

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення моделі впливу структури заповнення на термічну стійкість
надрукованих виробів за технологією FFF/FDM
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання,
групи КІТПВм-24-1

Іван МАСЛОВ

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

Керівник доц. каф КІТАР Андрій ФРОЛОВ
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Я, Маслов Іван В'ячеславович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

27 листопада 2025 р.

Іван МАСЛОВ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Маслов Іван В'ячеславович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення моделі впливу структури заповнення на термічну стійкість надрукованих виробів за технологією FFF/FDM

Затверджена наказом університету від 10.11.2025 р. №1029 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 24 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Технологія FFF/FDM;

3.2 Програмне забезпечення для підготовки моделі до друку Cura;

3.3 Регресійно-кореляційний аналіз;

3.4 Програма для обробки статистичних даних IBM SPSS26;

3.5 Теорія теплового розсіяння під час 3D-друку;

3.6 Проведення дослідження впливу параметрів друку на термічну стійкість виробу.

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

4.1 Вступ;

4.2 Аналіз предметної області;

4.3 Опис термічних явищ під час 3D-друку

4.4 Проведення дослідження впливу параметрів друку на термічну стійкість виробу;

4.5 Охорона праці;

4.6 Висновки.

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

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір матеріалів для проведення розробки	09.09.2025 – 20.09.2025	виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	21.09.2025 – 30.09.2025	виконано
3	Розробка розділу «Аналіз предметної області»	01.10.2025 – 07.10.2025	виконано
4	Розробка розділу «Опис термічних явищ під час 3D-друку»	08.10.2025 – 12.10.2025	виконано
5	Розробка розділу «Проведення дослідження впливу параметрів друку на термічну стійкість виробу»	13.10.2025 – 16.11.2025	виконано
6	Оформлення кваліфікаційної роботи	17.11.2025 – 30.11.2025	виконано
7	Подання роботи до нормоконтролю	03.12.2025	
8	Подання роботи на перевірку Інтернетсервісом StrikePlagiarism		
9	Подання роботи на рецензію		
10	Подання роботи на підпис зав. кафедри		
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання 09 вересня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Іван МАСЛОВ
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Андрій ФРОЛОВ
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 84 с., 5 табл., 42 рис., 3 дод., 28 джерел.

FFF/FDM-ДРУК, СТРУКТУРА ЗАПОВНЕННЯ, ТЕРМІЧНА СТІЙКІСТЬ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ.

Об'єктом дослідження є процес виготовлення виробів за технологією FFF/FDM із застосуванням різних типів внутрішніх структур заповнення.

Предметом дослідження є вплив геометричних параметрів та щільності заповнення на термічні характеристики і стійкість полімерних виробів, надрукованих методом FFF/FDM.

Мета роботи – розроблення моделі для оцінки та прогнозування впливу структури внутрішнього заповнення на міцнісні й термічні характеристики виробів, надрукованих методом FFF/FDM.

У роботі проаналізовано теплові процеси, що відбуваються в надрукованих виробах під час формування шарів FFF/FDM-технологією. Досліджено вплив типу та щільності внутрішнього заповнення на розподіл тепла, швидкість охолодження, міжшарову адгезію та термічну стійкість моделей. Показано, що геометрія заповнення визначає характер теплопередачі, що може спричинити локальні напруження, деформації та зміни механічних властивостей.

Розглянуто сучасні методи оцінювання термічної поведінки полімерів і вплив параметрів друку, а саме: температур сопла й платформи, швидкості та висоти шару у поєднанні зі структурою заповнення.

Запропоновано математичну модель, що описує взаємозв'язок між типом і щільністю заповнення, тепловими умовами друку та підсумковою термічною стійкістю виробів, дозволяючи прогнозувати їхню поведінку під температурними навантаженнями.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 84 p., 5 tabl., 42 fig., 3 app., 28 sources.

FFF/FDM PRINTING, FILLING STRUCTURE, THERMAL STABILITY, MATHEMATICAL MODELING, ADDITIVE TECHNOLOGIES.

The object of the study is the process of manufacturing products using FFF/FDM technology with the use of various types of internal filling structures.

The subject of the study is the influence of geometric parameters and filling density on the thermal characteristics and stability of polymer products printed using the FFF/FDM method.

The aim of the work is to develop a model for assessing and predicting the influence of internal filling structure on the strength and thermal characteristics of products printed using the FFF/FDM method.

The paper analyzes thermal processes occurring in printed products during layer formation using FFF/FDM technology. The influence of the type and density of internal filling on heat distribution, cooling rate, interlayer adhesion, and thermal stability of models is investigated. It is shown that the filling geometry determines the nature of heat transfer, which can cause local stresses, deformations, and changes in mechanical properties.

Modern methods for evaluating the thermal behavior of polymers and the influence of printing parameters, namely: nozzle and platform temperatures, layer speed and height in combination with the filling structure, are considered.

A mathematical model is proposed that describes the relationship between the type and density of infill, the thermal conditions of printing, and the final thermal stability of products, allowing their behavior under thermal loads to be predicted.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	8
Вступ.....	10
1 Аналіз предметної області.....	12
1.1 Принцип роботи технології FFF/FDM	12
1.2 Основні елементи верстатів для 3D-друку	14
1.3 Основні параметри процесу друку	16
1.3.1 Температурні параметри друку.....	17
1.3.2 Механічні параметри	18
1.3.3 Параметри налаштування моделі до друку	21
1.4 Види дефектів пов’язані з температурним фактором	24
1.5 Програми для підготовки моделі до друку.....	28
1.6 Висновки до першого розділу.....	33
2 Опис термічних явищ під час 3D-друку	35
2.1 Теорія теплового розсіяння під час 3D-друку.....	35
2.2 Опис макету для проведення досліджень.....	39
2.3 Аналіз САУ для крокового двигуна механізмам подачі.....	42
2.4 Висновки до другого розділу	45
3 Проведення дослідження впливу параметрів друку на термічну стійкість виробу	47
3.1 Побудова плану експерименту	47
3.2 Проведення емпіричних досліджень.....	50
3.3 Побудова регресійно-кореляційної моделі.....	54
3.4 Висновки до третього розділу	58
4 Охорона праці	59
4.1 Правила безпеки під час роботи з 3D-принтером.....	59
4.2 Висновки до четвертого розділу.....	59
Висновки	61
Перелік джерел посилання	63

Додаток А Апробація результатів кваліфікаційної роботи	67
Додаток Б Результати дослідження.....	79
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	83

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene;

BVOH – Butenediol Vinyl Alcohol Copolymer;

FDM – Fused Filament Fabrication;

FFF – Fused Deposition Modeling;

HIPS – High Impact Polystyrene;

PA – Polyamide;

PC – Polycarbonate;

PETG – Polyethylene Terephthalate Glycol-modified;

PLA – Polylactic Acid;

PVA – Polyvinyl Alcohol;

TPE – Thermoplastic Elastomer;

TPU – Thermoplastic Polyurethane.

ВСТУП

У сучасному світі, де адитивні технології розвиваються з неймовірною швидкістю, зростає потреба у створенні виробів, які не лише точно відповідають заданій формі, але й здатні зберігати стабільні властивості під впливом температурних навантажень. Однією з найпопулярніших технологій 3D-друку сьогодні є FFF (Fused Filament Fabrication) або FDM (Fused Deposition Modeling), де виріб формується шляхом нашарування розігрітого полімерного філаменту. Ця технологія стала популярною завдяки своїй простоті, доступності та універсальності, що робить її затребуваною як у промисловості, так і в домашньому використанні.

Проте, окрім вибору матеріалу та режимів друку, важливу роль відіграє внутрішня структура моделі, зокрема заповнення. Саме воно визначає, наскільки легка, міцна та термічно стійка буде деталь, що особливо важливо для багатьох функціональних застосувань. Різні типи заповнення по-різному передають і накопичують тепло, що може вплинути на адгезію між шарами, викликати деформації або вплинути на стійкість до перегріву та роботу в умовах підвищених температур.

Розуміння того, як геометрія та щільність внутрішнього заповнення впливають на теплову поведінку виробів, є справжнім ключем до досягнення передбачуваних результатів. Якщо нам вдасться моделювати ці взаємозв'язки, ми зможемо оптимізувати параметри друку, зменшити кількість дефектів, підвищити надійність деталей і зробити FFF/FDM-друк більш стабільним та ефективним у реальних умовах експлуатації.

Актуальність цієї роботи полягає в потребі підвищити термічну стійкість надрукованих виробів, зменшити витрати часу та матеріалів на переробку, а також забезпечити стабільні та повторювані результати в серійному виробництві. Розробка моделі, яка описує вплив структури заповнення на

теплопровідність, нагрів і охолодження деталей, допоможе вдосконалити технологію FFF/FDM і розширити її можливості в сучасній інженерній практиці.

Мета роботи – розроблення моделі для оцінки та прогнозування впливу структури внутрішнього заповнення на міцнісні й термічні характеристики виробів, надрукованих методом FFF/FDM.

Об'єктом дослідження є процес виготовлення виробів за технологією FFF/FDM із застосуванням різних типів внутрішніх структур заповнення.

Предметом дослідження є вплив геометричних параметрів та щільності заповнення на термічні характеристики і стійкість полімерних виробів, надрукованих методом FFF/FDM.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз технології FFF/FDM та її основних параметрів;
- дослідити вплив структури заповнення моделі на термічну стійкість;
- визначити ключові фактори, що призводить до появи дефектів;
- розробити математичну та емпіричну модель взаємозв'язку параметрів друку та термічної стійкості;
- перевірити працездатність моделі на практичних прикладах;
- підготувати та оформити кваліфікаційну роботу відповідно до вимог ДСТУ 3008:2015 [1] і методичних вказівок із підготовки та оформлення кваліфікаційних робіт здобувачів другий (магістерський) рівня спеціальності 174 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» [2]. За результатами проведених досліджень опублікована стаття у збірник студентських наукових Автоматизація та Приладобудування «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2025 другий випуск [3]. Проведена робота відповідає цілям сталого розвитку (ЦСР): ЦСР 4, ЦСР 9 та ЦСР 12.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛОСТІ

1.1 Принцип роботи технології FFF/FDM

Fused Deposition Modeling (FDM) – це адитивна технологія, що дозволяє виробляти тривимірні об'єкти за рахунок послідовного нашарування розплавленого пластикового матеріалу у вигляді стрічки. Завдяки їй, цифрову 3D-модель можна перетворити на фізичний об'єкт (рис. 1.1) [4].

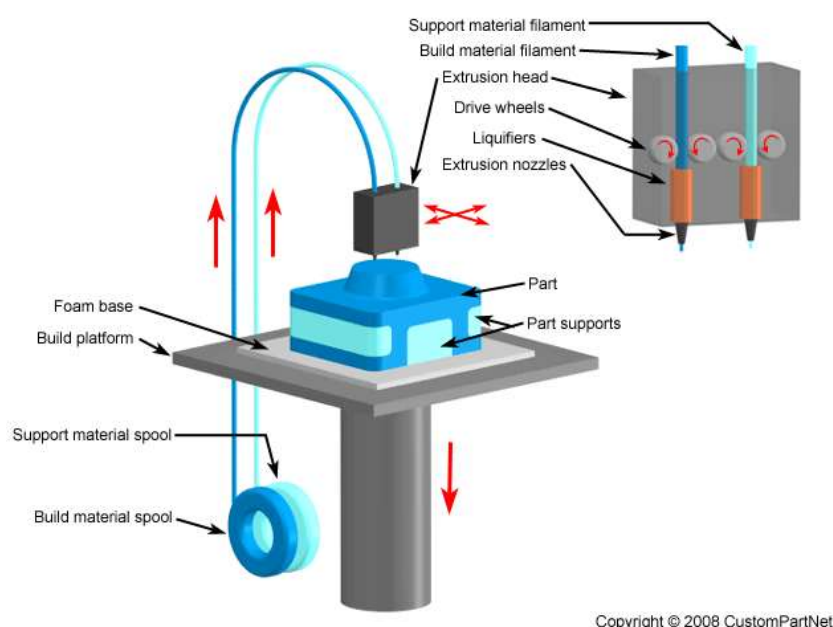


Рисунок 1.1 – Схема роботи 3D принтерів за технологією FDM

Технологія FDM функціонує на основі крокового створення об'ємного об'єкта, коли розплавлений полімерний матеріал нашаровується. Дуже важливо розуміти, що друк проходить декілька ключових етапів.

Отже, на етапі підготовки 3D моделі. Перший крок, створення або завантаження цифрової 3D моделі майбутнього виробу. Тут використовується 3D моделювання; на етапі друку. Після підготовки моделі програма перетворює її у набір інструкцій для 3D принтера, який принтер послідовно друкує деталь.

Принтер використовує пластичний ниткоподібний матеріал (філамент) для друку; на етапі нагрівання і з'єднання шарів. Плавлений матеріал, який нагрівся в екструдері, потім у розплавленому стані рухається і наноситься на платформу, в точності по геометрії моделі. Кожен шар, що охолоджується, після пояснення з'єднується, створюючи міцний зв'язок з попереднім; на етапі створення підтримувальних конструкцій.

Для друку ускладнених моделей, що мають елементи, які виступають, залежно від нароби, можуть використовуватись допоміжні конструкції підтримки. Як правило, конструкції виготовляються з матеріалу, який після друку легко видалити; на стадії остаточної обробки. Для покращення естетичних і механічних характеристик виріб після друкування, у більшості випадків, потребує обробки, і це включає: видалення підтримок, шліфування, фарбування, полірування.

Завдяки своїй легкості у використанні та широкій доступності, FDM 3D друк здобув популярність у багатьох галузях. Він активно застосовується для створення прототипів, виготовлення дрібних деталей, а також у навчальних і наукових проектах. Ця технологія знаходить широке застосування як у промисловості, так і в побуті, значно розширюючи горизонти інженерії та творчого проектування.

Переваги технології FDM:

- доступність. Принтери FDM досить вигідні за ціною, що робить їх привабливими для навчальних закладів, малих компаній і домашнього використання;
- простота використання. Ці принтери просто налаштовуються і не вимагають складного сервісу;
- великий асортимент матеріалів. Є можливість застосування різних видів полімерів, композитів, а також філаментів з добавками гуми або металу;
- висока швидкість друку. Ця технологія дозволяє оперативно виготовляти великі об'єкти;

– поєднання матеріалів. Декілька моделей принтерів мають можливість працювати з кількома матеріалами одночасно, що значно розширює їх функціональність в друці;

– надійність і легкість ремонту. Принтери FDM вирізняються своєю простотою в обслуговуванні та високим рівнем довговічності.

Недоліки технології FDM друку [7, 9]:

– обмежена роздільна здатність. Ця технологія не завжди гарантує необхідну точність для дуже маленьких або складних елементів;

– видимість шарів. Завдяки поетапній природі друку на поверхні об'єкта можуть виникати помітні лінії, які потребують подальшої обробки;

– нерівна поверхня. Без подальшої обробки вироби можуть мати шорсткість;

– потреба у підтримках. Складні вироби вимагають використання додаткових конструкцій, які потрібно прибрати після завершення процесу друку;

– можливість зміни форми. Пластикові матеріали можуть деформуватися при нерівномірному нагріванні або охолодженні;

– чутливість матеріалів. Деякі філаменти потребують стабільних умов для зберігання, а також контролю температури і рівня вологості.

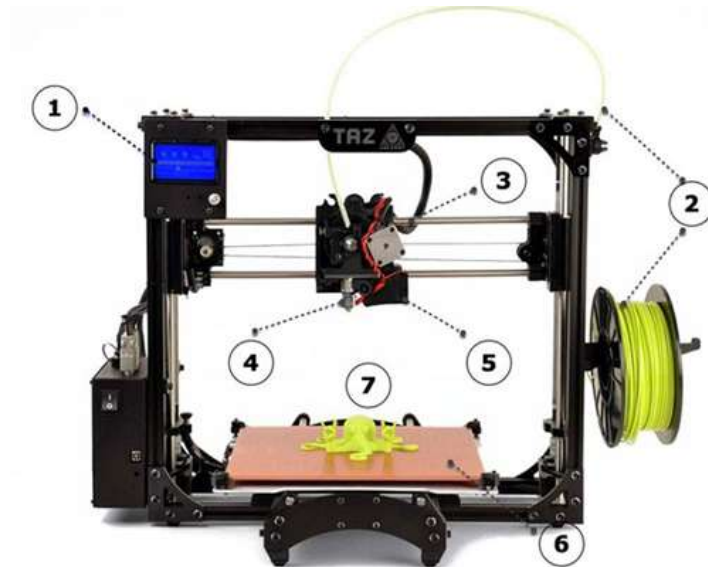
1.2 Основні елементи верстатів для 3D-друку

3D-друк, також відомий як адитивне виробництво, являє собою технологію виготовлення тривимірних об'єктів за допомогою цифрової моделі. На відміну від звичних методів обробки, де матеріал видаляється за допомогою різання або фрезерування, у 3D-друці об'єкти створюються поступово шляхом поетапного накладання шарів матеріалу. Кожен шар представляє собою тонкий зріз моделі, який в кінцевому підсумку формує готовий продукт.

Такий метод дає змогу створювати складні геометричні форми з мінімальними витратами матеріалів і без потреби у великій виробничій

інфраструктурі. Окрім цього, 3D-друк пропонує різноманітність у підборі матеріалів та дозволяє виробляти продукти, які не можна виготовити за допомогою звичайних технологій обробки.

Структура 3D-принтера, що працює за технологією FFF/FDM, (рис. 1.2).



- 1 – екран управління; 2 – механізм подачі філаменту; 3 – екструдер;
 4 – «Hot end»; 5 – охолодження моделі; 6 – друкарська платформа;
 7 – надрукована модель

Рисунок 1.2 – Структура типового 3D-принтера

Нині 3D-принтери обладнані сенсорними екранами, які спрощують управління параметрами друку. У порівнянні зі старими моделями, де використовувалися прості LCD-дисплеї та фізичні кнопки або навігаційні колеса, сучасні версії пропонують значно більше зручностей. В залежності від модифікації, пристрої можуть бути оснащені слотами для SD-карт або USB-портами, що дозволяють завантажувати файли для друку.

Це робоча площа «б», де створюється надрукований продукт «7». У багатьох моделях платформа має підігрів, що зміцнює зчеплення першого шару з поверхнею та допомагає уникнути деформації деталі під час друку.

Екструдер «3» це важлива складова 3D-принтера, яка відповідає за розігрів і подачу пластикової нитки «2» для створення об'єкта. Він має дві основні частини: гарячий кінець та холодний кінець.

HotEnd «4» включає в себе нагрівальний елемент та сопло, яке використовують для нанесення розплавленого матеріалу на платформу відповідно до заданої моделі. Холодна частина має двигун і механізм подачі філаменти, які просувають нитку до гарячої області. Між цими двома зонами знаходяться радіатор і вентилятор «5», які запобігають перегріву холодного кінця та ускладненню роботи нитки.

Більшість принтерів також обладнана вентилятором, який охолоджує деталі. Це допомагає швидко затверджувати розплавлений пластик після його виходу з сопла. В друкувальній головці може бути розміщений один або кілька екструдерів, в залежності від конкретної моделі принтера. У звичних конструкціях зазвичай застосовується лише один екструдер. На верхній частині головки є трубка, яка забезпечує подачу філамента до екструдера.

1.3 Основні параметри процесу друку

Параметри які впливають на якість друкованого виробу за технологією FFF/FDM, умовно можна поділити на:

- температурні параметри (температура плавлення філаменту, температура платформи для друку «стіл», температура в середні камери);
- параметри які залежать від механіки 3D-принтера (діаметр сопла, швидкість друку, тип подачі матеріалу, кінематика 3D-принтера);
- параметри налаштування моделі до друку (товщина шару, швидкість подачі філаменту, щільність заповнення, кількість зовнішніх контурів, підтримувальні структури).

1.3.1 Температурні параметри друку

Давайте розглянемо температурні параметри, які залежать від матеріалу для друку. Один із основних аспектів FFF/FDM-друку – це температура екструдера. Це нагрівальний елемент, через який проходить філамент перед тим, як його видавлять (рис. 1.3). Вона визначає температуру плавлення полімеру і впливає на адгезію між шарами, рівномірність подавання матеріалу та якість поверхні виробу.



Рисунок 1.3 – Філамент для 3D-друку

Для різних матеріалів цей параметр має власні оптимальні діапазони, табл.

1.1.

Таблиця 1.1 – Властивості філаменту

Назва	Примітка
Полілактид (PLA)	біорозкладний, легко друкується, низька температура плавлення (від 180 °C до 220 °C).
Акрилонітрилбутадієнстирол (ABS)	міцний, термостійкий, потребує підігріву стола (від 230 °C до 260 °C).
Полікарбонат (PC)	висока міцність і прозорість, температура екструзії від 260 °C до 300 °C
PETG	поєднання міцності та простоти друку, стійкий до вологи.
Нейлон (PA)	зносоустійкий, гнучкий, вбирає вологу.
TPU/TPE	еластомери, гнучкі, з високою ударостійкістю.
HIPS	легкий, використовується як підтримка, розчиняється в лимонній кислоті.
PVA/BVOH	водорозчинні матеріали для підтримок.

Якщо температура недостатня, філамент не може повністю розплавитися, що призводить до нерівномірного нанесення шару і погіршення зчеплення між ними. Занадто висока температура може викликати перегрів, надмірне витікання матеріалу з форсунки та утворення дефектів на поверхні. Температура робочої платформи є ключовим показником, що забезпечує прилипання першого шару моделі до поверхні.

Нагрівання запобігає відшаровуванню та викривленню моделі, що є особливо важливим для матеріалів з високим коефіцієнтом термічного розширення.

Для PLA пластику зазвичай рекомендується температура платформи в межах 50 °C до 60 °C. Для ABS пластику оптимальна температура складає від 90 °C до 110 °C, а для PETG від 70 °C до 90 °C. Недостатнє нагрівання може викликати відрив моделі під час друку, тоді як надмірне нагрівання призводить до деформації нижніх шарів або втрати геометричної точності. Для деяких типів матеріалів, таких як ABS, ASA, нейлон або полікарбонат, критично важливо стежити за температурою в робочій камері. Закрита камера з обігрівом, що підтримує температуру від 40 °C до 60 °C, забезпечує рівномірне охолодження шарів та зменшує внутрішні напруження. Це дозволяє уникнути розшарування або деформації виробу.

1.3.2 Механічні параметри

Діаметр сопла (Nozzle diameter), визначає товщину матеріальної лінії, яка наноситься, та має безпосередній вплив на точність, швидкість та міцність виробу. Найбільш поширений діаметр становить 0,4 мм, але існують також варіанти від 0,2 мм для високоякісного друку до 0,8 мм для швидкого створення великих моделей. Зменшення діаметра сопла дозволяє створювати тонкі деталі, але це потребує більше шарів і часу. Збільшення діаметра пришвидшує процес, проте знижує деталізацію і може призвести до появи видимих меж між шарами, (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Приклади сопіл для 3D-друку

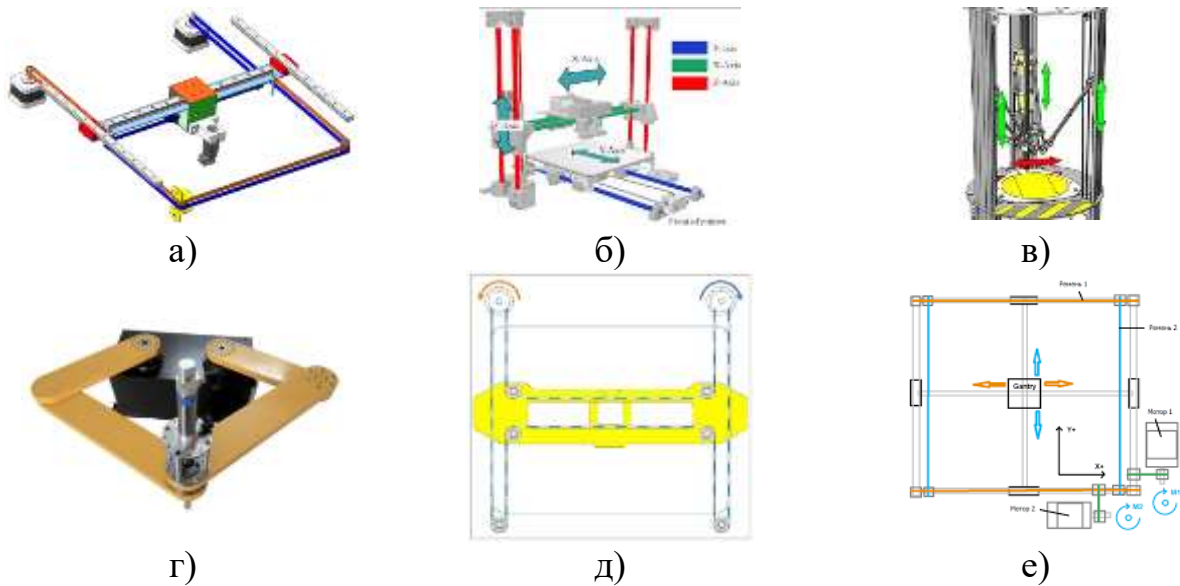
Швидкість друку (Print speed) – це один з найважливіших параметрів у процесі 3D-друку за технологією FFF/FDM. Вона визначає, як швидко переміщується друкуюча головка або платформа під час видавлювання матеріалу. Цей показник безпосередньо впливає на час виготовлення виробу, точність позиціонування, якість поверхні та адгезію між шарами. Загалом,

- швидкість переміщення при екструзії (звичайно від 30 мм/с до 100 мм/с);
- швидкість переміщення без подачі матеріалу від 150 мм/с до 300 мм/с;
- прискорення (acceleration) та ривок (jerk), які визначають, як швидко принтер змінює напрям або швидкість руху.

Кінематична схема 3D-принтера – це основа, на якій будується механічна система, що відповідає за рух робочих вузлів, таких як екструдер і платформа.

Вона не лише визначає максимальну швидкість, але й впливає на динаміку руху, стабільність позиціонування та рівень вібрацій, які, в свою чергу, можуть позначитися на якості друку.

Існує кілька основних типів кінематичних систем для FDM-принтерів: картезіанська, CoreXY, H-Bot, Delta, Polar та Scara (рис. 1.5).



а – CoreXY кінематика; б – картезіанська кінематика; в – Delta кінематика;
г – Scara кінематика; д – H-bot кінематика; е – Ultimaker кінематика

Рисунок 1.5 – Види кінематик 3D-принтерів

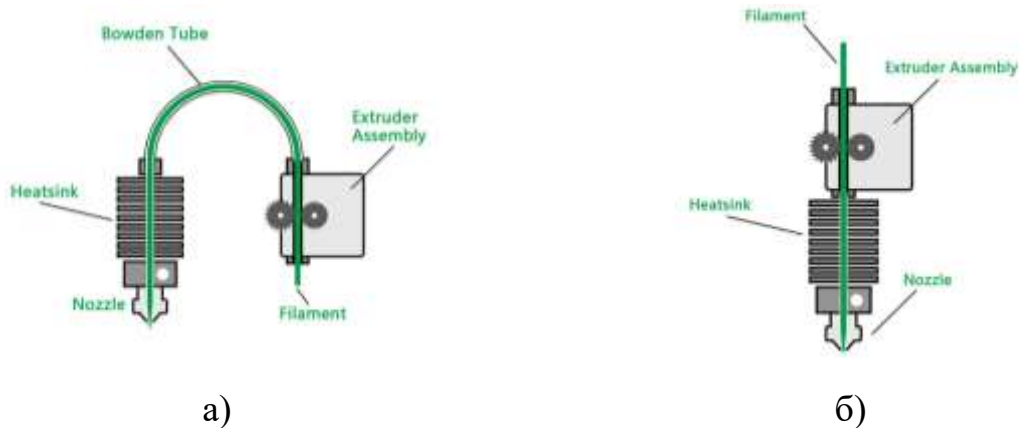
Середні значення швидкості найпопулярніших кінематик 3D-принтерів, наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Діапазон швидкості друку для різних кінематик

Кінематики	Діапазон швидкості друку, мм/с	Примітка
Картезіанська	від 60 до 80	Картезіанська кінематика забезпечує рух по трьох перпендикулярних осях (X, Y, Z): друкуюча голівка рухається по X і Y, а платформа по Z.
CoreXY та H-Bot	від 100 до 200	Рух друкуючої головки в площині X та Y здійснюється двома ременними приводами зі стаціонарними двигунами, що зменшує масу рухомої частини й підвищує швидкість та прискорення.
Delta	від 300 до 500	Мають три вертикальні осі з незалежними приводами, що переміщують каретку паралельними важелями. Легка друкуюча голівка забезпечує високу швидкість руху.

Вплив маси рухомих вузлів на друк. Маса рухомих елементів, таких як каретки, екструдери, шланги та кабелі, має значний вплив на максимальну швидкість і прискорення. Коли маса збільшується, зростає інерція, що може призводити до вібрацій, риплінгу (хвилястості поверхні) і зниження точності.

Саме тому сучасні FDM-принтери часто використовують системи, як Remote direct drive або Bowden, де подача філаменту відбувається через трубку, а важкий мотор розташований поза рухомою кареткою. Це допомагає зменшити масу головки та підвищити швидкість друку без втрати точності (рис. 1.6).



а – тип подачі Bowden; б – тип подачі Direct

Рисунок 1.6 – Типи подачі філаменту до екструдеру

Динамічні параметри, такі як прискорення та ривок, мають велике значення. Окрім номінальної швидкості друку, ці параметри визначають, як швидко екструдер може змінювати напрямок руху. Якщо значення прискорення занадто великі, це може призвести до «тремтіння» або розмиття контурів, відомого як ефект «Ringing». А якщо значення занадто низькі, процес друку сповільнюється. Зазвичай оптимальні значення виглядають так:

- прискорення від 1000 мм/с^2 до 5000 мм/с^2 ;
- ривок від 5 мм/с до 20 мм/с .

Ці параметри також залежать від жорсткості рами, якості ременів і типу приводу.

1.3.3 Параметри налаштування моделі до друку

Товщина шару (Layer height) визначає вертикальну роздільну здатність друку. Вона безпосередньо впливає на деталізацію, шорсткість поверхні та тривалість виготовлення, (рис. 1.7).

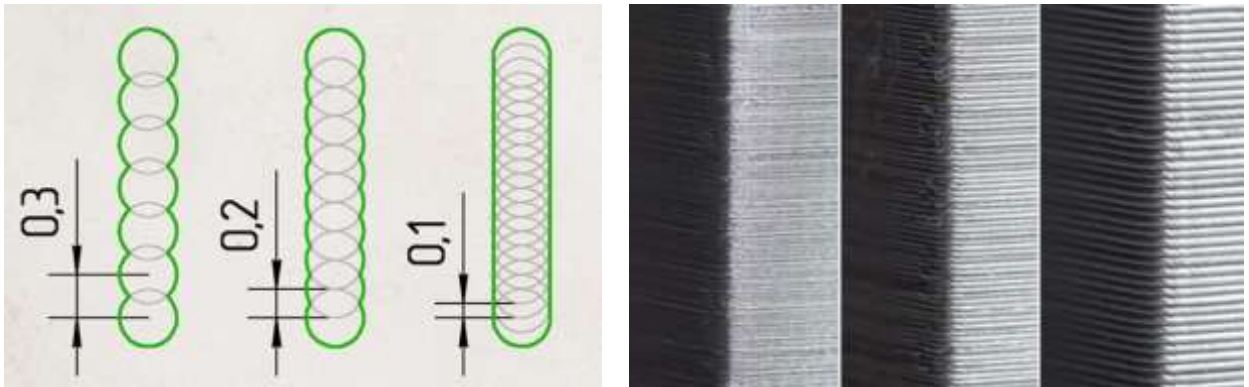


Рисунок 1.7 – Приклади висоти шару для друку

Зазвичай використовують значення від 0,05 мм до 0,3 мм. Менша товщина шару дозволяє досягти високої точності та гладкої поверхні, але при цьому збільшує час друку. З іншого боку, товсті шари забезпечують швидше виготовлення, проте поверхня виробу стає грубішою, а дрібні деталі менш помітними.

Швидкість подачі філаменту або коефіцієнт екструзії (flow rate) контролює, скільки матеріалу виходить з сопла. Зазвичай вона становить близько 100% від номінального значення, але може коригуватися в межах $\pm 5\%$. Неправильне налаштування потоку може призвести до дефектів друку: при недоподачі виникають щілини та слабке з'єднання шарів, а при надлишковій подачі – потовщення і напливи матеріалу.

Щільність заповнення (Infill density) визначає відсоток внутрішнього об'єму моделі, заповненого матеріалом. Цей параметр впливає на масу, міцність і час виготовлення (рис. 1.8).

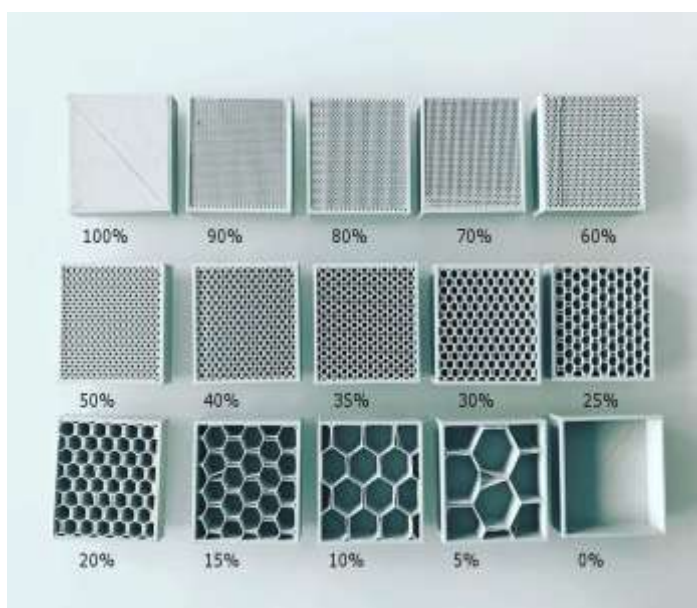


Рисунок 1.8 – Приклади заповнення 3D-моделі

Типові значення коливаються від 10 % (для декоративних виробів) до 100% (для функціональних або навантажених деталей). Окрім щільності, важливим є тип структури заповнення, наприклад, «grid», «gyroid» або «honeycomb», які поєднують міцність із мінімальними витратами матеріалу.

Кількість зовнішніх контурів (Shells або Walls) визначає товщину оболонки моделі. Зазвичай використовують від 2 до 4 периметрів. Збільшення їх кількості покращує міцність і жорсткість, особливо під час механічних навантажень (рис. 1.9). Проте це також призводить до збільшення витрат матеріалу та часу друку. Для тонкостінних або декоративних моделей кількість периметрів може бути мінімальною.

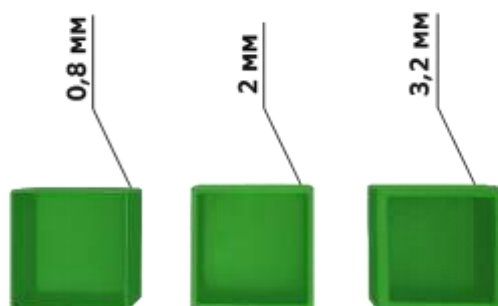
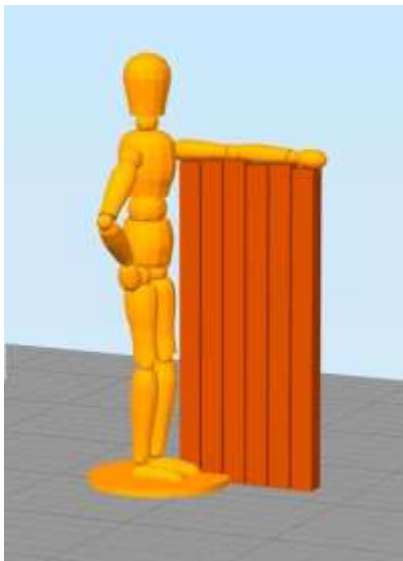
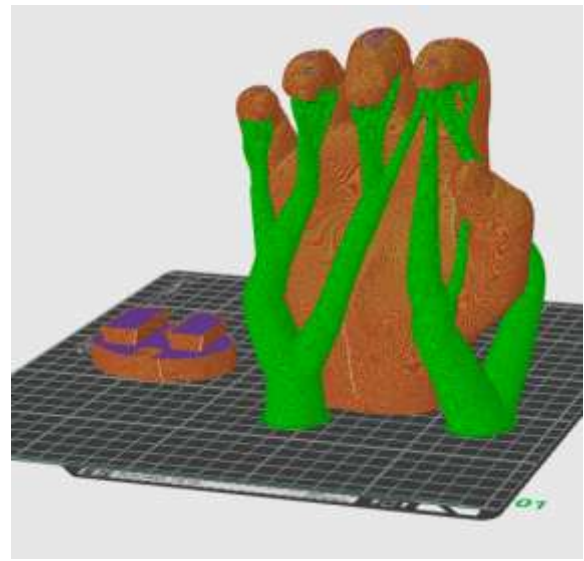


Рисунок 1.9 – Приклади товщини стінок моделі

Підтримувальні структури. Коли мова йде про друк складних моделей із нависаннями, важливо використовувати підтримки (supports) (див. рис. 1.10). Вони виготовляються з того ж матеріалу, що й основна модель, або з розчинного матеріалу, який можна легко видалити після завершення друку. Параметри підтримок, такі як тип, щільність і відстань до моделі, допомагають знайти оптимальний баланс між стабільністю друку та легкістю їх видалення.



а)



б)

а – нормальні підтримки моделі ; б – деревоподібні підтримки моделі

Рисунок 1.10 – Види підтримки моделі

1.4 Види дефектів пов'язані з температурним фактором

Незважаючи на те, що процес виготовлення може здаватися простим і доступним, якість кінцевого продукту значною мірою залежить від того, наскільки правильно налаштоване обладнання, які параметри друку використовуються та які властивості має матеріал. Якщо хоча б один з цих факторів буде порушено, це може призвести до різних дефектів, які погіршують механічні характеристики, точність і зовнішній вигляд виробів.

Одним із найпоширеніших дефектів є деформація або викривлення, відоме як «warping» (рис. 1.11). Це проявляється у вигляді відривання кутів моделі від

платформи або вигину деталей під час охолодження. Основна причина цього явища – нерівномірне охолодження шарів та велика різниця температур між соплом, матеріалом і навколишнім середовищем. Часто така проблема виникає при друці з ABS-пластику, який має високий коефіцієнт термічного розширення. Щоб уникнути деформацій, використовують підігрів платформи, закриті камери для друку або спеціальні адгезивні покриття.

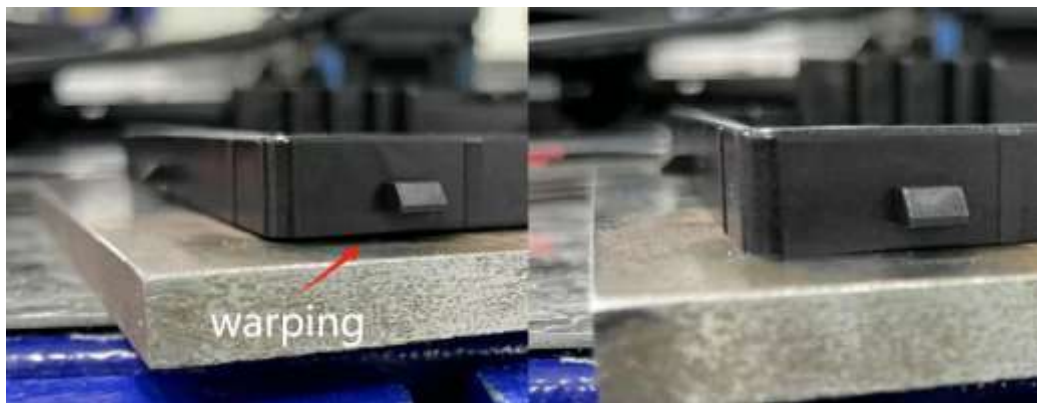


Рисунок 1.11 – Дефект друку «warping»

Іншим поширеним дефектом є розшарування, або «delamination», коли окремі шари недостатньо з'єднуються між собою, що призводить до крихкості виробу (рис. 1.12).

Причинами цього можуть бути занадто низька температура екструдера, надмірне охолодження моделі або неправильна швидкість подачі філаменту. Щоб покращити зчеплення шарів, рекомендується оптимізувати температурний режим, зменшити потік охолодження та відкоригувати швидкість друку.



Рисунок 1.12 – Дефект друку «delamination»

Часто можна спостерігати ефект пропуску матеріалу, відомий як «under-extrusion». Це відбувається, коли екструдер не подає достатню кількість пластику, що призводить до утворення порожнин, нерівностей або тонких ділянок у стінках виробу (див. рис. 1.13). Причинами можуть бути забруднення сопла, зношення подаючого механізму, невідповідна температура розплавлення або неправильно налаштований коефіцієнт подачі матеріалу. Регулярне очищення сопла, перевірка натягу філаменту та корекція налаштувань можуть допомогти вирішити цю проблему.



Рисунок 1.13 – Дефект друку «under-extrusion»

У протилежному випадку, якщо матеріалу подається занадто багато, може виникнути переплавлення або надлишкова екструзія, відома як «over-extrusion» (див. рис. 1.14). В результаті виріб має виступаючі шари, нерівні поверхні та знижений рівень точності. Часто надлишкова подача є наслідком помилок у калібруванні екструдера або неправильного діаметра філаменту, зазначеного в програмі друку.

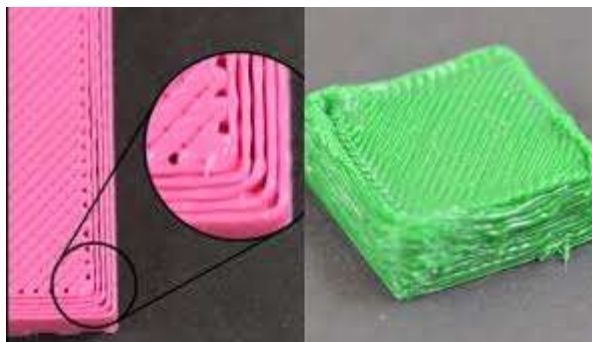


Рисунок 1.14 – Дефект друку «over-extrusion»

Ще одним типом дефектів є зсув шарів, або «layer shifting». Це порушення геометрії моделі, коли окремі шари зміщуються один відносно одного (рис. 1.15). Зазвичай основною причиною цього є механічні проблеми, такі як недостатнє натягнення ременів, пропуски кроків крокових двигунів або ж зіткнення друкарської головки з уже надрукованими ділянками. Цей дефект не лише псує зовнішній вигляд виробу, але й ускладнює подальше коректне формування верхніх шарів.



Рисунок 1.15 – Дефект друку «layer shifting»

Окрім цього, під час друку можуть виникати ниткоподібні залишки пластику, відомі як «stringing». Це трапляється, коли сопло переходить між різними частинами моделі (рис. 1.16). Причиною цього є надмірний тиск у системі подачі розплаву або недостатньо точні налаштування параметра ретракції. Щоб уникнути ефекту "ниток", важливо правильно налаштувати температуру екструзії та швидкість втягування філаменту.

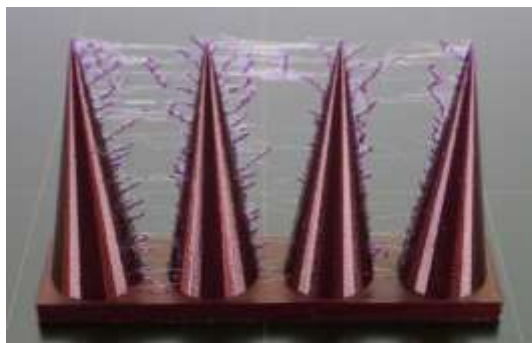


Рисунок 1.16 – Дефект друку «stringing»

Також одним із помітних дефектів може бути погана адгезія до платформи, коли перший шар не прилипає так, як потрібно. Це часто трапляється через нерівну або забруднену поверхню, неправильну відстань між соплом і платформою, або відсутність підігріву. Щоб виправити цю проблему, проводять калібрування платформи, використовують спеціальні адгезивні засоби або змінюють висоту першого шару.

Таким чином, дефекти при FFF/FDM-друці можуть мати як технологічні, так і механічні причини. Більшість з них виникають через порушення температурного режиму, неправильні налаштування параметрів друку, механічні несправності обладнання або невідповідність матеріалів. Ретельна підготовка 3D-принтера, перевірка стану філаменту та правильне калібрування параметрів процесу допомагають зменшити ризики появи дефектів і забезпечити високу якість готових виробів.

1.5 Програми для підготовки моделі до друку

Функціонал Cura 3D полягає в «нарізанні» 3D-моделей. Вона перетворює 3D-файли формату STL або OBJ у зрозумілий для принтера формат. 3D-принтери, які працюють за технологією FFF/FDM створюють 3D-об'єкти, друкуючи їх по шарам. Cura 3D бере 3D-модель, розбиває її на шари, які будуть викладатися на робочому столі, і генерує набір інструкцій для принтера - як йому працювати, шар за шаром.

Після завантаження моделі користувач може змінювати її положення, обертати або масштабувати. Важливо правильно орієнтувати об'єкт, адже це впливає на кількість підтримок, якість зовнішніх поверхонь і міцність деталі. Програма має інструмент автоматичного вирівнювання моделі по площині, що допомагає уникнути перекосів і неправильного контакту з платформою (рис. 1.17) [6].

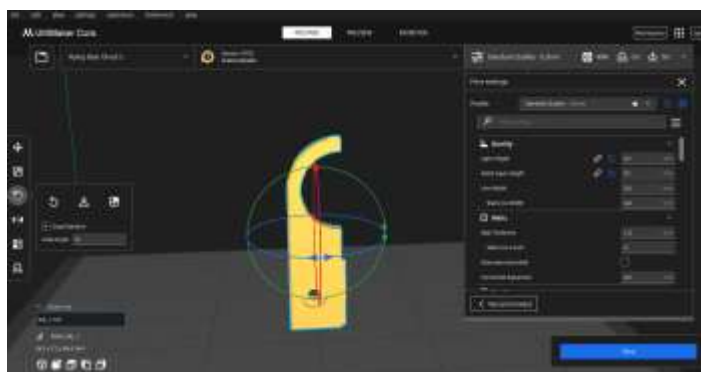


Рисунок 1.17 – Розміщення моделі в Cura

Перед тим, як почати слайсинг, важливо перевірити, чи немає у об'єкта геометричних дефектів. Cura здатна виявляти відкриті грані, замкнені об'єми або самоперетини поверхонь. Якщо модель має помилки, користувач може скористатися вбудованою функцією автоматичного виправлення сітки або попередньо відредагувати модель у CAD-програмі. Однією з найзначніших переваг Cura є її гнучка система налаштування параметрів, що дозволяє точно контролювати процес друку. У програмі є три основні рівні складності: Recommended (рекомендований), Custom (розширений) і Expert (експертний). У простому режимі користувач вводить лише базові значення, такі як товщина шару або щільність заповнення. У розширених налаштуваннях відкривається повний набір параметрів, які впливають на всі аспекти друку.

Висота шару визначає рівень деталізації моделі. Тонший шар 0,1 мм забезпечує високу якість поверхні, але збільшує час друку. Товсті шари від 0,25 мм до 0,3 мм використовують для швидких прототипів або великих об'єктів, (рис. 1.18).

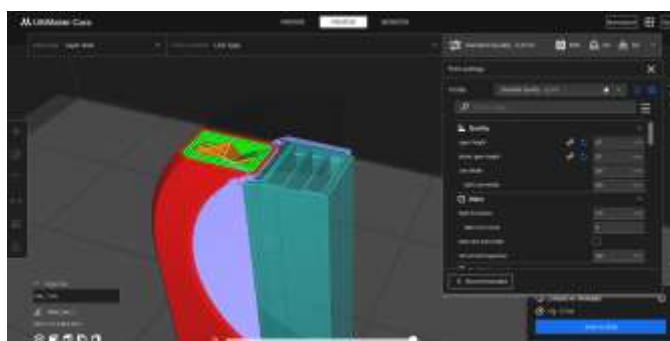


Рисунок 1.18 – Налаштування висоти шару в Cura

Температура екструдера та платформи задається залежно від типу пластику: для PLA зазвичай використовується від 190 °C до 210 °C, для ABS від 230 °C до 250 °C, а для PETG близько 240 °C. Від правильного вибору температури залежить адгезія шарів і загальна міцність виробу, (рис. 1.19).

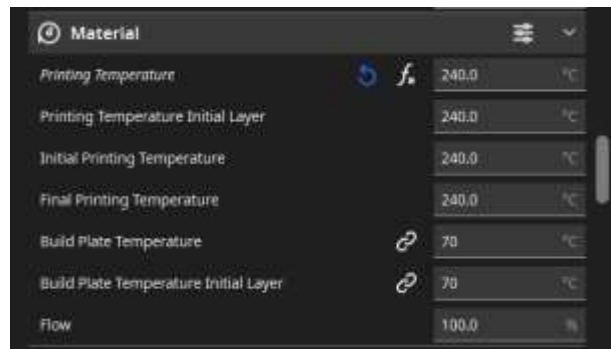


Рисунок 1.19 – Налаштування температури філаменту в Cura

Швидкість друку визначає, як швидко рухається друкуюча головка. Якщо швидкість занадто велика, це може призвести до втрати точності або навіть до розриву нитки пластику. А якщо швидкість занадто мала, це може викликати перегрів матеріалу і дефекти на поверхні (рис. 1.20). Оптимальним вважається діапазон від 40 мм/с до 60 мм/с, але для дрібних або складних елементів швидкість можна зменшити до 20 мм/с.

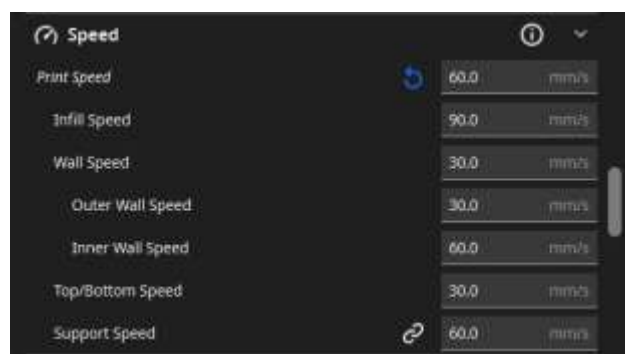


Рисунок 1.20 – Налаштування швидкості друку моделі в Cura

Наступним важливим параметром є щільність заповнення (Infill Density). Вона визначає, наскільки порожнистою буде деталь усередині. Для декоративних моделей зазвичай достатньо від 10% до 20%, тоді як для

функціональних елементів, які піддаються навантаженню, потрібно від 50% до 100%. Cura пропонує різні типи заповнення: сітка, трикутна, кубічна, гексагональна структура та інші, які впливають на міцність і вагу виробу.

Не менш важливим є вибір системи підтримок (Supports), які формуються під нависаючими частинами моделі. Користувач може обрати тип підтримки (лінійна або деревоподібна), її щільність, кут нахилу, а також матеріал, якщо принтер має подвійний екструдер. Налаштування підтримок допомагає знайти оптимальний баланс між надійністю утримання і легкістю видалення після друку (рис. 1.21).

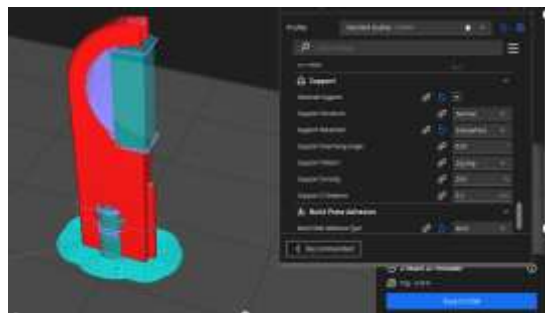


Рисунок 1.21 – Налаштування підтримок друку моделі

Адгезія до платформи – це ще один важливий аспект, який впливає на успішність друку. У програмі Cura є кілька типів підкладок: Brim, Raft та Skirt. Brim створює додаткову рамку навколо моделі, що збільшує площу прилипання; Raft формує товсту базову підкладку, яка підходить для великих або складних моделей; Skirt просто окреслює контур об'єкта, щоб стабілізувати потік пластику перед початком друку (рис. 1.22).

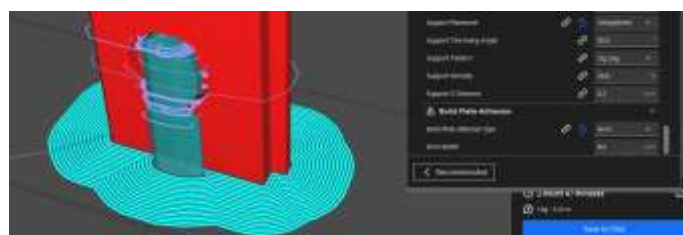


Рисунок 1.22 – Налаштування поверхні контакту моделі до столу

Cura також дозволяє регулювати охолодження моделі під час друку. Активне охолодження забезпечує якісне формування шарів при використанні PLA, тоді як для ABS воно зазвичай вимикається, щоб уникнути деформацій, (рис. 1.23).

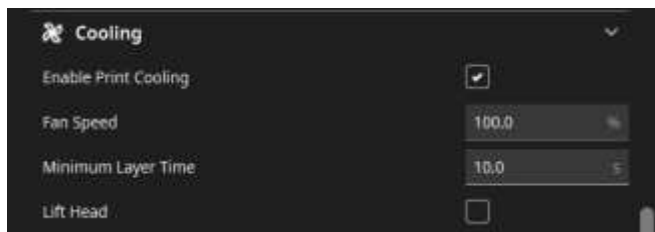


Рисунок 1.23 – Охолодження моделі

Крім того, користувач має можливість створювати зони з різними налаштуваннями, що дозволяє змінювати параметри висоти моделі. Наприклад, можна друкувати нижні шари більш міцними, а верхні з тоншими шарами для досягнення гладкої поверхні.

Особливо варто відзначити можливість налаштування швидкості, температури, потоку матеріалу та руху по різних ділянках моделі. Це дає змогу точно адаптувати процес під конкретні завдання, зокрема для деталей з тонкими стінками, складною геометрією або високими вимогами до точності.

Після налаштування параметрів виконується слайсинг, тобто процес поділу моделі на шари. Cura пропонує користувачеві детальний візуальний попередній перегляд, де можна побачити траєкторію руху екструдера, розташування підтримок, час друку та кількість матеріалу. Цей етап дозволяє перевірити правильність налаштувань ще до початку друку, що суттєво зменшує ризик браку (рис. 1.24).

ознайомитися з широким функціоналом системи підготовки моделей до друку, а також з можливостями оптимізації параметрів для досягнення необхідних механічних і термічних властивостей виробів.

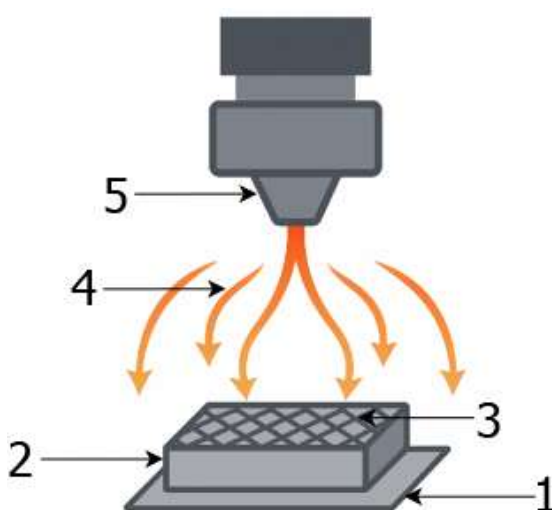
В результаті практики ми отримали цілісне уявлення про взаємозв'язок між технологічними параметрами, структурою заповнення та експлуатаційними характеристиками виробів. Отримані знання і навички можуть бути використані в подальшій роботі.

2 ОПИС ТЕРМІЧНИХ ЯВИЩЬ ПІД ЧАС 3D-ДРУКУ

2.1 Теорія теплового розсіяння під час 3D-друку

Термін "термічна стійкість" 3D-друкованих виробів означає, наскільки добре матеріал може зберігати свої механічні властивості, форму та розміри, коли піддається високим температурам або локальним джерелам нагріву. Для полімерних моделей, створених за технологією FFF/FDM, одним із ключових факторів, що впливають на термічну поведінку, є структура внутрішнього заповнення та його щільність.

Ці параметри безпосередньо впливають не тільки на механічну міцність і масу деталі, але й на теплопровідність, теплове розсіяння та стійкість до паразитного нагріву, який може виникати під час друку або в процесі подальшої експлуатації виробу. Під час друку екструдер підтримує температуру розплавлення термопласту. Навіть після того, як матеріал виходить з сопла, відбувається частковий тепловий вплив на вже надруковані шари, особливо в зонах, близьких до зони друку (рис. 2.1).



1 – платформа для друку; 2 – модель; 3 – структура заповнення;
4 – тепло від екструдеру; 5 – екструдер

Рисунок 2.1 – Принцип паразитного нагріву шарів від екструдеру

Якщо модель має високу щільність заповнення, від 80% до 100%, вона має такі характеристики:

- вищу теплопровідність;
- менший повітряний прошарок;
- повільніше тепловідведення від локальної точки нагріву.

Це може призвести до локального накопичення тепла і підвищити ризик деформації поверхневих шарів. З іншого боку, низька щільність заповнення, від 20% до 40%, створює систему повітряних порожнин, які:

- виконують роль теплових ізоляторів;
- зменшують швидкість поширення тепла;
- допомагають рівномірніше розподілити теплову енергію в об'ємі.

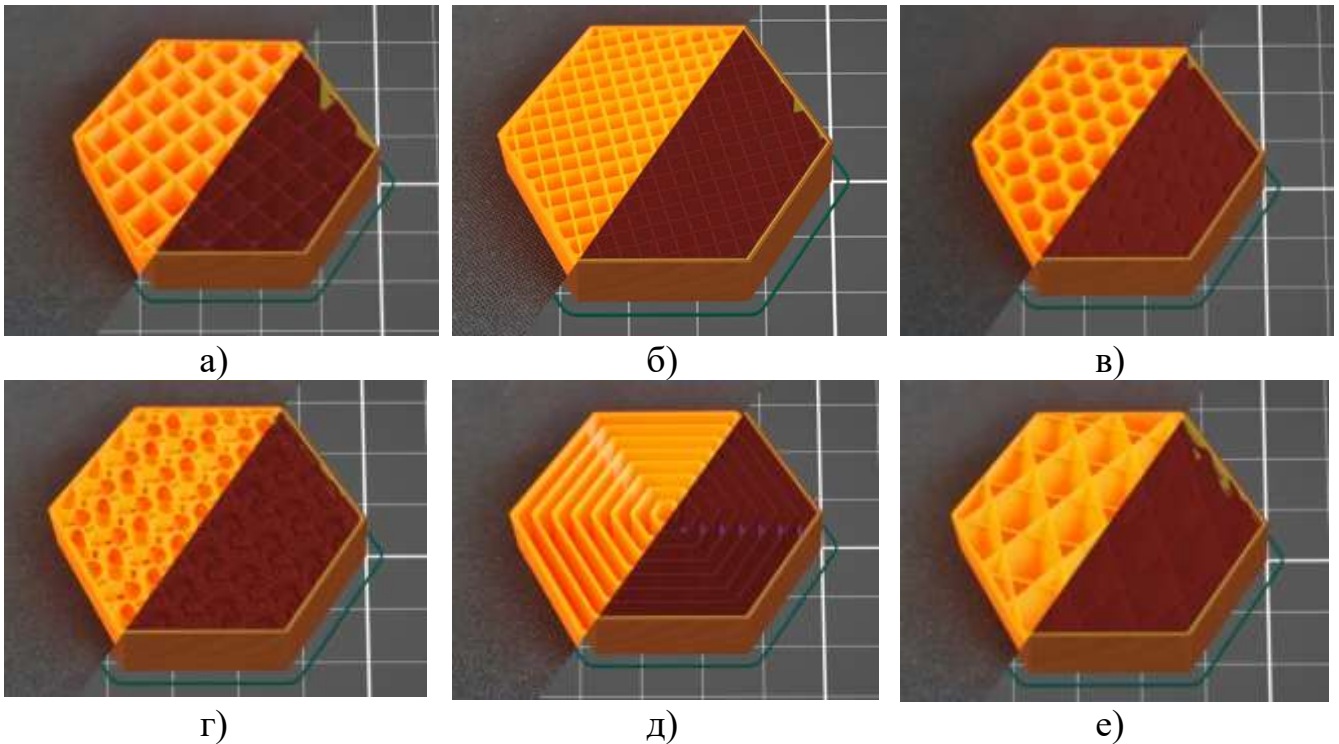
Таким чином, щільність заповнення відіграє ключову роль у визначенні теплової інерції та здатності моделі до самовідведення паразитного тепла. Тип геометрії заповнення в Cure впливає на шляхи теплопередачі та розподіл температурних градієнтів всередині деталі. Давайте розглянемо найпоширеніші варіанти (рис. 2.2):

- тип заповнення «grid» (сітка) та «rectilinear» (прямолінійний). Ця структура має лінійний вигляд, що забезпечує відносно добру теплопровідність уздовж шарів, але може призводити до температурних напружень у кутах;

- тип заповнення «honeycomb» (соти) та «gyroid» (гіроїд). Вони мають ізотропну структуру, що дозволяє тепловому потоку рівномірно розподілятися в усіх напрямках, що підвищує термічну стійкість;

- тип заповнення «concentric». Концентричні контури ефективно розсіюють тепло від центру до країв, зменшуючи ризик перегріву в локальних зонах;

- тип заповнення «cubic» (кубичний) та «octet». Це тривимірна решітчаста структура, яка створює систему каналів для теплового розсіювання, але при високій щільності може призводити до накопичення тепла в вузлах.



а)

б)

в)

г)

д)

е)

а – тип заповнення «grid»; б – тип заповнення «rectilinear»;

в – тип заповнення «honeycomb»; г – тип заповнення «gyroid»; д – тип

заповнення «concentric»; е – тип заповнення «cubic»

Рисунок 2.2 – Приклади внутрішньої структури моделі

Через шарову природу FDM-друку виріб має анізотропні теплофізичні властивості. У напрямку шарів XY-площина теплопровідність вища, а вздовж осі Z нижча через наявність міжшарових меж і мікропустот.

Тому тип і напрямок заповнення визначають, як паразитне тепло від екструдера буде поширюватися. У лінійних структурах, переважно горизонтально, у просторових таких як , «gyroid» або «cubic», тривимірно з більш рівномірним розсіянням.

Якщо розглядати процес теплопередачі у спрощеній формі, то кількість тепла, що передається від гарячої ділянки екструдера до моделі, описується рівнянням теплопровідності, формула (2.1):

$$Q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}, \quad (2.1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

A – ефективна площа поперечного перерізу шляху теплопередачі (залежить від структури заповнення);

dT/dx – температурний градієнт.

Коли щільність заповнення A зростає, тепло передається швидше, але його розподіл стає менш рівномірним, що підвищує ризик локального перегріву. А от при меншій щільності A зменшується, і повітряні канали обмежують теплопередачу, завдяки чому модель краще зберігає свою форму під впливом паразитного тепла.

На основі знання цієї особливості можливо зробити наступні поради:

– для моделей, які піддаються тривалому локальному нагріву, доцільно використовувати низьку або середню щільність заповнення від 30% до 60% із ізотропними структурами типу «gyroid» або «honeycomb»;

– для конструкцій, де важлива механічна міцність, допускається щільніше заповнення, але слід контролювати температуру екструдера та забезпечити охолодження під час друку;

– у проектуванні термостійких деталей важливо враховувати компроміс між міцністю, масою та тепловою стабільністю.

Структура та щільність заповнення 3D-друкованих моделей є важливими параметрами, які визначають термічну стійкість виробів. Вони формують шляхи теплопередачі, температурні градієнти та ефективність теплового розсіяння, що впливають на поведінку матеріалу під час паразитного нагрівання від екструдера або зовнішніх джерел тепла. Оптимізація цих параметрів допомагає підвищити геометричну стабільність і надійність пластикових компонентів, які піддаються термонавантаженим умовам.

2.2 Опис макету для проведення досліджень

Для проведення досліджень був обраний один з най популярніших та бюджетних 3D-принтер Flyingbear Ghost 5 (рис. 2.3). Цей верстат має міцну механіку, продуману кінематику та можливість бездротового з'єднання через Wi-Fi, що робить його зручним для проведення досліджень.



Рисунок 2.3 – Основні компоненти екосистеми Klipper

3D-принтер відноситься до закритих FDM-систем з кінематикою типу MakerBot, що забезпечує високу швидкість, точність друку та простоту обслуговування, (рис 2.4).



Рисунок 2.4 – Кінематика на базі MakerBot

Акрилові панелі корпусу створюють закриту робочу камеру це важлива перевага при друку матеріалами, які чутливі до змін температури, такими як ABS

або ASA. Основні технічні характеристики моделі Flyingbear Ghost 5 наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Ключові характеристики 3D-принтера Flyingbear Ghost 5

№ за/п	Характеристика	Опис
1	Область друку	255 мм×210 мм×210 мм, що дозволяє створювати моделі середнього розміру
2	Екструдер	Direct Drive, що забезпечує кращу подачу гнучких матеріалів, ніж у системах типу Bowden
3	Нагрівальний стіл	Підігрів до 110°C, що сприяє надійній адгезії моделей до поверхні
4	Материнська плата	MKS Robin Nano V1.2. Ця плата має достатній функціонал для роботи з Klipper, оскільки вона оснащена потужним мікроконтролером STM32 та тихими драйверами крокових двигунів TMC2208

Принтер FlyingBear Ghost 5 в даному дослідженні має наступну конфігурацію:

- екструдер типу Volcanov з бі-металевим бартером;
- механізм подачі філаменту MK8 типу Bowden;
- ходовий гвинт та гайка T8, для переміщення платформи по осі Z;
- ремені GT-6 та шківви по 20 зубців, для переміщення екструдера по осях X та Y.

З програмного забезпечення, макет для дослідження використовує прошивку Klipper, що дозволить більш ретельно відстежувати швидкості друку та зміну температури на екструдері та столі.

Це в свою чергу впливає на електронну складову. В макеті використовується дві плати керування MKS Robin Nano V1.2 для керування механікою принтера та Raspberry Pi 4 для керування та відстежування роботи принтера під час друку. Для переміщення столу та екструдера використовуються крокові двигуни Nema 17A (42BYGH34-401AS) для всіх осей та механізму подачі.

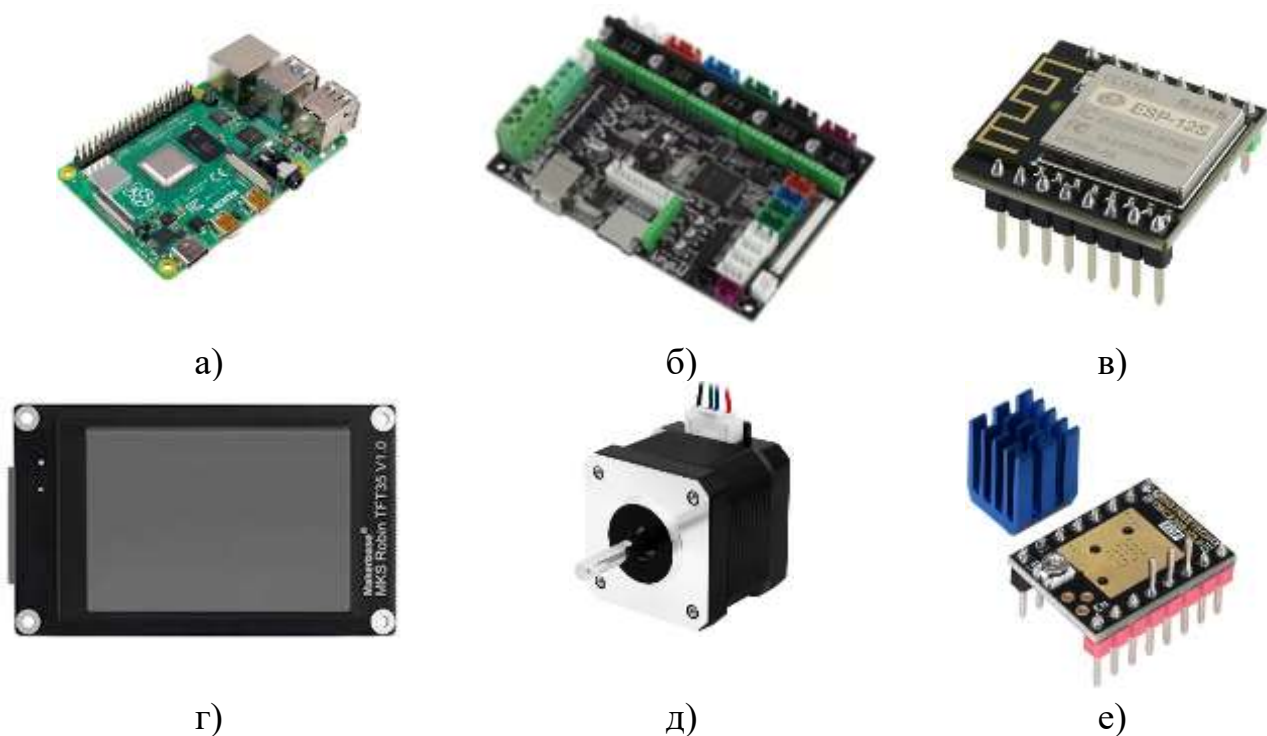
Для більшої точності двигунів використовуються драйвера TMC2208, він працює тихо, а управління здійснюється через сенсорний кольоровий

дисплей MKS TFT35 з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом. Для віддаленого керування принтером через Wi-Fi, використовується MKS Robin WIFI V1.1 (ESP-12S).

У стандартній комплектації є сенсор наявності філаменту та функція відновлення друку після відключення живлення, що робить процес більш надійним і безпечним.

Для відстежування положення столу та екструдера використовуються звичайні механічні датчики. Охолодження радіатора екструдера відбувається за допомогою кулерів 30 мм×30 мм на 24 В, охолодження моделі також за допомогою повітря, а саме равлико подібного кулера 40×40 на 24 В. Блок живлення має потужність 350 Вт та вихідну напругу 24 В.

На рис. 2.5 наведені основні електронні компоненти макету для дослідження



а – плата керування Raspberry Pi 4; б – плата керування MKS Robin Nano V1.2;
в – Wi-Fi модуль; г – дисплей MKS TFT35; д – кроковий двигуни Nema 17A;
е – драйвера TMC2208

Рисунок 2.5 – Електронні компоненти макету для проведення досліджень

2.3 Аналіз САУ для крокового двигуна механізмам подачі

Згідно із технічним завданням заносимо початкові дані до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення параметрів САУ

Найменування	Позначення	Значення
Коефіцієнт підсилення ПП	$K_{ПП}$	500
Коефіцієнт підсилення драйвера	K_D	2,0
Стала часу драйвера	T_D	0,005 с
Коефіцієнт моменту двигуна	K_M	$0,0111 \text{ Н} \cdot \frac{\text{М}}{\text{А}}$
Стала електромеханічної системи	$T_e = \frac{L}{R}$	0,000567 с
Момент інерції ротора (оцінено)	J	$\approx 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Стала часу позиційного датчика	$T_{дат}$	0,02 с
Крок двигуна (без мікрошагу)	θ_k	1,8

K_M обчислено з номінального моменту при номінальному струмі, формула (2.2):

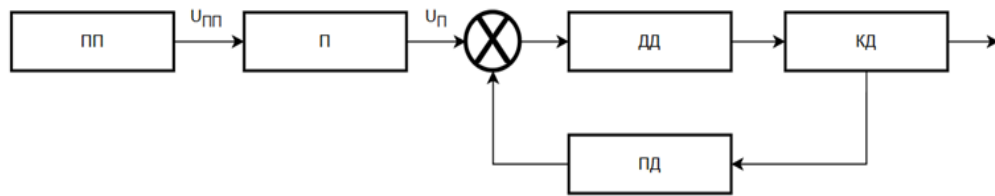
$$K_M = \frac{0,5 \cdot 10^{-2}}{0,45} \approx 0,111 \text{ Н} \cdot \frac{\text{М}}{\text{А}}. \quad (2.2)$$

До табл. 2.3 заносимо вимоги, яким повинна задовольняти вихідна САУ.

Таблиця 2.3 – Вимоги, щодо якості процесу управління

Найменування	Позначення	Значення
Максимальний час встановлення	t_c	0,5 с
Допустиме перерегулювання	σ	$\leq 10 \%$
Статична похибка	$\varepsilon_{ст}$	$\leq 1 \%$

На рис. 2.6, наведене функціональна схема САУ.



Лінійна неперервна САУ позиціонування крокового двигуна (КД) містить:

КД як об'єкт регулювання, плата керування (ПП), підсилювач (П),
позиційний датчик (ПД) і драйвер двигуна (ДД)

Рисунок 2.6 – Функціональна схема САУ

Лінійна неперервна САУ позиціонування крокового двигуна NEMA14 містить: кроковий двигун 42BYGH34-401AS як об'єкт регулювання, позиційний датчик (енкодер) у ланцюзі негативного зворотного зв'язку, елемент порівняння, підсилювач керування (П), драйвер двигуна (ДД) і плату керування як задавальний пристрій.

Формула елемента порівняння:

$$e(t) = \theta_{зад}(t) - \theta_{вих}(t), \quad (2.3)$$

де $e(t)$ – сигнал помилки (різниця між бажаним і фактичним положенням двигуна);

$\theta_{зад}(t)$ – задане значення кута повороту двигуна;

$\theta_{вих}(t)$ – фактичне значення кута повороту двигуна.

Формула підсилювача ПП, знаходимо за формулою (2.4):

$$U_{ПП}(s) = K_{ПП} \cdot E(s), \quad (2.4)$$

де $U_{ПП}(s)$ – вихідна напруга плати керування;

$K_{ПП}$ – коефіцієнт підсилення ПП;

$E(s)$ – сигнал помилки в образі Лапласа.

Передавальна функція драйвера, знаходимо за формулою (2.5):

$$W_D(s) = \frac{K_D}{T_D s + 1}, \quad (2.5)$$

де $W_D(s)$ – передавальна функція драйвера;

K_D – коефіцієнт підсилення драйвера;

$T_D s$ – стала часу драйвера.

Передавальна функція крокового двигуна, знаходимо за формулою (2.6):

$$W_{\text{двиг}}(s) = \frac{K_M}{J s^2 + T_e s + K_M}, \quad (2.6)$$

де $W_{\text{двиг}}(s)$ – передавальна функція виконавчого двигуна;

K_M – коефіцієнт моменту двигуна;

J – момент інерції ротора;

T_e – електрична стала часу двигуна;

s – комплексна змінна Лапласа.

Формула позиційного датчика, знаходимо за формулою (2.7):

$$W_{\text{САУ}}(s) = \frac{K_{\text{ПП}} \cdot K_D \cdot K_M}{(T_D s + 1)(J s^2 + T_e s + K_M)(T_{\text{дат}} s + 1)}, \quad (2.7)$$

Таким чином, функція всієї замкненої системи, бути мати наступним чином:

$$\begin{aligned} W_{\text{САУ}}(s) &= \frac{K_{\text{ПП}} \cdot K_D \cdot K_M}{(T_D s + 1)(J s^2 + T_e s + K_M)(T_e s + 1)}, \\ &= \frac{K_{\text{ПП}} \cdot K_D \cdot 0,0111}{1,0 \cdot 10^{-7} s^2 + 5,66 \cdot 10^{-4} s + 0,0111}, \\ W_{\text{САУ}}(s) &= \frac{2,22}{1,0 \cdot 10^{-7} s^2 + 5,66 \cdot 10^{-4} s + 0,0111}. \end{aligned}$$

2.4 Висновки до другого розділу

У процесі аналізу та досліджень, проведених у другому розділі, було детально розглянули ключові аспекти формування термічної стійкості виробів, надрукованих за технологією FFF/FDM, а також елементи управління механізмами подачі матеріалу.

У підрозділі 2.1 ми зосередилися на теоретичних основах теплового розсіювання під час 3D-друку. Виявилось, що основними джерелами тепла в процесі екструзії є сопло екструдера та нагріта платформа. Під час друку відбувається не лише передача тепла до нових шарів моделі, але й ненавмисне нагрівання вже надрукованих ділянок. Ми проаналізували механізми теплопередачі (теплопровідність, конвекція, випромінювання) та їхній вплив на рівномірність охолодження моделі. Було визначено, що структура заповнення та геометрія шару суттєво впливають на температурне поле всередині виробу, а отже, і на його термічну стійкість.

Описано макет, створений для проведення експериментальних досліджень впливу параметрів заповнення на теплові характеристики моделей. Тут ви знайдете конструкцію дослідного зразка, принцип його роботи, а також особливості вимірювальної системи. Розроблений макет дозволяє контролювати температуру в різних зонах виробу, змінювати геометрію заповнення та режим друку, що забезпечує можливість отримання достовірних експериментальних даних для подальшого аналізу.

Також проведено аналіз системи автоматичного управління (CAU) кроковим двигуном, який відповідає за подачу матеріалу. Визначено структуру керуючого контуру, описано основні параметри регулятора та принципи формування сигналів керування. Дослідження показало, що стабільність і точність подачі філаменту безпосередньо впливають на якість шароутворення, рівномірність прогріву матеріалу й, відповідно, на термічну однорідність надрукованих виробів.

Підсумовуючи результати другого розділу, можна стверджувати, що теоретичний аналіз теплових процесів, створення експериментального макета та вивчення системи автоматичного управління подачею матеріалу є важливими кроками для розробки моделі, яка демонструє вплив структури заповнення на термічну стійкість друкованих виробів. Отримані результати стануть основою для подальшого моделювання та експериментальної перевірки ефективності різних структур заповнення в наступних розділах роботи.

3 ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ДРУКУ НА ТЕРМІЧНУ СТІЙКІСТЬ ВИРОБУ

3.1 Побудова плану експерименту

Виходячи з мети роботи, а саме розробка моделі, що дозволяє оцінювати міцність моделі та прогнозувати вплив структури заповнення моделі на термічну стійкість виробу.

Необхідно розробити серію дослідів які би дозволили розробити реальну модель впливу параметрів заповнення на термічну стійкість та появу дефектів друку виробу. Для цього необхідно провести наступні напрацювання, а саме:

- визначити які параметри дійсно впливають на термічну стійкість виробу та необхідно включити модель та їх діапазон значення;
- визначити матеріали для друку на яких буде проводитися дослідження;
- визначити метод за допомогою якого буде оцінюватися міцність виробу;
- розробити модель тестового зразка, який буде використовуватися для вимірювання;
- побудувати регресійну-кореляційну модель впливу параметрів заповнення на термічну стійкість виробу;
- визначити оптимальні параметри друку та заповнення моделі.

Виходячи з проведеного аналізу параметри друку які дійсно теоретично можуть впливати на термічну стійкість та механічну міцність друкованого виробу, є наступними:

- кількість стінок моделі;
- коефіцієнт заповнення моделі;
- тип заповнення моделі;
- температура екструдера.

Саме ці параметри напряму впливають на механічну міцність виробу. Оскільки властивості такі як термічна стійкість та міцність виробу більш

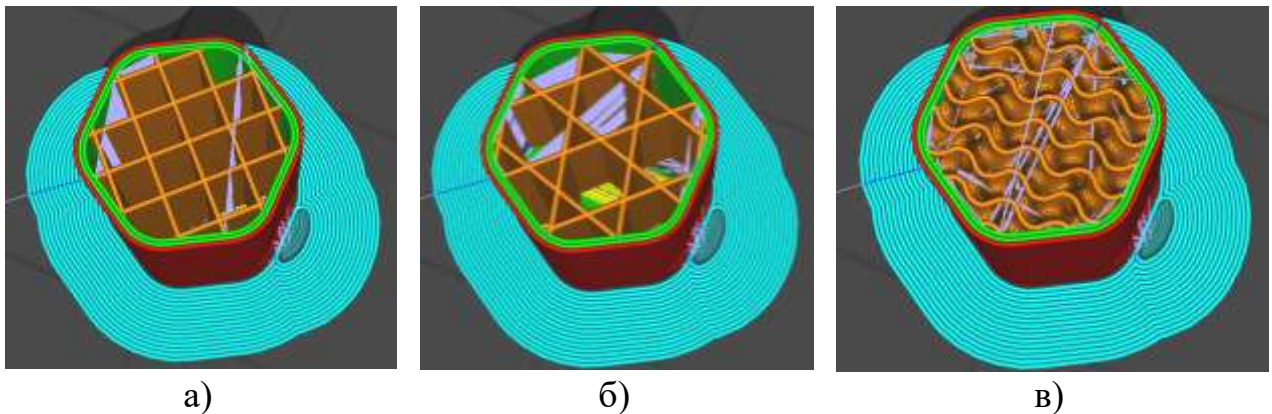
притаманні для деталей конструктивного призначення, то і діапазон значень пропонується обрати рекомендованих для таких виробів.

Найпоширеніший варіант діаметра сопла для FFF/FDM 3D-друку є 0,4 мм, тобто мінімальна ширина стінки моделі 0,4 мм. Для конструктивних деталей найчастіше використовується товщина стінки від 1,2 мм до 2 мм, або кількість ліній стінки 3 та 5. Таким чином у даному досліді буде використовуватися три значення цього параметру, а саме, кількість ліній стінки 3 та 5.

Коефіцієнт заповнення моделі для конструктивних виробів зазвичай рекомендований від 60% до 90% від внутрішнього об'єму виробу. Тому обраний цей діапазон з кроком 10%.

Оскільки типів заповнення моделі, в програмному середовищі Cura, доволі багато, для зменшення кількості серій експериментів, було обрано взяти три найчастіше вживаних варіанти, а саме, рис. 3.1:

- тип заповнення сітка «grid»;
- тип заповнення шестикутник «honeycomb»;
- тип заповнення хвиля «gyroid».



а – тип заповнення сітка «grid»; б – тип заповнення шестикутник «honeycomb»;
в – тип заповнення хвиля «gyroid»

Рисунок 3.1 – Типи заповнення для проведення дослідження

Саме ці варіанти вважаються найбільш вживаними для підвищення міцності виробу. Того ж ці варіанти мають різну структуру, обумовлену кількістю кутів (наприклад: сітка 4 кута, шестикутник 6 кутів), значенням кута

побудови заповнення, плавністю кута (наприклад хвиля) та двох вимірності та трьох вимірності побудови.

Температура друку екструдера напряму залежить від філаменту. Для конструктивних деталей використовуються пластики з високою температурою правлінням, тому саме на них більш доцільно будувати наступні дослідження, бо можна краще спостерігати термічні ефекти розсіяння тепла від екструдера. Для даного дослідження буде взято дві марки пластику а саме:

- PETG філамент, температура екструзії від 230 °C до 250 °C;
- Nylon філамент, температура екструзії від 240 °C до 270 °C.

Таким чином в регресіно-кореляційну модель буде входити чотири параметри, а кількість експериментів для кожного філаменту буде складати 96 тестових зразків.

Для перевірки міцності надрукованих тестових зразків буде використовуватися метод з підвішеною масою на зразку та заміром сили розтягування зразка під дією зовнішнього тепла зразка. Для заміру сили буде використовуватися динамометри та вантажі з вагою 1 кг, 2,5 кг, 4 кг та 5 кг, (рис. 3.2). Якщо зразок буде витримувати навантаження 5 кг, то вага буде додаватися, а саме: 6 кг, 7,5 кг, 9 кг, 10 кг та 12,5 кг.

Сила для розрив друкованого зразка планується докладатися в здовж шарів друку моделі, оскільки через особливості технології друку, саме між шарові з'єднання є най вразливішими для механічного навантаження.

Для визначення термічної стійкості виробу буде використовуватися метод термічного розм'якшення, топ то температура, за якої деталь деформується під навантаженням. Принцип дії полягає в наступному.

До тестового зразка підвішуються маса з гагою 1 кг, після чого зразок з масою встановлюються в сушильній камері, де можливо контролювати температуру. З ростом температури зразок під дією маси почне деформувати зразок та видовжувати його, та вікується температура при яких довжина зразка змінюється 0,2 мм.



а)



б)

а – індукційна камера нагріву; б – динамометр для вимірювання зразка

Рисунок 3.2 – Обладнання для проведення дослідження

Тестовий зразок буде мати шестикутну форму з двома отворами знизу та зверху, для фіксації динамометру та ваги. Розміри зразка складають 20 мм×21,5 мм×42 мм, рис. 3.3.

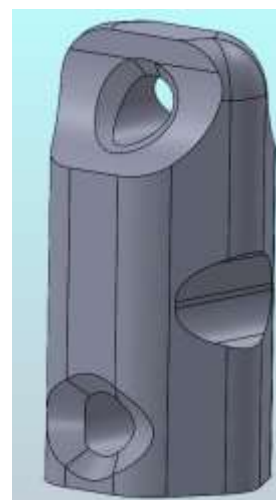
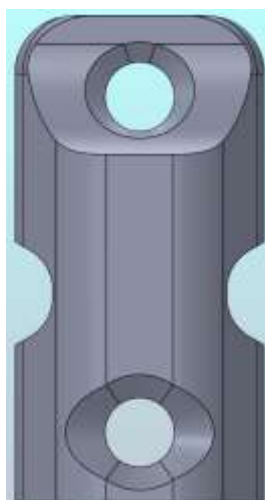


Рисунок 3.3 – Модель тестового зразка в CAD системі SolidWorks

3.2 Проведення емпіричних досліджень

Виходячи з плану експерименту була проведена серія дослідів з 96 друкованих тестових зразків для двох видів філаменту PETG та Nylon. Таким

чином виходить що для кожного пластику було виготовлено по 48 тестових зразків з різними технологічними параметрами, а саме:

- кількість стінок моделі від 3 та 5 ліній;
- коефіцієнт заповнення моделі від 60% до 90% з кроком 10 %;
- з трьома типами заповнення моделі «grid», «honeycomb» та «gyroid»;
- з двома значеннями температури (мінімальним та максимальним значенням) для кожного пластику. PETG пластику мінімальна температура екструзії 230 °С, максимальна температура екструзії 250 °С. Nylon пластик мінімальна температура екструзії 240 °С, максимальна температура екструзії 270 °С.

На рис. 3.4 наведені зразки тестових зразків з різною щільністю та типом заповнення моделі.



Рисунок 3.4 – Приклад надрукованих тестових зразків

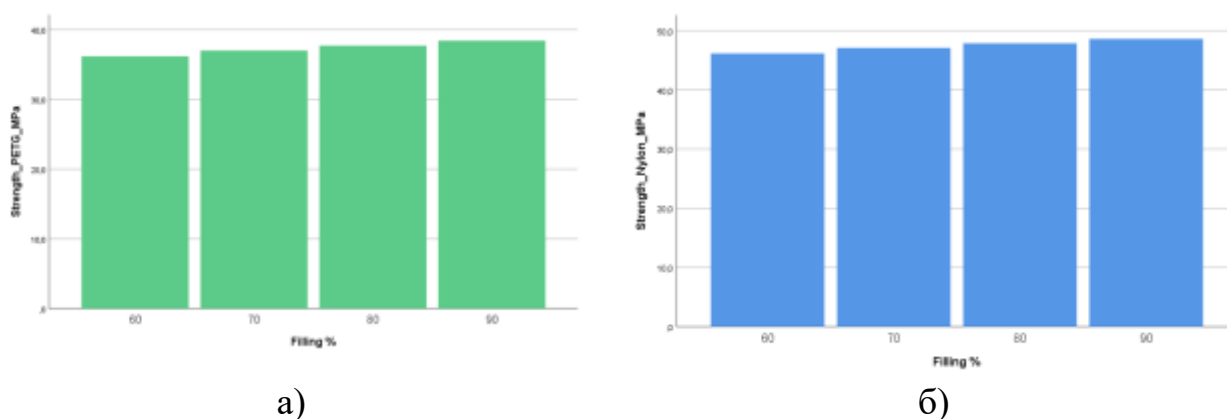
Після виготовлення тестових зразків з різними параметрами друку, було переведення тестування на термічну стійкість та міцність зразка за допомогою динамометра та вантажів з різною вагою, рис 3.5.



Рисунок 3.5 – Проведення досліджень на розрив зразка

За допомогою цього методу можливо визначити як сильно впливають параметри друку модель на її механічну міцність, а щільність заповнення та тип заповнення впливають на термічну стійкість виробу та утворення структурних дефектів, які можуть повипливати на міцність друкованого виробу. Результати вимірювань наведені у Додаток Б.

За результатами дослідження вже можна судити що при збільшенні щільності заповнення моделі збільшується її міцність, рис. 3.4.



а) – результати вимірювань для PETG пластику; б) – результати вимірювань для Nylon пластику

Рисунок 3.4 – Попередні результати досліджень

Що стосовно другої частини експериментів впливу структури та щільності заповнення на термічну стійкість, можна зробити висновок, що термічна

деформація однакова, та має однаковий патерн, що за типом структури заповнення моделі що за температурою деформації. І більше відіграє роль матеріал з якого виготовлений зразок, Nylon більш термічно стійкий ніж PETG, рис. 3.5.

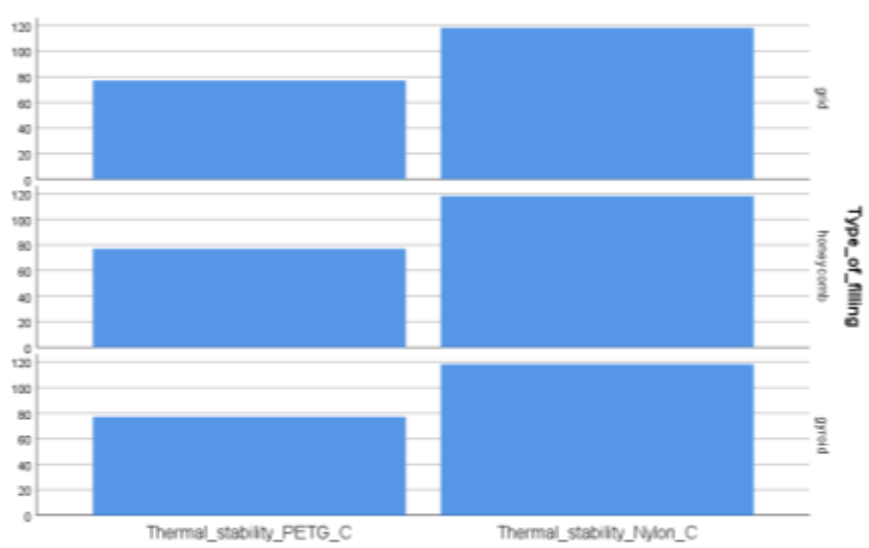
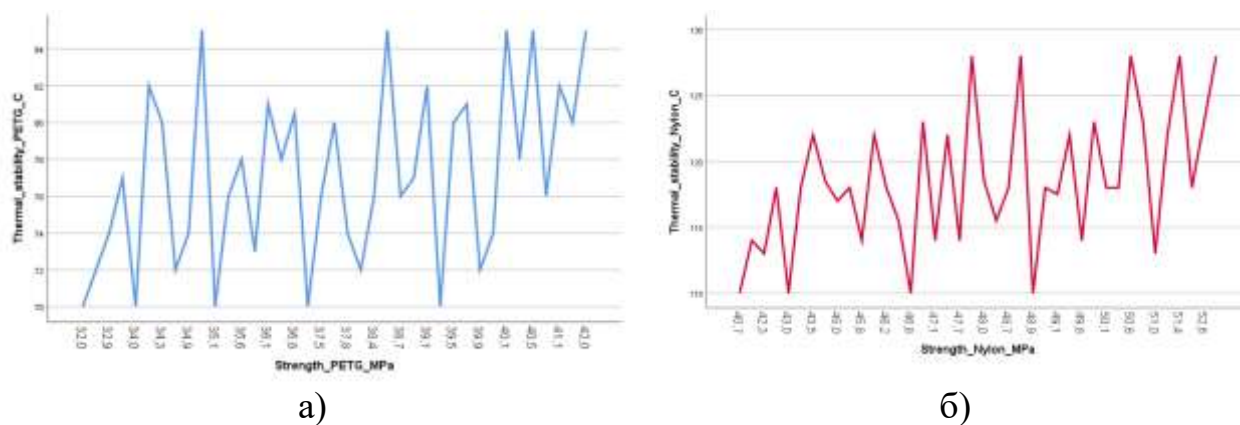


Рисунок 3.5 – Залежність термічно стійкості від структури заповнення моделі

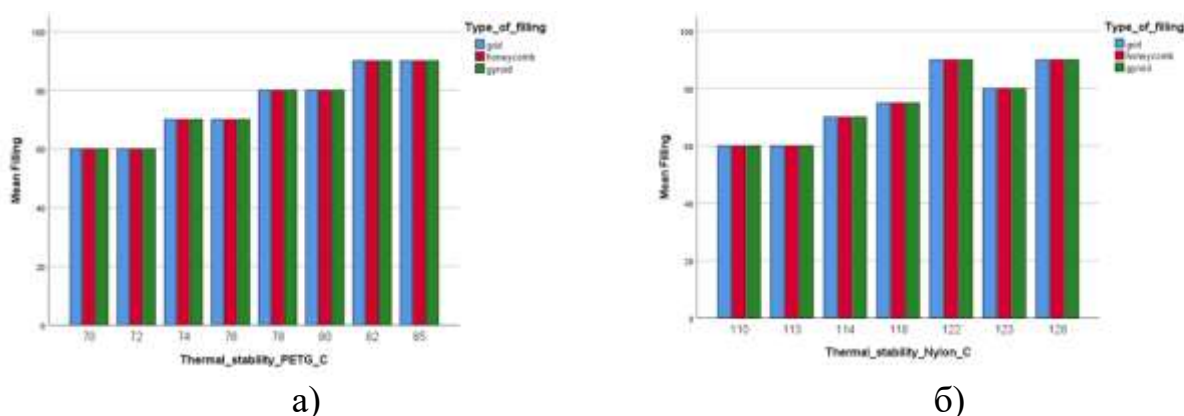
Графік залежності міцності від термічної стійкості наведено на рис. 3.6.



а – результати вимірювань для PETG пластику; б – результати вимірювань для Nylon пластику

Рисунок 3.6 – Залежність термічно стійкості від щільності заповнення моделі

Спільний графік термічної стійкості від типу заповнення та щільності наведено на рис. 3.7.



а) – результати вимірювань для PETG пластику; б) – результати вимірювань для Nylon пластику

Рисунок 3.7 – Залежність термічно стійкості від типу заповнення та щільності моделі

3.3 Побудова регресійно-кореляційної моделі

Для обробки даних їх вводять у програмне забезпечення IBM SPSS Statistics, де проводиться базовий лінійний регресійний аналіз параметрів експонування 3D-моделі [27]. За результатами обчислень у модулі Model Summary визначається значення коефіцієнта детермінації R для кожного типу філаменту, рис. 3.8.

Model Summary									
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	Change Statistics			Sig. F Change
						F Change	df1	df2	
1	,984 ^a	,969	,966	,4711	,969	336,927	4	43	,000

a. Predictors: (Constant), Type_of_filling, Filling, Wall_studs, Temperature_PETG_C

а)

Model Summary									
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	Change Statistics			Sig. F Change
						F Change	df1	df2	
1	,986 ^a	,971	,969	,5296	,971	365,278	4	43	,000

a. Predictors: (Constant), Temperature_Nylon_C, Type_of_filling, Filling, Wall_studs

б)

а – PETG філамент; б – Nylon філамент

Рисунок 3.9 – Зведення для моделі (Model Summary)

Показник R показує, наскільки добре корелюють фактичні значення залежної змінної з прогнозами моделі, відображаючи, наскільки точно лінія регресії відповідає експериментальним даним. Коефіцієнт множинної детермінації R^2 вказує на те, яку частку впливу мають параметри, що входять до моделі, на кінцевий результат. Наприклад, для PETG цей показник становить 96,6%, а для Nylon – 97,1%.

Середнє скориговане значення коефіцієнта R^2 для всіх досліджуваних філаментів дорівнює 96,8%, а середня стандартна похибка оцінки – 0,5, що перевищує порогове значення 0,5. Аналіз даних за всіма осями підтверджує, що R^2 більше 0,5.

Крім того, за допомогою таблиці ANOVA перевіряється гіпотеза про те, що R^2 дорівнює 0. Якщо рівень значущості Sig. менше 0,05, це свідчить про статистичну достовірність отриманих результатів, що ілюструється на рис. 3.10.

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	299,124	4	74,781	336,927	,000 ^b
	Residual	9,544	43	,222		
	Total	308,668	47			

a. Dependent Variable: Strength_PETG_MPa

b. Predictors: (Constant), Type_of_filling, Filling, Wall_studs, Temperature_PETG_C

a)

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	409,803	4	102,451	365,278	,000 ^b
	Residual	12,060	43	,280		
	Total	421,863	47			

a. Dependent Variable: Strength_Nylon_MPa

b. Predictors: (Constant), Temperature_Nylon_C, Type_of_filling, Filling, Wall_studs

б)

а – PETG філамент; б – Nylon філамент

Рисунок 3.10 – Результати розрахунків значимості «ANOVA»

У всіх випадках рівень значущості Sig. виявився меншим за 0,05, що підтверджує статистичну достовірність отриманих результатів. Щоб визначити

внесок кожної змінної, використовуються стандартизовані коефіцієнти Beta, які показують, як змінюється значення параметра при збільшенні одного з факторів на одиницю, рис. 3.11.

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	13,302	1,726		7,708	,000			
	Temperature_PETG_C	,039	,007	,152	5,668	,000	,152	,654	,152
	Wall_studs	1,010	,068	,398	14,859	,000	,398	,915	,398
	Filling	,075	,006	,329	12,263	,000	,329	,862	,329
	Type_of_filling	-2,559	,083	-.824	30,731	,000	-.824	-.978	-.824

a. Dependent Variable: Strength_PETG_MPa

a)

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	15,763	1,444		10,914	,000			
	Wall_studs	1,240	,076	,418	16,216	,000	,418	,927	,418
	Filling	,081	,007	,307	11,908	,000	,307	,876	,307
	Type_of_filling	2,847	,094	,784	30,409	,000	,784	,978	,784
	Temperature_Nylon_C	,058	,005	,296	11,474	,000	,296	,868	,296

a. Dependent Variable: Strength_Nylon_MPa

б)

а – PETG філамент; б – Nylon філамент

Рисунок 3.11 – Значення «Standardized Coefficients Beta»

Значення коефіцієнтів Beta можна інтерпретувати як кореляційні коефіцієнти. Оскільки, згідно з попередніми розрахунками, модель демонструє лінійну залежність, ці коефіцієнти можуть бути підставлені в рівняння лінійної регресії формула 3.1.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (3.1)$$

де Y – фактор міцності виробу;

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ – коефіцієнти лінійної регресії впливу параметрів на фактор;

x_1, x_2, \dots, x_n – параметри впливу на фактор.

Для більшої зручності побудуємо три рівня регресії. По одному для кожної марки філаменту та одне загальне рівняння. На рис. 3.12, наведені результати кореляції Пірсона.

Correlations

		Strength_PETG_MPa	Temperature_PETG_C	Wall_studs	Filling	Type_of_filling
Pearson Correlation	Strength_PETG_MPa	1,000	,152	,398	,329	,824
	Temperature_PETG_C	,152	1,000	,000	,000	,000
	Wall_studs	,398	,000	1,000	,000	,000
	Filling	,329	,000	,000	1,000	,000
	Type_of_filling	,824	,000	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Strength_PETG_MPa	.	,151	,003	,011	,000
	Temperature_PETG_C	,151	.	,500	,500	,500
	Wall_studs	,003	,500	.	,500	,500
	Filling	,011	,500	,500	.	,500
	Type_of_filling	,000	,500	,500	,500	.
N	Strength_PETG_MPa	48	48	48	48	48
	Temperature_PETG_C	48	48	48	48	48
	Wall_studs	48	48	48	48	48
	Filling	48	48	48	48	48
	Type_of_filling	48	48	48	48	48

a)

Correlations

		Strength_Nylon_MPa	Wall_studs	Filling	Type_of_filling	Temperature_Nylon_C
Pearson Correlation	Strength_Nylon_MPa	1,000	,418	,307	,784	,296
	Wall_studs	,418	1,000	,000	,000	,000
	Filling	,307	,000	1,000	,000	,000
	Type_of_filling	,784	,000	,000	1,000	,000
	Temperature_Nylon_C	,296	,000	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Strength_Nylon_MPa	.	,002	,017	,000	,021
	Wall_studs	,002	.	,500	,500	,500
	Filling	,017	,500	.	,500	,500
	Type_of_filling	,000	,500	,500	.	,500
	Temperature_Nylon_C	,021	,500	,500	,500	.
N	Strength_Nylon_MPa	48	48	48	48	48
	Wall_studs	48	48	48	48	48
	Filling	48	48	48	48	48
	Type_of_filling	48	48	48	48	48
	Temperature_Nylon_C	48	48	48	48	48

б)

а – PETG філамент; б – Nylon філамент

Рисунок 3.12 – Кореляція Пірсона

Для остаточної побудови рівняння регресії будемо використовувати загалі коефіцієнти з спільної кореляції, формула (3.3):

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 = 0,01369 + (0,804 \times x_1) + (0,318 \times x_2) + (0,352 \times x_3) + (0,224 \times x_4). \quad (3.2)$$

Таким чином отримуємо, що рівняння регресії для друкованих моделей з урахуванням щільності та структури підтримки.

3.4 Висновки до третього розділу

У цьому розділі було проведено детальне дослідження того, як різні параметри FFF/FDM-друку впливають на міцність і термічну стійкість виробів. На етапі планування ми визначили ключові фактори, такі як кількість стінок, щільність і тип заповнення, а також температуру екструзії. Було розроблено тестовий зразок і методику вимірювань, що дозволило отримати порівняльні результати.

Емпіричні дослідження, проведені на 96 зразках PETG та Nylon, показали, що підвищення щільності заповнення значно покращує міцність виробу, тоді як тип заповнення в основному впливає на формування внутрішньої структури та наявність дефектів. Щодо термічної стійкості, то вона значною мірою залежить від матеріалу: Nylon демонструє набагато кращу термостійкість у порівнянні з PETG.

Регресійно-кореляційний аналіз підтвердив високу статистичну достовірність моделі ($R^2 > 96\%$, $\text{Sig.} < 0,05$) і дозволив кількісно оцінити внесок кожного з параметрів. Отримане рівняння регресії описує зв'язок між параметрами друку та міцністю виробу, і його можна використовувати для прогнозування та оптимізації технологічних режимів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Правила безпеки під час роботи з 3D-принтером

Основними факторами небезпеки під час роботи з 3D-принтерами є ризик ураження електричним струмом через відкриті елементи проводки, недостатність природного чи штучного освітлення, знижена світлова та колірна контрастність, а також надмірна пульсація світлового потоку [28]. Додатковими загрозами можуть бути підвищений рівень загальної та локальної вібрації, рухомі тверді, рідкі або газоподібні об'єкти, здатні завдати удару, а також нерухомі ріжучі чи шорсткі елементи обладнання. Існує небезпека падіння твердих або сипучих матеріалів під дією сили тяжіння, вплив високого рівня шуму чи шкідливих газових компонентів, що забруднюють повітря. До потенційно небезпечних умов також належать відхилення температури й відносної вологості від нормативних показників.

Щоб запобігти можливим травмам і пошкодженням, необхідно забезпечити надійну ізоляцію електронних компонентів, проводити інструктаж із техніки безпеки та видавати засоби індивідуального захисту. Важливо організувати ефективну вентиляцію робочої зони, за можливості використовувати природне провітрювання та чітко окреслювати небезпечні ділянки робочого простору. Для підвищення безпеки рекомендується застосування закритих боксів із системами пилопригнічення під час очищення виробів, а також регулярне проведення профілактичних оглядів електромережі.

4.2 Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі, присвяченому охороні праці, ми розглянули основні вимоги та заходи безпеки, які слід дотримуватися під час сушіння пластику для 3D-друку. Ми детально проаналізували потенційні ризики, що можуть

виникнути при роботі з нагрівальними установками, контакті з термопластичними матеріалами та можливим виділенням шкідливих випарів.

Аналіз організації робочого місця, використання засобів індивідуального захисту та правильного маркування матеріалів дав змогу оцінити ефективність існуючих заходів безпеки та виокремити ключові аспекти, необхідні для безпечного виконання технологічного процесу.

Отже, результати дослідження підтверджують важливість суворого дотримання правил охорони праці та використання відповідного захисного обладнання. Це допомагає мінімізувати ризики, забезпечити безпечні умови роботи для персоналу та підвищити якість підготовки філаменту для подальшого використання в технології FFF/FDM.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі ми дослідили технологію 3D-друку FFF/FDM і визначили основні фактори, які впливають на міцність і термічну стійкість виробів. Особливу увагу ми приділили аналізу предметної області, характеристикам параметрів, що впливають на термічну стійкість надрукованих виробів, їх фізико-механічним властивостям, а також визначенню критичних параметрів, які впливають на якість друку.

У першому розділі ми провели аналіз предметної області, вивчили основні параметри друку, структуру заповнення та типові дефекти, а також розглянули програмне забезпечення для підготовки моделей. Отримані знання допомогли нам зрозуміти, як технологічні параметри, внутрішня геометрія та експлуатаційні властивості виробів взаємопов'язані.

Другий розділ присвячений теоретичному та експериментальному вивченню теплових процесів під час друку. Ми проаналізували теплопередачу в матеріалі, роль структури заповнення та стабільність подачі філаменту. Розроблений макет і система вимірювань дозволили отримати достовірні дані для оцінки впливу параметрів друку на термічну стійкість виробів.

У третьому розділі ми провели емпіричні дослідження та створили регресійно-кореляційну модель. Результати показали, що щільність заповнення значно підвищує міцність виробів, тип заповнення впливає на внутрішню структуру, а термічна стійкість, в основному, залежить від матеріалу: Nylon виявився більш термостійким, ніж PETG. Наша модель, з високим коефіцієнтом детермінації ($R^2 > 96\%$), дозволяє прогнозувати, як параметри друку впливають на міцність та термостійкість виробів.

Четвертий розділ підкреслив важливість охорони праці при роботі з нагрівальними установками та термопластичними матеріалами. Дотримання правил безпеки та використання засобів індивідуального захисту допомагає зменшити ризики та підвищити якість підготовки філаменту для друку.

Отже, наше комплексне дослідження підтвердило зв'язок між технологічними параметрами друку, структурою заповнення та матеріалом з механічними і термічними властивостями виробів, а також наголосило на важливості дотримання заходів безпеки під час технологічного процесу. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації режимів друку та підвищення якості продукції.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008: 2015. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Текст]. – Введ. 2016-01-01. – К.: Держстандарт України, 2015. – 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. Маслов І.В. Вплив структури заповнення на термостійкість виробів FFF/FDM-друку // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2025) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2025. – Вип. 2. – 207с.
4. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (І частина) / Г. О. Андрощук // Наука, технології, інновації. - 2017. - № 1. - С. 68-77.
5. Тулашвілі Ю.Й., Лук'янчук Ю.А. Використання сучасних SLA засобів в адитивних ІТ-технологіях // The XXIII International Science Conference «Theory, practice and science», April 27 – 30, 2021, Tokyo, Japan. P 462 – 467. ISBN-978-1-63848-669-5. <https://doi.org/10.4699/ISG.2021.I.XXIII>.
6. Valentina G. Sysyuk, Vasil M. Granchak. Optical and polymerization characteristics of the materials for 3D-printing depending on the nature of their composite component // Publishing House “Akademperiodyka” National Academy of

Sciences of Ukraine 2017. p 226 – 237.
<https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.444.226>

7. Alfred Jacobsen, Trond Jorgensen, Qyvind Tafjord, and Endre Kirkhorn "Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads", Proc. SPIE 9376, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII, 937605.

8. 3D printing. A Practical Guide / Redwood Ben, Garrat Brian, Chauffeur Philemon. - M.: DMK-Press, 2020. - 220 p.

9. Rossi, S.; Puglisi, A.; Benaglia, M. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. ChemCatChem 2018, 10, 1512– 1525, <https://doi.org/10.1002/cctc.201701619>.

10. Manapat J, Chen Q, Ye P, Advincula R (2017) 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. Macromol Mater Eng 302:1600553.

11. Yurii Kuznietsov, Oleksii Solntsev Structural morphological synthesis of parallel kinematics based hybrid 3D-printer and connection with the challenges of INDUSTRY 4.0 // Journal of the Technical University of Gabrovo, vol.65, 2022.-p.p.1-6.

12. Johnson, G. A., French, J. J. (2018). Evaluation of Infill Effect on Mechanical Properties of Consumer 3D Printing Materials. Advances in Technology Innovation, 3 (4), 179–184

13. Нікітін, Д. О., Невлюдов, І. Ш., Жарікова, І. В., Бронніков, А. І., & Стрілець, Р. Є. (2025). Розробка методу контролю виробів під час фотополімерного 3D-друку. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1 (136)), 42–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706>

14. Поліщук, А. О. (2024). Development of a 3D printer screw extruder that uses granules or crushed polymer particles as raw materials. Technologies and Engineering, (5), 33–49. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.3>

15. Xiao-Su Yi, Shanyi Du, Litong Zhang, (eds.). Composite Materials Engineering. Fundamentals of Composite Materials. Springer, Singapore, 2018, Vol. 1, doi: 10.1007/978-981-10-5696-3.

16. Разумов-Фризюк Є.А., Гурін Д.В., Нікітін Д.О., та ін. (2022). Моделювання шнекового екструдера для FFF 3D друку. *Radiotekhnika*, 2(209), С. 206–214. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.2.209.21>
17. Kolosov A. E., Sivetskii V. I., Kolosova E. P., Vanin V. V., Gondlyakh A. V., Sidorov D. E., Ivitskiy I. I. Creation of Structural Polymer Composite Materials for Functional Application Using Physicochemical Modification. *Advances in Polymer Technology*, 2019, p. 12, doi: 10.1155/2019/3501456.
18. Borelli V. Kinematic and dynamic analysis of a machine for additive manufacturing. Torino, 2018, p. 113, doi: 10.3390/machines5040029.
19. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the tubular and cylindrical billets stamping by rolling process with the use of computer simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 66, № 1. P. 51–58.
20. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. *Actual Challenges in Energy & Mining*. 2020. Vol. 844. P.168–181.
21. Матвійчук В. А. Розвиток енерго– і ресурсозберігаючих технологій заготівельного виробництва. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 4 (119). С. 110–119.
22. Пупань Л.І. Лазерні технології у машинобудуванні: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків: НТУ «ХП», 2020. – 109 с
23. Petrakov Y., Korenkov V., Myhovich A. (2022). Technology for programming contour milling on a CNC machine. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (116)), 55–61. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255389>
24. Іванов, І. (2020). *Fusion 360: Повний посібник для початківців*. Технічна Книга. ISBN 978-1-234567-89-0.

25. Наказ від 16.10.2013 р. № 749 "Про затвердження Правил охорони праці під час холодного оброблення металів"

26. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Підручник. /Опальчук А.С., Афтандіянц Є.Г., Клендій М.Б., Роговський Л.Л., Семеновський О.Є.// Ніжин.: ТОВ "Видавництво "Аспект-Поліграф"".2011. - 792с.

27. IBM SPSS Statistics // Сайт IBM URL: <https://www.ibm.com/spss> (дата звернення 15.11.25).

28. Запорожець О. І., Халмурадов Б. Д., Серіков Я. О., Дзюндзюк Б. В., Айвазов В. А., Третьяков О. В. Електробезпека : практикум : навч. посіб. — Харків : ХНУРЕ, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. — 152 с.