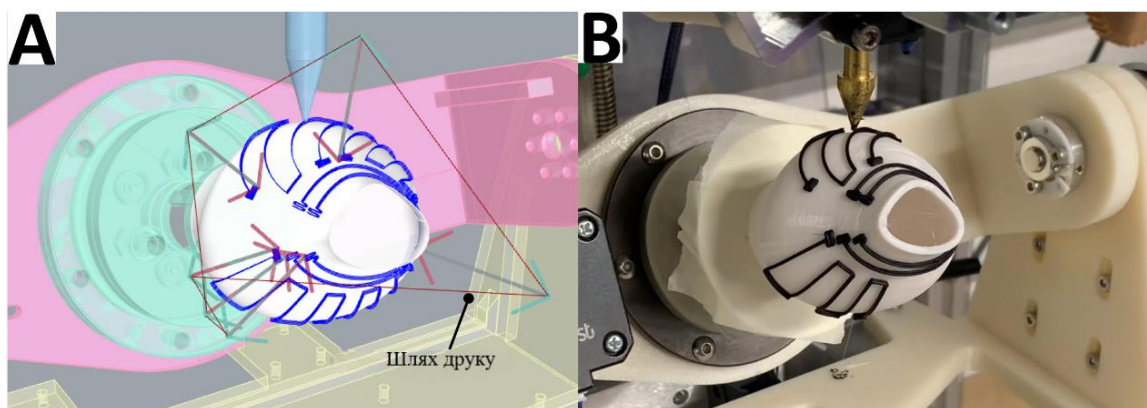


Рисунок 3.19 – Процес візуального моделювання (а), модель на принтері

У випадку чого є можливість змінювати висоту переміщення друкарської головки та швидкість друку в будь-який момент цього процесу.

3.4 Висновки до третього розділу

У даному розділі нашого дослідження було проведено вивчення та моделювання основних компонентів вузла 3D-принтера, де додатково були

впроваджені дві осі V та U. Процес цього моделювання включав у себе ретельний розгляд та аналіз трансформації існуючої 3D-моделі принтера, здатного працювати на основі п'яти осей (X, Y, Z, V, U). Також було акцентовано увагу на деякі переваги, що надає 5-осьовий конформний друк у порівнянні з традиційним 3D-друком.

Додатково, ми розглянули технологію конформного друку, подробиці якої включають аналіз та порівняння різних підходів до конформного друку. Особливий акцент був зроблений на конформному слайсері, який базується на графічному інтерфейсі та функціонує в популярному пакеті комп'ютерного-автоматизованого проектування Rhino.

Докладно проаналізовано кінематику 5-осьового FDM 3D-принтера та процес генерації G-коду для забезпечення його ефективної роботи. Розглянуті технічні властивості та переваги використання даної технології, що дозволяє розширити можливості 3D-друку та покращити точність та складність друкування об'єктів.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

4.1 Вплив технологічних параметрів на якісні показники

Для проведення експериментів було надруковано деталі за допомогою стандартної технології FDM, а також за допомогою технології 5-осьового друку.

Деталь, що надрукована 5-осьовою технологією друку нахилиється і обертається по двох додаткових осях для нанесення матеріалів на її поверхню. Друковані деталі, надруковані тільки в тривимірному режимі, назвемо моделями без покриття, а ті, що надруковані в режимі 5-осьового друку, називаються покритою моделлю.

Процес друку показаний на рисунку 4.1, зліва направо.

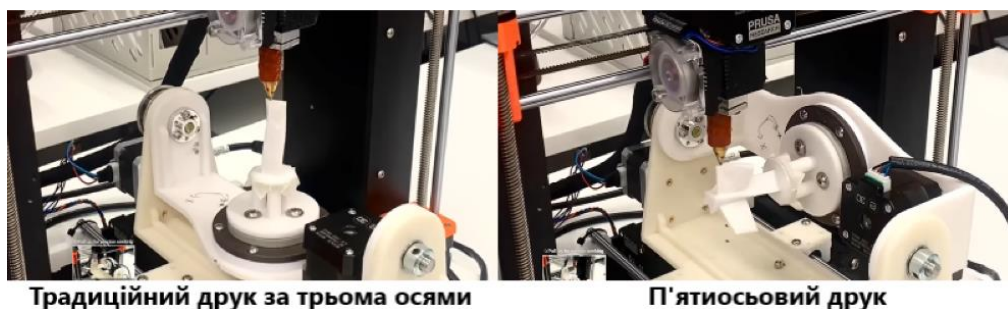


Рисунок 4.1 – Процес друку тестових зразків

На правому зображенні на рис. 4.1 показано, що зразок деталі нахилено під 90 градусів, щоб принтер міг нанести матеріал на іншу поверхню деталі.

Результати друку прямокутних деталей показані на рис. 4.2. У верхній частині зображено деталі, надруковані без нанесення додаткового матеріалу на поверхню, а внизу – деталі, що надруковані за технологією 5-осьового друку.



Рисунок 4.2 – Тестові зразки деталей

Використовували прямокутний зразок з різною орієнтацією друку і параметрами принтера для випробування на трьохточковий згин для дослідження міцності надрукованих деталей.

При випробуванні на вигин напрямок навантаження перпендикулярний до напрямку траєкторії поверхневого друку, як показано червоною стрілкою на рисунку 4.3.



Рисунок 4.3 – Напрямок траєкторії поверхневого друку перпендикулярний до напрямку друкованого шару

Існує багато досліджень, що використовують випробування на розтягнення для з'ясування факторів впливу, що впливають на міцність друкованих деталей. Стандартні зразки ASTM-D638 типу I, такі як «собачі кістки» є зразками для випробування на розтягнення [17], а результати трьохосьового та п'ятиосьового друку показані на рис. 4.4.

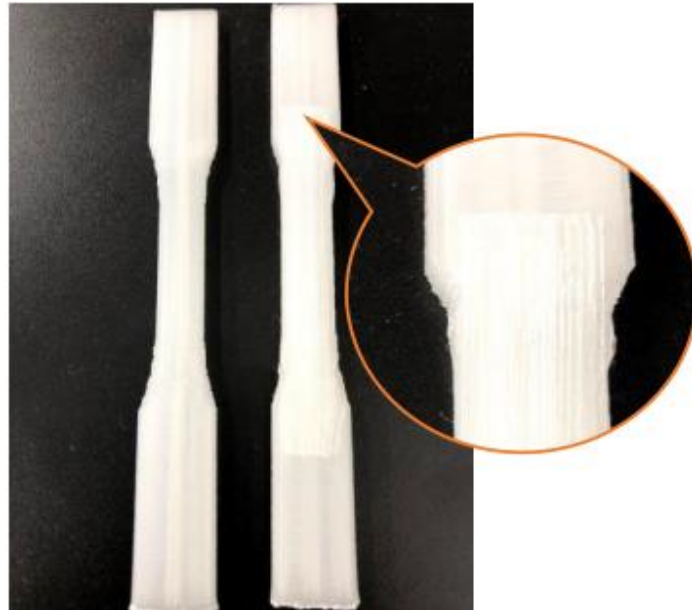


Рисунок 4.4 – Результат друку стандартного зразка, ASTM-D638 тип I

Зразок зліва надруковано в трьохосьовому режимі, а з правого боку – в п'ятиосьовому режимі. Збільшене зображення в помаранчевій рамці показує результат друку обробки поверхні.

У цій роботі на міцність надрукованих деталей впливають щільність заповнення та тип виготовлення, які є регульованими змінними. Щільність заповнення, тобто кількість друкованого матеріалу, що використовується для заповнення початково порожнього внутрішнього простору 3D-друку, має значний вплив на міцність надрукованих деталей.

В нашому випадку заповнення становить 20% і 50%, і в кожному з них надруковані зразки без покриття і з покриттям. Випробування на вигин і розтягнення використовуються для того, щоб довести, що міцність деталей,

надрукованих при п'ятиосьовій обробці поверхні, є кращою, ніж деталей, надрукованих при трьохосьовій обробці.

Розмір кожної надрукованої прямокутної деталі становить 8 мм × 30 мм × 130 мм.

На рисунку 4.5 показана схема установки зразка для випробування на трьохточковий вигин, помаранчеві точки це точки опори для розміщення зразка, а жовта точка це металевий стрижень, який використовується для підключення двигуна для створення зусилля навантаження.



Рисунок 4.5 – Принципова схема установки тестового зразка

Ідеальний варіант спеціально обладнаного верстата для випробування на вигин показано на рис. 4.6 (а). Прикладене навантаження вимірюється за допомогою датчика навантаження, що обладнаний під тестовою платформою.

В нашому випадку було використано звичайні ручні динамометри та стенди з обладнаними на них механізмами для створення тиску та відповідно навантаження.

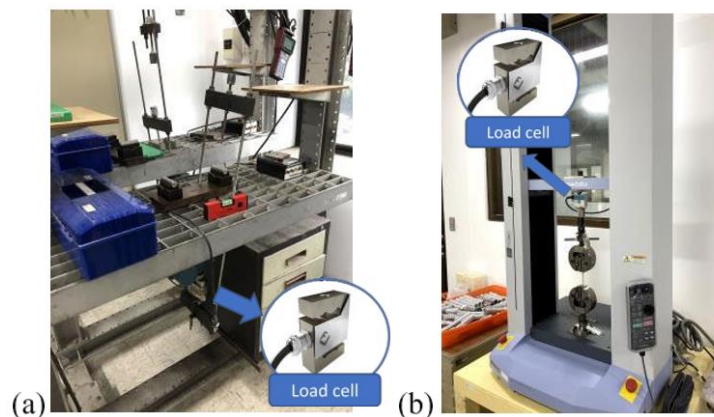


Рисунок 4.6 – Стенд для проведення тесту на вигин

Прикладене навантаження змінюється з кроком 0,5 кг/с. Випробування на згин проводять сім разів для кожного типу зразків, а прикладена величина навантаження фіксується при руйнуванні зразка.

Значення, що характеризують кожен тип зразка занесли у відповідну таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Отримані значення

Модель друку	Тип зразка	Відсоток заповнення (%)	Час друку (с)	Використання матеріалу (г)
Прямокутна частина	не покритий	20%	7598	13
		50%	12237	22.5
	покритий	20%	9296	17
		50%	13936	26
Зразок ASTM-D638 тип I	не покритий	20%	2482	5
		50%	3257	6
	покритий	20%	2997	6
		50%	3698	7

Після цього було проведено всі описані вище тести та симуляції та отримали наступні результати, які занесли до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Отриманні значення тестів зразків прямокутної частини

		Зразок №1	Зразок №2	Зразок №3	Зразок №4	Зразок №5	Зразок №6	Зразок №7
Не покритий	20%	8,5	8,7	8,8	8,6	8,35	8,9	8,4
	50%	19,1	19,25	19,4	19,15	19,5	19,2	19,3
Покритий	20%	24,35	24,2	24,15	24,3	24,5	24,12	24,18
	50%	31,4	31,2	31,3	31,1	31,3	31,2	31,4

Наступним кроком, з цих значень взяли середнє арифметичне кожного, та занесли в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Середні значення тестування кожного типу зразків

		Середнє значення (кг/с)
Не покритий	20%	8,5
	50%	19,41
Покритий	20%	24,4
	50%	31,41

Після чого з цих значень сформували діаграму, яка показує як відрізняються вихідні характеристики кожного типу зразка, при зміні всього лиш 2 змінних. Середнє прикладене навантаження при руйнуванні зразків показано на рисунку 4.7.

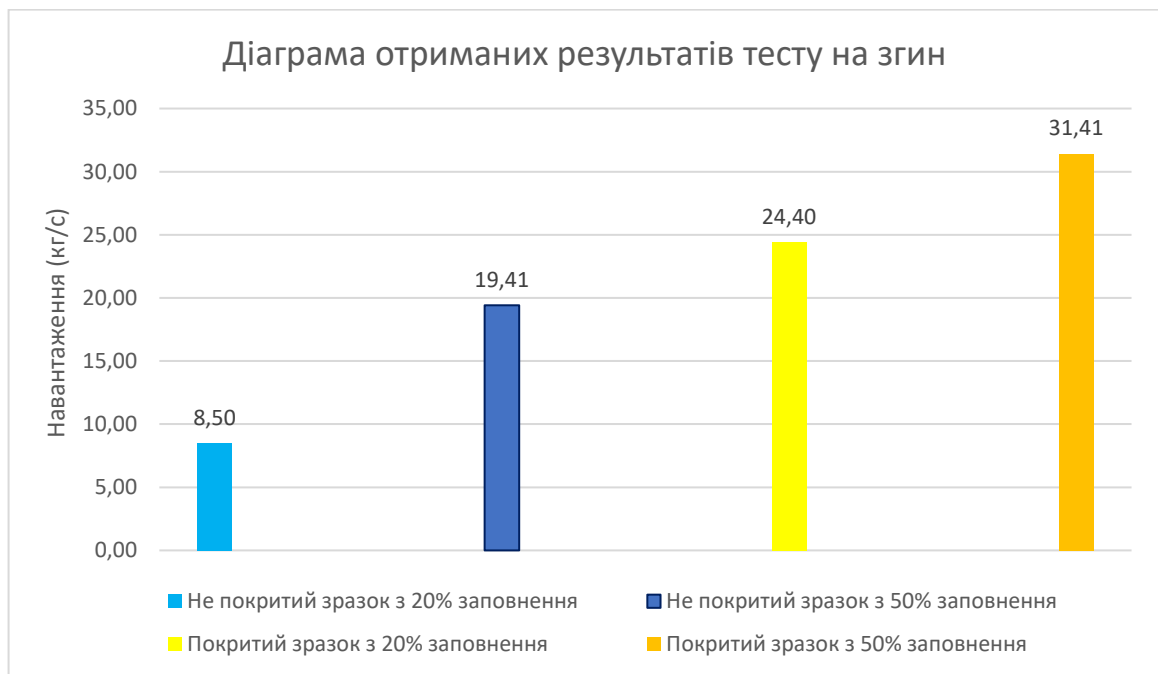


Рисунок 4.7 – Діаграма результатів тесту на згин

Синім відтінком позначаються стовпці, зразків із щільністю заповнення 20%, а жовтим відповідно з 50% заповнення. Згідно з результатами, покритий

зразок з 20% заповненням майже втричі міцніший за непокритий зразок, а зразок з 50% заповненням в 1,6 рази міцніший за непокритий зразок.

Випробування на розтяг в ідеальних умовах виконується на спеціальних верстатах обладнаних датчиками, що вимірюють значення в ньютонках, але в нашому випадку вимірювання проводились іншими методами, аналогічними до попередніх тестів, та вимірювались в кг/с.

Кожен типовий зразок при випробуванні на розтяг випробується п'ять разів. Дані з результатами тестів занесли до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати тестів на розтяг

		Зразок №1	Зразок №2	Зразок №3	Зразок №4	Зразок №5	Середнє арифметичне значення
Не покритий	20%	48,5	48	49,5	48,2	49	48,64
	50%	83,2	82	81,5	81,5	86	82,84
Покритий	20%	87,5	88	88,5	87,8	89	88,16
	50%	103	105,5	104,8	103,5	106	104,7

Прикладене навантаження при кожному типі зразка осереднюється і показано на рисунку 4.8.

Значення внизу кожного стовпчика це середнє значення прикладеного навантаження, коли зразок не витримує.

З нього видно, що покритий зразок витримує майже вдвічі більшу міцність, ніж непокритий, при випробуванні з 20% щільністю заповнення, а межа міцності на розрив 20% покритого зразка має майже такі ж результати, як і 50% непокритого зразка.

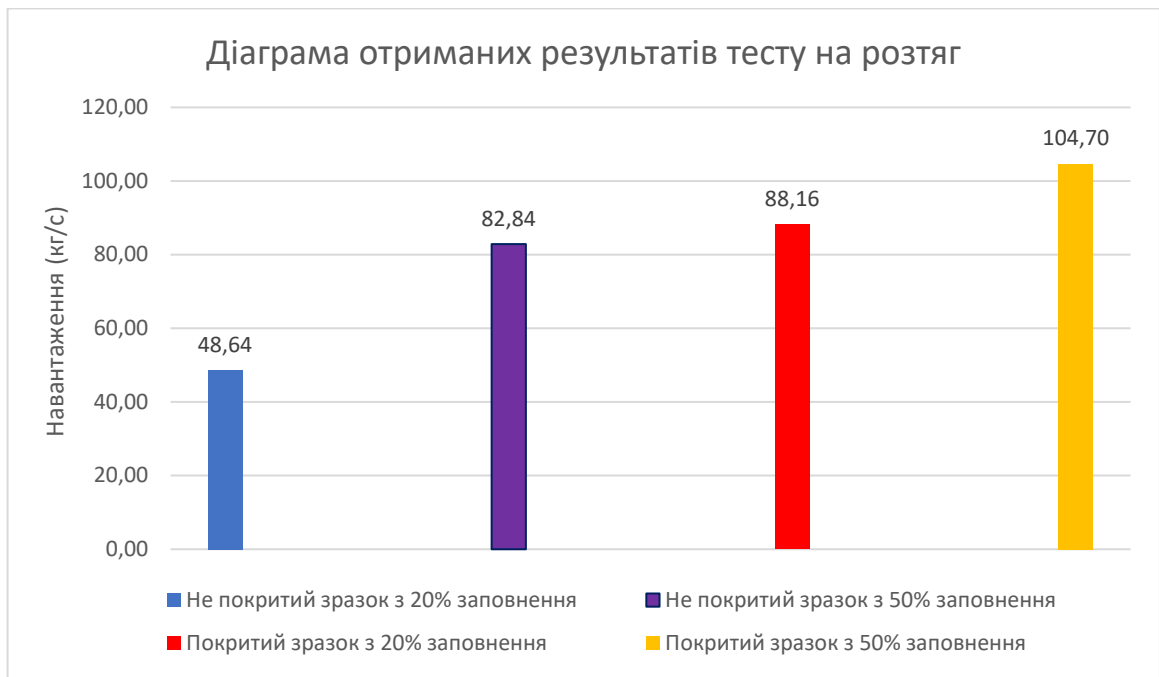


Рисунок 4.8 – Діаграма отриманих результатів тесту на розтяг

Незалежно від щільності заповнення, середнє прикладене навантаження для руйнування покритих зразків є вищим, ніж середнє прикладене навантаження для непокритих зразків.

Згідно з даними випробування, покритий зразок з 20% заповнення має кращі показники. Обробка поверхні може підвищити міцність надрукованої моделі, особливо при низькій щільності заповнення.

У таблиці 1 наведено час друку та використання матеріалів для кожного типу зразка. При порівнянні 20% покриттям і 50% без покриття, перший зразок потребує менше часу на друк, хоча має таку ж міцність, як і другий зразок.

Крім того, в прямокутній частині, 20% покритий зразок займає менше часу і витрачає менше матеріалу, але має вищу міцність, ніж зразок, покритий на 50%.

4.2 Багатофакторний регресійний аналіз

Багатофакторний регресійний аналіз – це статистичний метод, що використовується для вивчення зв'язків між однією залежною змінною і

кількома незалежними змінними. У багатофакторному регресійному аналізі припускається, що залежна змінна може бути виражена лінійною комбінацією незалежних змінних.

Основна мета багатофакторного регресійного аналізу встановлення ступеня впливу кожної незалежної змінної на залежну змінну та оцінка їх взаємодії. В аналізі враховуються якісні та кількісні фактори, що можуть впливати на залежну змінну.

Для проведення багатофакторного регресійного аналізу було змодельовано та надруковано прямокутник розміром 2 мм × 10 мм × 110 мм (рис. 4.9).

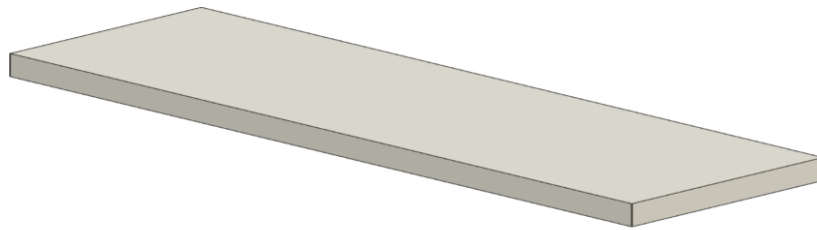


Рисунок 4.9 – Зразок для тестування та багатофакторного регресійного аналізу

Основне рівняння багатофакторної регресії можливо записати таким виразом:

$$\tilde{y}_i = a_1 x_{1i} + a_2 x_{2i} + \dots + a_m x_{mi} + b \quad (4.1)$$

Після друку та проведення тестування на розрив та згинання отримані данні зразків для пластику CoPET, PLA та ABS, зведені в таблиці 4.5, 4.6, 4.7.

Таблиця 4.5 – Зведені параметри друку для пластику PLA, отримані в результаті проведення дослідження на розрив

PLA			
Температура екструдера, °C	Швидкість друку, мм/с	Потужність охолодження, %	Сила на розрив, МПа
200	30	75	35,2
205	60	100	34,5
230	40	0	24,8
215	70	100	33,7
195	50	0	25,9
210	100	25	28,1
190	50	0	26,6
210	40	75	35,8
205	80	25	28,3
200	50	100	34,9
215	40	50	32,9

Максимальна температура для пластика PLA в експерименті досягає 230 °C, а мінімальна – 190 °C. Встановлені межі швидкості: від 30 мм/с до 100 мм/с, та потужності охолодження: від 0% до 100%. Найкращі результати отримано при температурах 200 °C, 205 °C, 210 °C та 215 °C. Швидкості при яких зразки були більш міцними виявились на рівнях 30 мм/с, 40 мм/с, 50 мм/с та 60 мм/с.

Усі зразки достатньої міцності, що тестувались були досягнуті при потужності охолодженні більше чим 50%. Результати регресійного аналізу для пластику PLA наведено в додатку А.

Коефіцієнт детермінації, що був отриманий з регресійної статистики становить 0,91, що показує оцінку адекватності регресійної моделі.

В результаті проведення першого дослідження було отримано графіки підбору та залишків для температури екструдера, швидкості друку та потужності охолодження.

Графік підбору для температури екструдера зображений на рисунку 4.10.



Рисунок 4.10 – Графік підбору для температури екструдера

Графік залишків для температури екструдера зображений на рисунку 4.11.

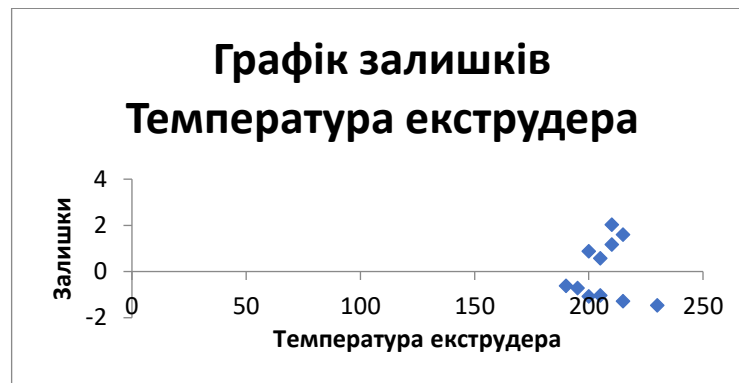


Рисунок 4.11 – Графік залишків для температури екструдера

Графік залишків для швидкості друку зображений на рисунку 4.12.

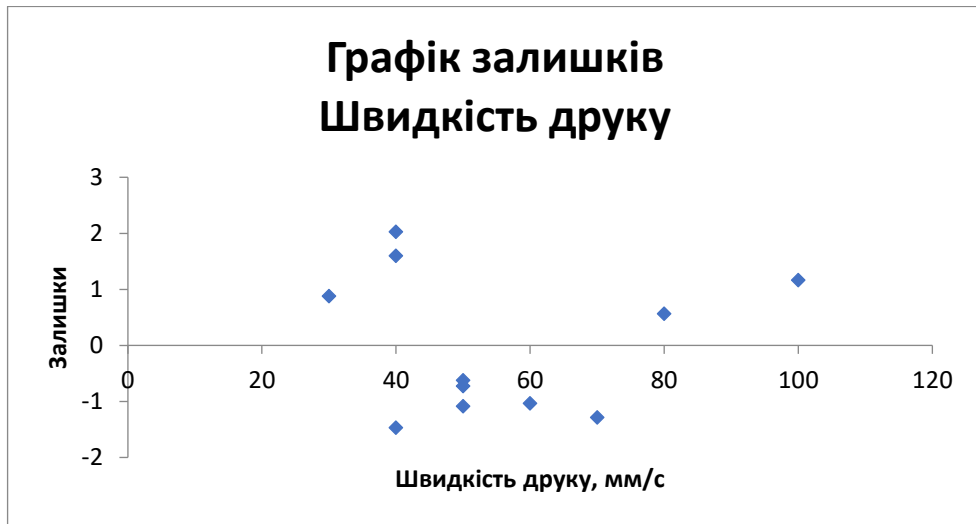


Рисунок 4.12 – Графік залишків для швидкості друку

Графік підбору для швидкості друку зображено на рисунку 4.13.



Рисунок 4.13 – Графік підбору для швидкості друку

Графік підбору для потужності охолодження зображений на рисунку 4.14.



Рисунок 4.14 – Графік підбору для потужності охолодження

Графік залишків для потужності охолодження зображений на рисунку 4.15.

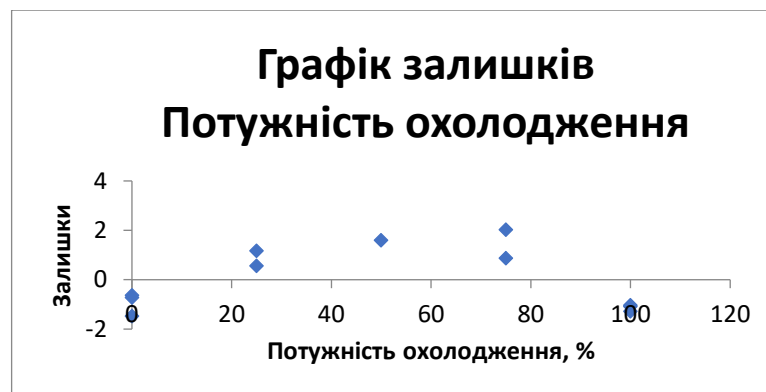


Рисунок 4.15 – Графік залишків для потужності охолодження

Для першого дослідження були отримано рівняння регресії, що має вигляд:

$$y = 32,3049 - 0,0201x_2 - 0,0350x_3 + 0,0946x_4. \quad (4.2)$$

Наступним етапом було проведено аналогічні дослідження для пластику CoPET, результати занесено до таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Зведені параметри друку для пластику CoPET, отримані в результаті проведення дослідження на розрив

CoPET			
Температура екструдера, °C	Швидкість друку, мм/с	Потужність охолодження, %	Сила на розрив, МПа
220	70	0	32,7
225	80	75	34,1
235	30	100	38,6
240	70	100	37,3
230	60	25	42,9
235	40	50	41,4
215	75	0	30,5
245	20	50	36,2
230	50	0	44,8
230	80	100	33,9

Максимальна температура для пластику CoPET в експерименті досягає 245 °C, а мінімальна – 215 °C. Встановлені межі швидкості: від 30 мм/с до 80 мм/с, та потужності охолодження: від 0% до 100%. Найкращі результати отримано при температурах 230 °C, 235 °C та 240 °C. Швидкості при яких зразки були більш міцними виявились на рівнях 40 мм/с, 50 мм/с та 60 мм/с.

Усі без втрати міцності результати були досягнуті при помірній потужності охолодження. Результати регресійного аналізу для пластику CoPET наведено в додатку А.

Коефіцієнт детермінації, що був отриманий з регресійної статистики становить 0,48, що показує оцінку адекватності регресійної моделі.

В результаті проведення другого дослідження було отримано графіки підбору та залишків для температури екструдера, швидкості друку та потужності охолодження.

Графік підбору для температури екструдера зображений на рисунку 4.16.

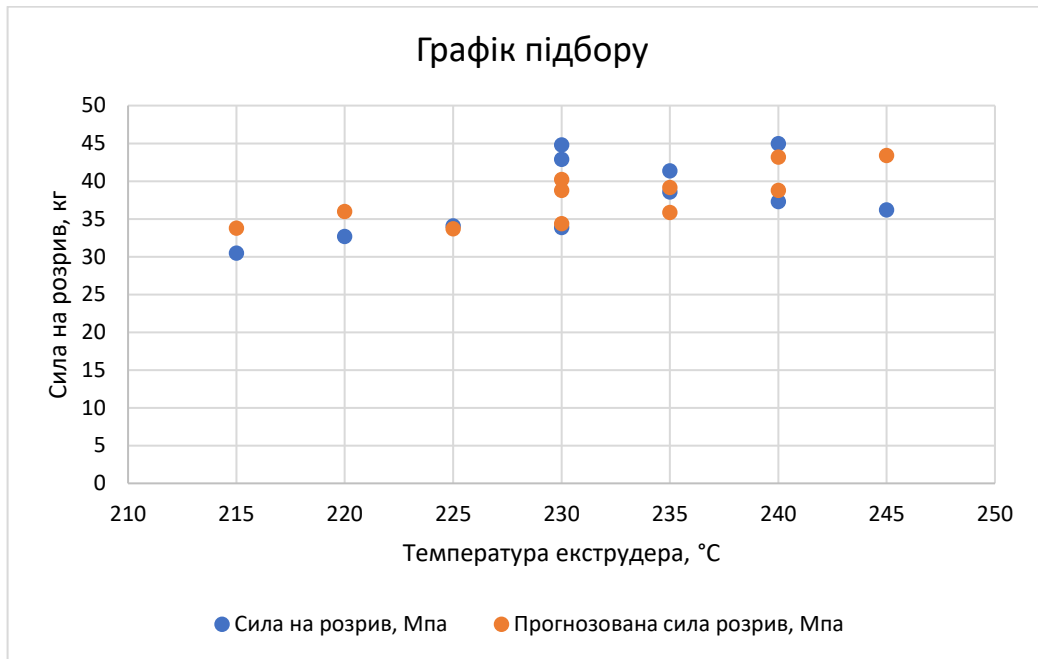


Рисунок 4.16 – Графік підбору для температури екструдера

Графік залишків для температури екструдера був зображений на рисунку 4.17.

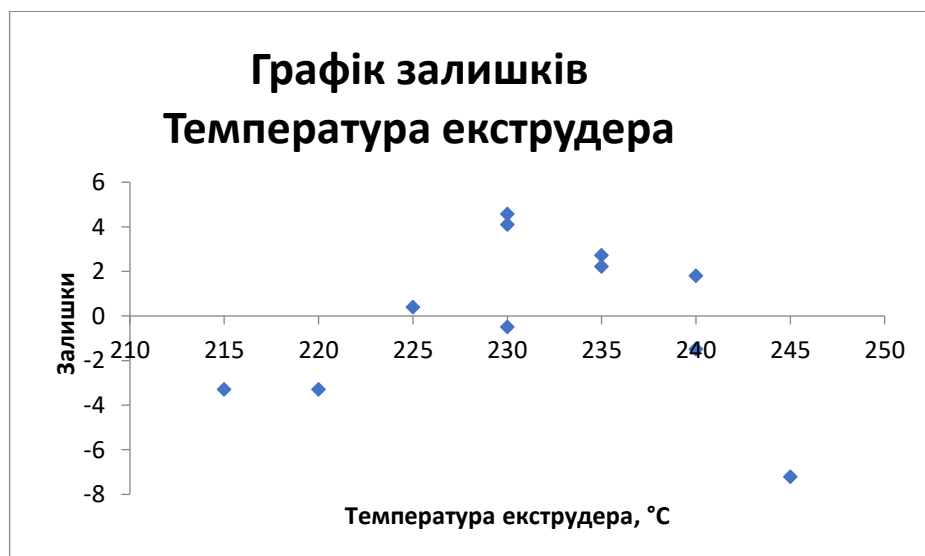


Рисунок 4.17 – Графік залишків для температури екструдера

Графік підбору для швидкості друку зображений на рисунку 4.18.

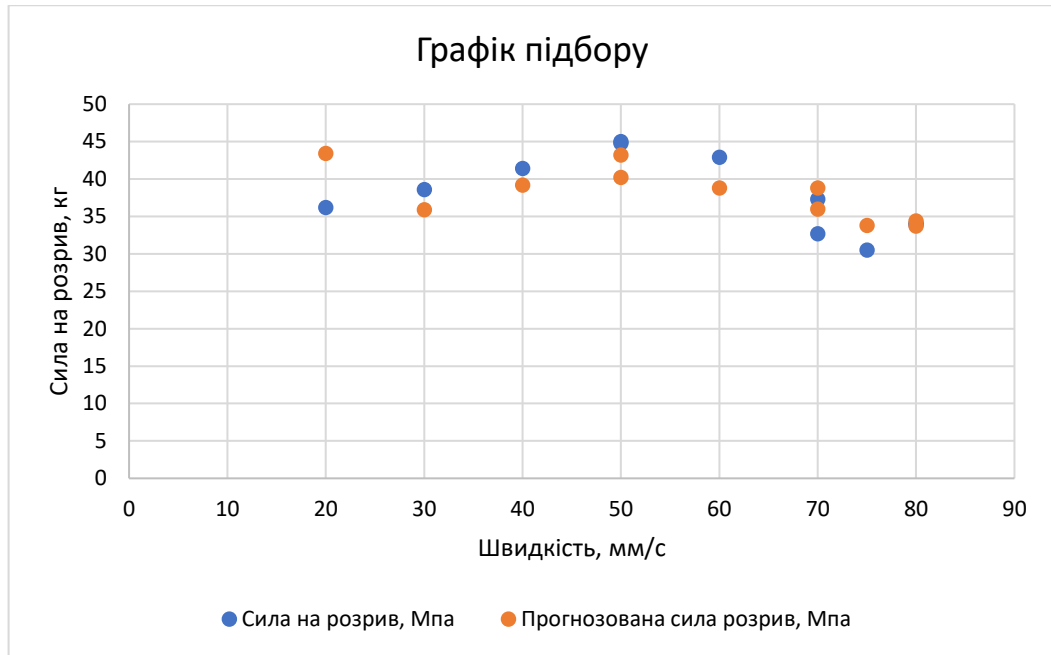


Рисунок 4.18 – Графік підбору для швидкості друку

Графік залишків для швидкості друку зображений на рисунку 4.19.

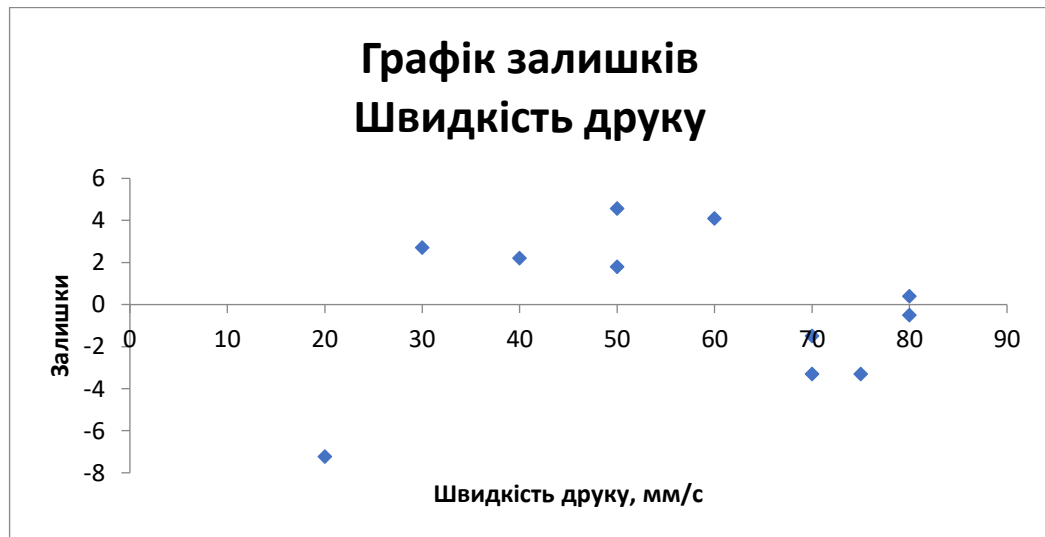


Рисунок 4.19 – Графік залишків для швидкості

Для потужності охолодження графік підбору зображений на рисунку 4.20.

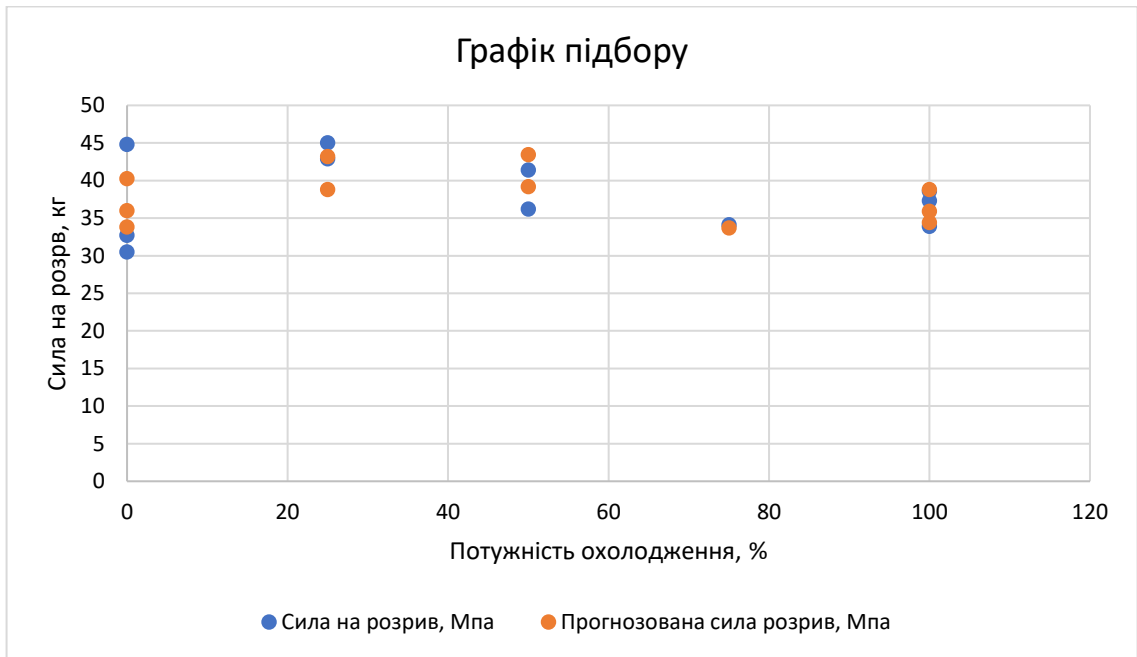


Рисунок 4.20 – Графік підбору для потужності охолодження

Графік залишків для потужності охолодження зображений на рисунку 4.21.

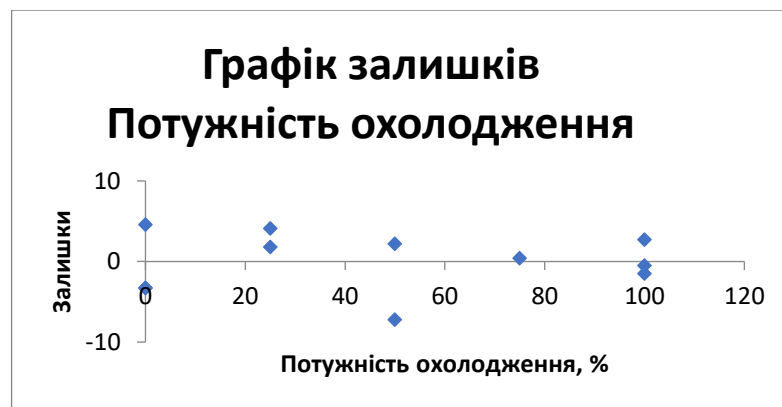


Рисунок 4.21 – Графіки підбору та залишків для потужності охолодження

Для другого дослідження було отримане рівняння регресії, що має вид:

$$y = -65,0739 + 0,4544x_2 + 0,0157x_3 - 0,0629x_3. \quad (4.3)$$

Аналогічно провели дослідження для пластику ABS та занесли результати до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Зведені параметри друку для пластику ABS, отримані в результаті проведення дослідження на розрив

ABS			
Температура екструдера, °С	Швидкість друку, мм/с	Потужність охолодження, %	Сила на розрив, МПа
220	30	75	30,5
205	60	100	32,8
230	40	0	35,1
215	70	100	34,2
220	50	0	39,7
255	30	25	41,3
215	60	0	36,9
195	20	75	34,6
245	35	0	43,0
250	30	25	40,4
235	40	0	45,0

Максимальна температура для пластику ABS в експерименті досягає 255 °С, а мінімальна – 205 °С. Встановлені межі швидкості: від 30 мм/с до 70 мм/с, та потужності охолодження: від 0% до 100%. Найкращі результати отримано при температурах 235 °С, 245 °С, 250 °С та 255 °С. Швидкості при яких зразки були більш міцними виявились на рівнях 30 мм/с, 35 мм/с та 40 мм/с.

Усі без втрати міцності результати були досягнуті при слабкій потужності охолодження, що обумовлено властивостями самого пластику. Результати регресійного аналізу для пластику ABS наведено в додатку А.

Коефіцієнт детермінації, що був отриманий з регресійної статистики становить 0,64, що показує оцінку адекватності регресійної моделі.

В результаті проведення третього дослідження було отримано графіки підбору та залишків для температури екструдера, швидкості друку та потужності охолодження.

Графік підбору для температури екструдера зображений на рисунку 4.22.

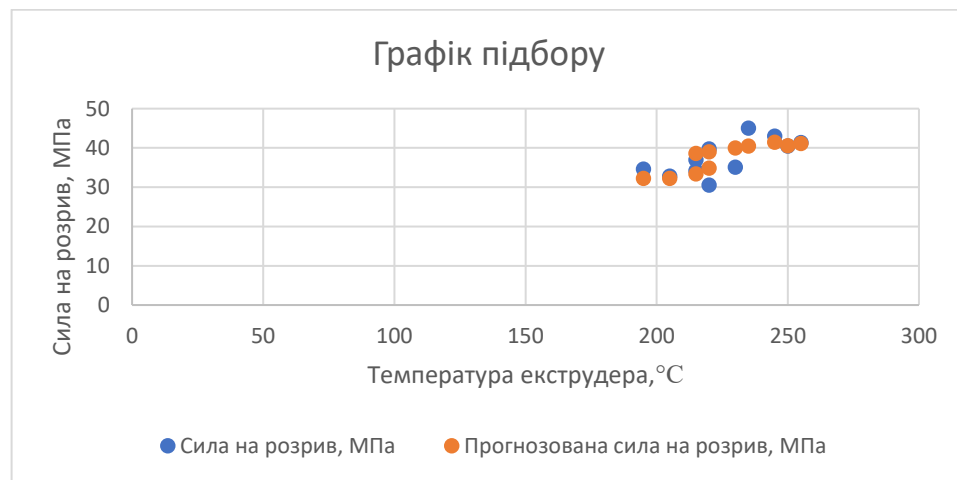


Рисунок 4.22 – Графік підбору для температури екструдера

Графік залишків для температури екструдера зображений на рисунку 4.23.

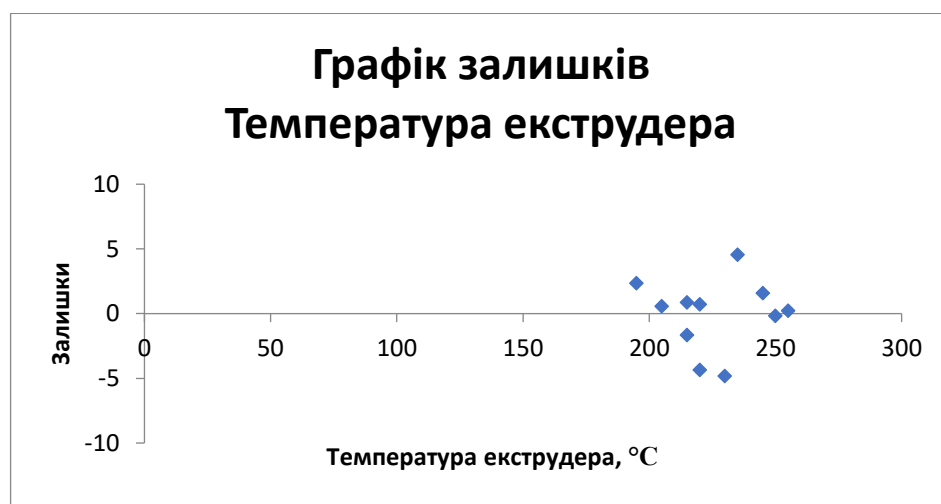


Рисунок 4.23 – Графік залишків для температури екструдера

Графік підбору для швидкості друку зображений на рисунку 4.24.

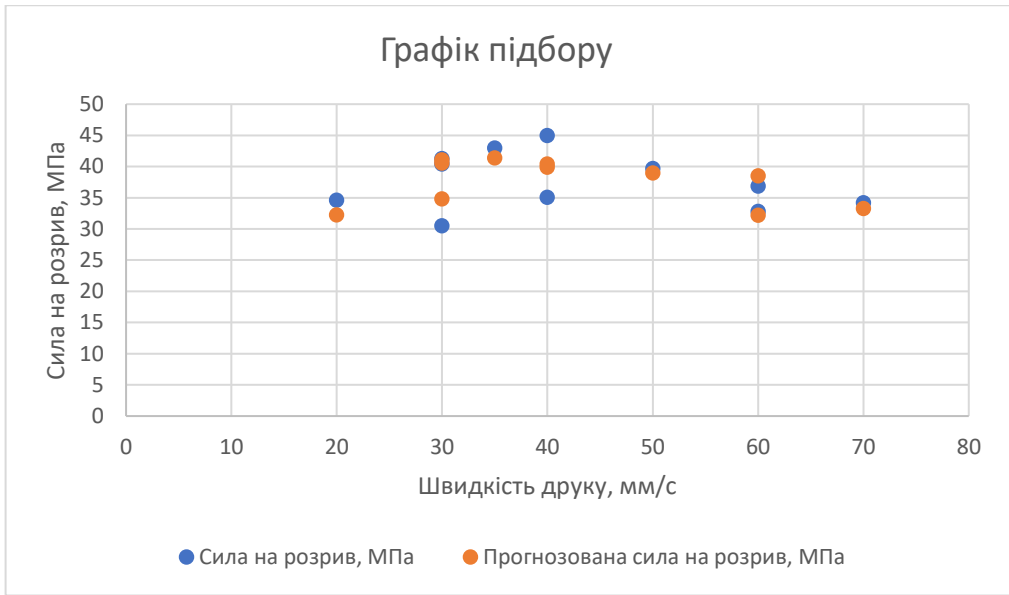


Рисунок 4.24 – Графік підбору для швидкості друку

Графік залишків для швидкості друку зображений на рисунку 4.25.

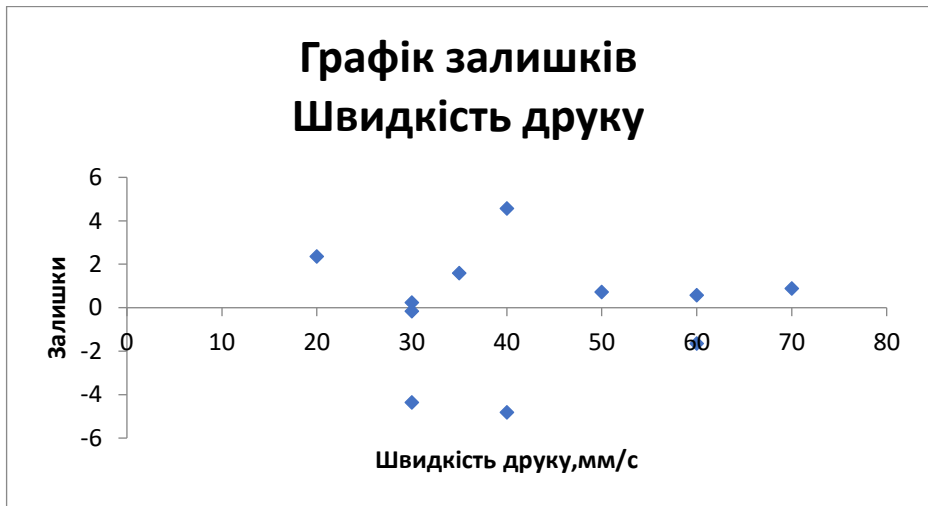


Рисунок 4.25 – Графік залишків для швидкості друку

Для потужності охолодження графіки підбору зображений на рисунку 4.26.

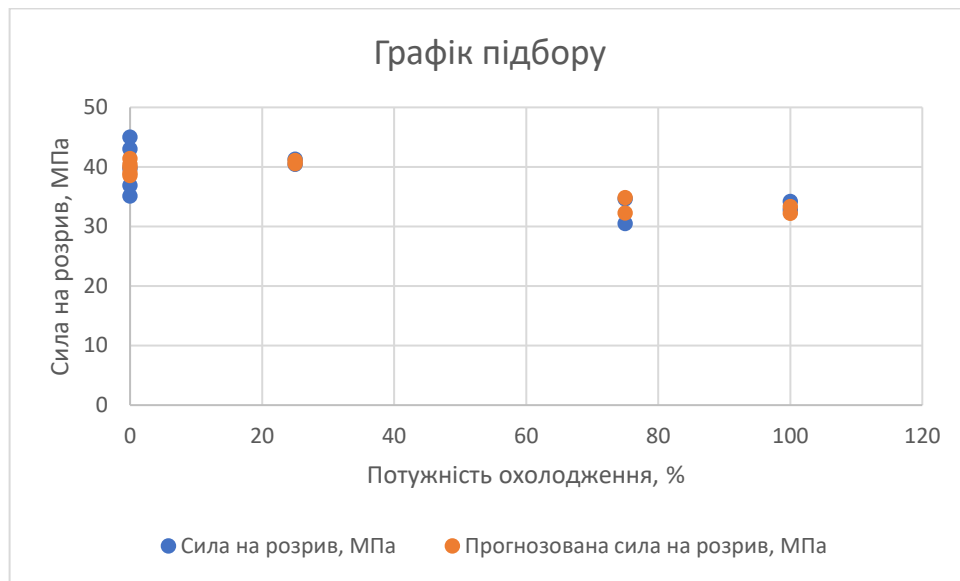


Рисунок 4.26 – Графік підбору для потужності охолодження

Графік залишків для потужності охолодження зображений на рисунку 4.27.

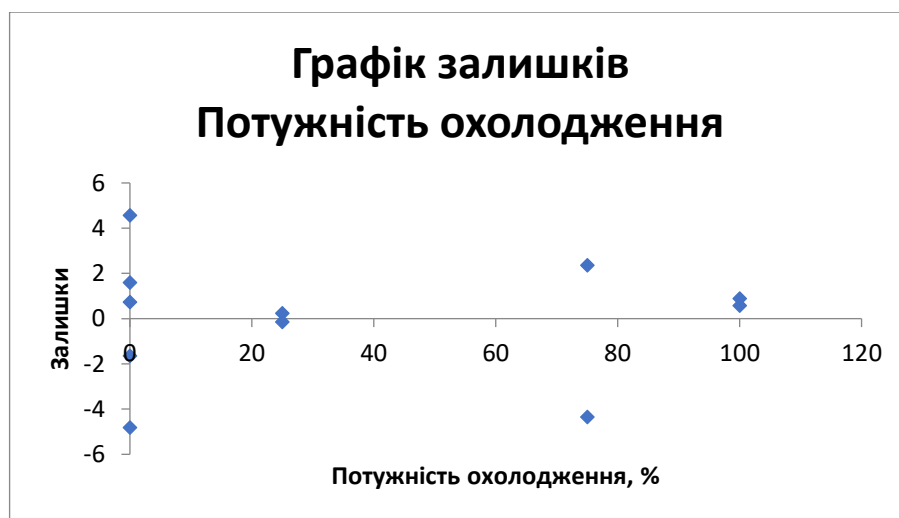


Рисунок 4.27 – Графік залишків для потужності охолодження

Для третього дослідження було отримане рівняння регресії, що має наступний вигляд:

$$y = 16,2376 + 0,1016x_2 + 0,00739x_3 - 0,0530x_4. \quad (4.4)$$

4.3 Висновки до четвертого розділу

В даному розділі було проведено аналіз впливу технологічних параметрів на якісні показники деталей, що друкуються за допомогою симуляцій та тестів на згин та розтяг.

Також, було виконано багатофакторний регресійний аналіз за основними 4 змінними:

- температура екструдера;
- швидкість друку;
- потужність охолодження;
- сила на розрив.

Графіки регресії показують різницю між значеннями, що отримані в результаті дослідження та значеннями, що були передбачені досліджуваною регресійною моделлю. Чим краще модель відповідає цим значенням, що вказані в досліджах, тим менше значення залишків.

Для першого дослідження пластику PLA найкращі результати отримано при температурах 200 °C, 205 °C, 210 °C та 215 °C. Швидкості при яких зразки були більш міцними виявились на рівнях 30 мм/с, 40 мм/с, 50 мм/с та 60 мм/с. Усі зразки достатньої міцності, що тестувались були досягнуті при потужності охолодженні більше чим 50%.

В результаті проведення другого дослідження для пластику CoPET, найкращі результати отримано при температурах 230 °C, 235 °C та 240 °C. Швидкості при яких зразки були більш міцними виявились на рівнях 40 мм/с, 50 мм/с та 60 мм/с. Усі без втрати міцності результати були досягнуті при помірній потужності охолодження.

Для останнього дослідження пластику ABS, найкращі результати отримано при температурах 235 °C, 245 °C, 250 °C та 255 °C. Швидкості при яких зразки були більш міцними виявились на рівнях 30 мм/с, 35 мм/с та 40 мм/с. Усі без втрати міцності результати були досягнуті при слабкій потужності охолодження, що обумовлено властивостями самого пластику.

Також, за результатами всіх досліджень для кожного було отримане рівняння регресії.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Приміщення, у якому проведено роботи має наступні характеристики:

- площа приміщення 48 м²;
- висота 3,5 м;
- кількість робочих місць з ПК – 6 шт.

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, повинно забезпечувати 6 м² площі і 20 м³ на одне робоче місце з ПК. Площа приміщення 48 м² і об'ємом 168 м³, на кожне місце припадає 8 м² площі та 28 м³ об'єму. Отже, 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 бокові світлоотвори, 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 (5.1).

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (5.1)$$

де W – питома потужність, Вт/м²;

S – площа приміщення, м²;

W_{Σ} – загальна потужність (5.2), Вт, освітлювальної установки, яка розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{CB} \cdot n_{CB}, \quad (5.2)$$

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

n_{CB} – кількість світильників в приміщенні.

$$W_{\Sigma} = 100 \cdot 4 = 400 \text{ Вт}, \quad (5.3)$$

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

Питомій потужності 8,33 Вт/м² 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 [27].

ВИСНОВКИ

В результаті виконання атестаційної роботи на рівень магістра було отримано такі результати:

- проаналізовано технологію 3D-друку FDM;
- проаналізовані види та конструкції FDM 3D-принтерів;
- проаналізовано недоліки друку, які виникають при друці з підтримками;
- проаналізовано шляхи вирішення проблеми друку з підтримками, їх програмні або апаратні методи вирішення;
- змодельовано та детально проаналізовано будову 5-осьового FDM 3D-принтера та його особливості;
- проаналізовано вплив швидкості, потужності охолодження та температури екструдера на кінцеву міцність деталі;
- було проведено експериментальні дослідження, з використання багатофакторної регресії, в результаті якої було визначено вплив кожного з значущих факторів, які безпосередньо впливають на міцність вихідної 3D-моделі.

Дослідження, яке було проведено, використовує традиційний тривісний G-код для розробки траєкторії друку, що включає п'ять координат.

В результаті проведення експериментальних досліджень було підтверджено залежність міцності деталі від температури екструдера, швидкості та потужності охолодження на інженерні пластики.

Було опубліковано 1 публікацією, що була надрукована в збірнику конференції: «АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ТА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ» [електронне видання][4].

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 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, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал.–Харків: ХНУРЕ, 2021.–55 с.

3. Харківський національний університет радіоелектроніки [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www](http://www.kit-am.com) / URL: <https://nure.ua/department/kafedra-kompyuterno-integrovanih-tehnologiy-avtomatizatsiyi-ta-mehatroniki-kitam>.

4. Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки (КІТАМ) [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www](http://www.tapr.nure.ua) / URL: <https://tapr.nure.ua>.

5. Филипенко В.В. Фізико-математична оптимізація 3D-друку без підтримок / Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2022) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.].–Харків : ХНУРЕ, 2023.–Вип. 2.–С. 65-67.

6. Mwema F.M., Akinlabi E.T. Basics of Fused Deposition Modelling (FDM). Fused Deposition Modeling, 2020. 15 с.

7. G. De Pasquale, Additive Manufacturing of Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS), 2021. [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://www.mdpi.com/1349436](http://www.mdpi.com/1349436).

8. Історія та класифікація адитивних технологій [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://extxe.com/3698/istorija-i-klassifikacija-additivnyh-tehnologij/](http://extxe.com/3698/istorija-i-klassifikacija-additivnyh-tehnologij/).

9. A. Dey, N. Yodo, A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics, 2019. [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://www.mdpi.com/505302](http://www.mdpi.com/505302).

10. Радіатор для 3D-принтера та проблеми нагрівання нитки [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://ten24.com.ua/blog/radiator-dlya-3d-printera-i-problemy-nagreva-niti-vse-cho-vam-nuzhno-znat/](https://ten24.com.ua/blog/radiator-dlya-3d-printera-i-problemy-nagreva-niti-vse-cho-vam-nuzhno-znat/).

11. Сопло для 3D-принтера 1.75 мм, для хотендів E3D і MK8 [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://3d-box.com.ua/soplo-dlya-3d-printera-1-75-mm-dlya-hotendov-e3d-i-mk8UA](https://3d-box.com.ua/soplo-dlya-3d-printera-1-75-mm-dlya-hotendov-e3d-i-mk8UA).

12. J. O'Connell, The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY & More, 2023. [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/](https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/).

13. Sculpto 3D printer [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://www.kickstarter.com/projects/sbf/sculpto-a-toy-from-the-future](https://www.kickstarter.com/projects/sbf/sculpto-a-toy-from-the-future).

14. S. Frey, FLSun V400 Review: Klipper Delta Magic, 2022 [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://all3dp.com/1/flsun-v400-review-3d-printer-specs/](https://all3dp.com/1/flsun-v400-review-3d-printer-specs/).

15. Scara Arm 3D Printer [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://www.robotdigg.com/product/929/Scara-Arm-3D-Printer](https://www.robotdigg.com/product/929/Scara-Arm-3D-Printer).

16. 3D Printers with Different Kinematics: Comparison, Advantages and Disadvantages, 2019 [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://top3dshop.com/blog/3d-printer-kinematics-explained](https://top3dshop.com/blog/3d-printer-kinematics-explained).

17. Кінематика 3D-принтера: переваги і недоліки всіх варіантів, 2019 [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://3dplast.biz/ua/a398991-kinematika-printera-preimuschestva.html](http://www.3dplast.biz/ua/a398991-kinematika-printera-preimuschestva.html).

18. Basics of Fused Deposition Modelling (FDM), 2020 [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7257444/](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7257444/).

19. Parts are not attaching to the build platform [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://support.asiga.com/parts-are-not-attaching-to-the-build-platform-max-x/](https://support.asiga.com/parts-are-not-attaching-to-the-build-platform-max-x/).

20. Cura Tree Supports: Step-by-Step Guide for Smooth 3D Prints [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://the3dprinterbee.com/cura-tree-support/](https://the3dprinterbee.com/cura-tree-support/).

21. Prahar M. Bhatt, Rishi K. Malhan, Pradeep Rajendran, Satyandra K. Gupta, Building free-form thin shell parts using supportless extrusion-based additive manufacturing, 2020 [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860419319670](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860419319670).

22. Zurich University of Applied Sciences [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://www.zhaw.ch/de/engineering/studium/masterstudium/](https://www.zhaw.ch/de/engineering/studium/masterstudium/).

23. 3D-принтери з двома екструдерами [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://3d4u.com.ua/ru/dual-extruder-3d-printer/c90](https://3d4u.com.ua/ru/dual-extruder-3d-printer/c90).

24. Пластик Ultimaker PVA [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://www.3ds.com.ua/product-page/пластик-ultimaker-pva](https://www.3ds.com.ua/product-page/пластик-ultimaker-pva).

25. Hong F., Hodges S., Myant C., Boyle D. Open5x: Accessible 5-axis 3D printing and conformal slicing, 2022 [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://freddiehong.com/2022/02/28/open5x-accessible-5-axis-3d-printing-and-conformal-slicing/](https://freddiehong.com/2022/02/28/open5x-accessible-5-axis-3d-printing-and-conformal-slicing/).

26. R. C. Luo, L. C. Hsu, T. J. Hsiao and Y. W. Perng, "3D Digital Manufacturing via Synchronous 5-Axes Printing for Strengthening Printing Parts,

2020 [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9134749>.

27. Методичні вказівки до виконання розділу "Охорона праці" у випускних роботах ОКР "бакалавр" усіх форм навчання / упоряд.: В. А. Айвазов, Т. Є. Стиценко., Н. Л. Березуцька ; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – 28 с.