

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)

Розробка моделі впливу параметрів філаменту на якість друкованих виробів за
технологією FFF/FDM
(тема)

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

Микола ЦЕРЦЕК

(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 доцент Дмитро НІКІТІН
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Я, Церцек Микола Віталійович, 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.

26 листопада 2025 р.



Микола ЦЕРЦЕК

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'ютеризовані та робототехнічні системи
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

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

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Церцeku Микoлаю Віталійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка моделі впливу параметрів філаменту на якість друкованих виробів за технологією FFF/FDM

Затверджена наказом університету від 10.11.2025 р. №1018 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 11 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Аналіз технологій 3D-друку;

3.2 Особливості філаментів для 3D-друку за технологіями FFF/FDM;

3.3 Методи абсорбції філаменту;

3.4 Конструкції сушильних шаф;

3.5 Параметри які впливають на абсорбцію вологи з філаменту;

3.6 Проведення дослідження впливу параметрів сушки філаменту на якість поверхні виробу.

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

4.1 Вступ;

4.2 Аналіз предметної області;

4.3 Розрахунок макету для проведення дослідження;

4.4 Дослідження впливу вологості філаменту на якість друку виробів;

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	виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	21.09.2025	виконано
3	Розробка розділу «Аналіз предметної області»	01.10.2025	виконано
4	Розробка розділу «Розрахунок макету для проведення дослідження»	08.10.2025	виконано
5	Розробка розділу «Розрахунок макету для проведення дослідження»	13.10.2025	виконано
6	Оформлення кваліфікаційної роботи	17.11.2025	виконано
7	Подання роботи на рецензію	31.11.2025	виконано
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	11.12.2025	

Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Микола ЦЕРЦЕК
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Дмитро НІКІТІН
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 76 с., 15 табл., 34 рис., 3 дод., 28 джерел.

ВОЛОГІСТЬ, 3D-ДРУК, FFF/FDM ТЕХНОЛОГІЯ, ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ, СУШІННЯ ФІЛАМЕНТУ.

Об'єкт дослідження – процеси 3D-друку за технологією FFF/FDM.

Предмет дослідження – вплив вологості філаменту на якість готових виробів, виготовлених методом FFF/FDM.

Мета роботи – розробка моделі абсорбції філаменту, для оцінювання та прогнозування впливу вологості філаменту на якість друкованих виробів з метою підвищення точності, міцності та стабільності технології FFF/FDM.

У роботі проведено аналіз фізико-хімічних процесів, що відбуваються у філаментів під час його зволоження та наступного плавлення в екструдері. Розглянуто, як підвищена вологість призводить до утворення бульбашок у розплаві, погіршення адгезії між шарами, зниження геометричної точності та міцності готових виробів. Досліджено методи вимірювання вологості філаменту та способи її зниження, зокрема сушіння у спеціальних камерах та використання герметичних систем зберігання.

Запропоновано математичну модель, що описує взаємозв'язок між рівнем вологості філаменту, режимами друку (температура екструдера, швидкість подачі, висота шару) та ключовими показниками якості друкованих виробів (міцність, точність, однорідність структури). Особливу увагу приділено можливості автоматизованого моніторингу вологості філаменту та адаптивного коригування параметрів друку в реальному часі. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації процесів підготовки та зберігання філаменту, розробки рекомендацій для користувачів та інтеграції систем контролю вологості у сучасні FFF/FDM-принтери.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 76 p., 15 tabl., 34 fig., 3 app., 28 sources.

HUMIDITY, 3D PRINTING, FFF/FDM TECHNOLOGY, IMPACT OF PARAMETERS, FILAMENT DRYING.

The object of research is 3D printing processes using FFF/FDM technology.

The subject of research is the effect of filament moisture on the quality of finished products manufactured using FFF/FDM.

The goal of this work is to develop a filament absorption model to assess and predict the impact of filament moisture on the quality of printed products in order to improve the accuracy, strength, and stability of FFF/FDM technology.

The work analyzes the physical and chemical processes that occur in the filament during its moistening and subsequent melting in the extruder. It is considered how increased humidity leads to the formation of bubbles in the melt, deterioration of adhesion between layers, and a decrease in the geometric accuracy and strength of finished products. Methods for measuring filament humidity and ways to reduce it, in particular drying in special chambers and the use of sealed storage systems, are investigated.

A mathematical model is proposed that describes the relationship between filament moisture content, printing modes (extruder temperature, feed rate, layer height), and key indicators of printed product quality (strength, accuracy, structural uniformity). Particular attention is paid to the possibility of automated monitoring of filament moisture and adaptive adjustment of printing parameters in real time. The results obtained can be used to optimize filament preparation and storage processes, develop recommendations for users, and integrate moisture control systems into modern FFF/FDM printers.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	7
Вступ.....	8
1 Аналіз предметної області.....	10
1.1 Технології FFF/FDM 3D-друку.....	10
1.2 Види філаменту для FFF/FDM 3D-друку	13
1.2.1 PLA пластик.....	14
1.2.2 ABS пластик.....	16
1.2.3 PC пластик.....	17
1.2.4 PETG пластик.....	18
1.2.5 Нейлон (PA) пластик	20
1.2.6 TPU/TPE пластик.....	21
1.2.7 HIPS пластик.....	22
1.2.8 PVA/BVOH пластик	24
1.3 Види філаменту для FFF/FDM 3D-друку	25
1.4 Параметри філаменту, які впливають на якість друкованого виробу	25
1.5 Методи контролю вологості філаменту.....	29
1.6 Висновки до першого розділу.....	31
2 Розрахунок макету для проведення дослідження	32
2.1 Опис макету для проведення досліджень.....	32
2.2 Аналіз САУ для сушильної шафи	35
2.3 Визначення маси вологи з філаменту	38
2.4 Висновки до другого розділу	41
3 Дослідження впливу вологості філаменту на якість друку виробів	42
3.1 Побудова плану експерименту	42
3.1.1 Дослідження гідратації та абсорбції філаменту.....	42
3.1.2 Побудова моделі впливу параметрів сушки філаменту на якість друкованих виробів.....	52
3.2 Висновки до третього розділу	63

4 Охорона праці	65
4.1 Правила безпеки під час роботи з 3D-принтером.....	65
4.2 Правила роботи з сушильною шафою	66
4.3 Техніка безпеки при роботі з філаментом для 3D-друку.....	67
4.4 Висновки до четвертого розділу.....	70
Висновки	71
Перелік джерел посилання	73
Додаток А Апробація результатів кваліфікаційної роботи	77
Додаток Б Результати дослідження.....	84
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	87

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 сучасних умовах розвитку адитивних технологій, зростання попиту на персоналізовані вироби та швидке прототипування постає необхідність підвищення якості та надійності 3D-друку. Один з найпопулярніших способів – це FFF (Fused Filament Fabrication) або FDM (Fused Deposition Modeling). Це коли береться нитка пластику і шар за шаром виходить потрібна річ. Просто, недорого, і можна робити багато чого: від деталей на заводі до іграшок вдома. Але тут важливо, з якого пластику друкуєш, бо від цього залежить, чи гарна вийде штука. Важливо стежити за тим, щоб нитка для 3D-принтера була потрібного діаметру, однаковою по всій довжині, не вологою і міцною. Це допомагає друкувати стабільно, без браку і з високою точністю. Якщо ми зрозуміємо, як ці параметри впливають на друк, ми зможемо краще передбачати результат, вибирати матеріали і налаштовувати 3D-принтер під конкретні завдання.

Актуальність даної роботи зумовлена потребою у підвищенні якості друкованих виробів, зниженні витрат часу та матеріалів на переробку або повторне виготовлення деталей, а також забезпеченні відтворюваності результатів при серійному виробництві. Створення моделі, яка пов'яже характеристики пластику для друку з якістю самого друку, допоможе технології FFF/FDM стати ще кращою та знайти більше застосувань у сучасному виробництві.

Мета роботи – розробка моделі абсорбції філаменту, для оцінювання та прогнозування впливу вологості філаменту на якість друкованих виробів з метою підвищення точності, міцності та стабільності технології FFF/FDM.

Об'єкт дослідження – процеси 3D-друку за технологією FFF/FDM.

Предмет дослідження – вплив вологості філаменту на якість готових виробів, виготовлених методом FFF/FDM.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз технології FFF/FDM та її основних параметрів;
- дослідити вплив фізичних і хімічних властивостей філаменту на процес друку;
- визначити ключові фактори, що зумовлюють появу дефектів;
- розробити математичну або емпіричну модель взаємозв'язку параметрів філаменту та якості виробів;
- 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'ютеризовані та робототехнічні системи» [2]. За результатами проведених досліджень опублікована теза доповідь в студентському збірнику «Виробництво і мехатронні системи 2025» [3]. Проведена робота відповідає цілям сталого розвитку (ЦСР): ЦСР 4, ЦСР 9 та ЦСР 12.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛОСТІ

1.1 Технології FFF/FDM 3D-друку

Зараз FFF/FDM 3D-друк – найпопулярніший метод, бо його легко освоїти, принтери коштують недорого, і матеріалів є купа. Можна робити будь-які штуки, навіть дуже складні, і не треба витрачати гроші на прес-форми або морочитися з обробкою. Тому FFF/FDM-друк використовують скрізь: від створення прототипів і навчання до медицини, дизайну і звичайних побутових речей (рис. 1.1). Важливо знати, де ця технологія може стати в пригоді, щоб добре її використовувати у виробництві або дослідженнях.

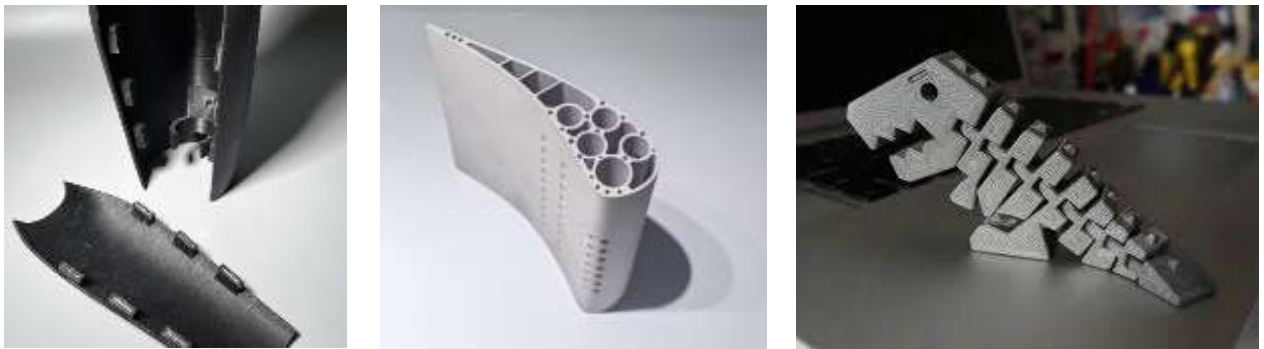


Рисунок 1.1 – Зразки FFF/FDM 3D-друку

FDM – це технологія адитивного виробництва, яка використовується для створення тривимірних об'єктів, шар за шаром, з використанням пластикового матеріалу. Ця технологія дозволяє створювати об'єкти з 3D моделі, які можуть бути відтворені у фізичній формі (рис. 1.2) [4].

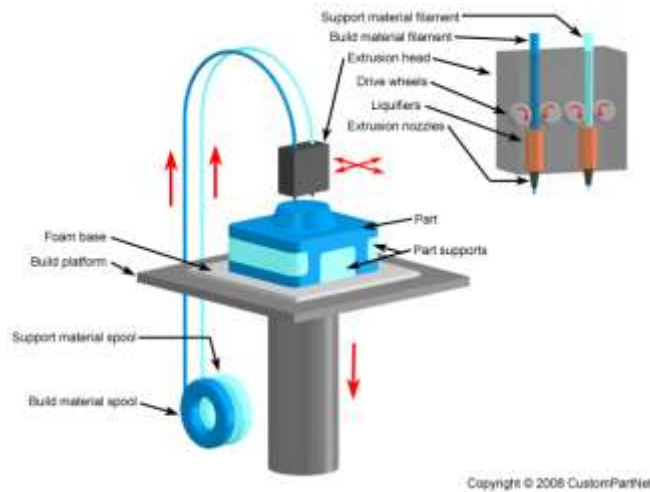


Рисунок 1.2 – Схема роботи 3D принтерів за технологією FDM

Нижче наведені основні принципи та етапи FDM 3D друку [5]:

1. Спочатку робимо 3D модель потрібної штуки. Можна зробити самому в програмі 3D моделювання або скачати вже готову;
2. Далі програма для 3D принтера друкує об'єкт по шарах. Принтер бере пластик і наносить його шар за шаром на платформу;
3. Пластик плавиться в голівці принтера і наноситься на платформу, як в 3D моделі. Коли шар нанесено, він остигає і з'єднується з попереднім шаром;
4. Іноді, щоб надрукувати щось складне, потрібні додаткові підпорки. Їх друкують з матеріалу, який потім легко прибрати;
5. В кінці можна трохи підчистити об'єкт, прибрати зайве і обробити поверхню, щоб все виглядало краще.

FDM 3D друк популярний у багатьох сферах, таких як створення прототипів, виробництво готових деталей, навчання та дослідження. Він став доступним не тільки для підприємств, а й для дому та наукових лабораторій, що робить його чудовим варіантом для творчості та інженерії, дозволяючи друкувати різні об'єкти на 3D-принтері.

FDM 3D друк має свої переваги і недоліки, які варто враховувати при виборі цієї технології для конкретних завдань і застосувань. До переваг FDM 3D друку можна віднести [6]:

- вартість і доступність. Принтери FDM вважаються одними з найбільш

доступних і економічних пристроїв для 3D друку. Вони підходять для дому, навчання та малих бізнесів;

- простота використання. Принтери FDM досить прості у використанні, і їх можна швидко налаштувати для початку друку;
- матеріали. Ця технологія працює з широким спектром матеріалів, включаючи різні види пластику, гуми, і навіть метал;
- висока швидкість друку. Принтери FDM зазвичай пропонують високу швидкість друку, що робить їх ефективними для створення великих об'єктів;
- можливість змішування матеріалів. Деякі принтери FDM дозволяють змішувати різні матеріали в одному друку для отримання унікальних властивостей і кольорів;
- просте обслуговування. Більшість FDM принтерів досить надійні та відносно легко обслуговуються.

До недоліків FDM 3D друку можна віднести [7 – 9]:

- обмеженість роздільної здатності. FDM не завжди здатен надрукувати деталі з дуже високою роздільною здатністю, порівняно з іншими технологіями;
- видимі шари. Друкування шарами може призводити до видимих лінійних шарів на об'єктах, що вимагають подальшої обробки або фарбування;
- обмежена якість поверхні: Поверхні виробів, надрукованих за допомогою FDM, можуть бути грубими, і для досягнення більшої гладкості потрібна додаткова обробка;
- підтримка. Деякі складні об'єкти можуть вимагати використання підтримки, яку потрібно буде видаляти після друку;
- можлива деформація. Пластиковий матеріал, який використовується в FDM, може деформуватися або згинатися під впливом тепла або механічного впливу;
- вимоги до температури та вологості. Деякі матеріали, які використовуються в FDM, можуть бути чутливими до температури і вологості, що вимагає спеціальних умов зберігання.

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

1.2 Види філаменту для FFF/FDM 3D-друку

Філамент – це, по суті, пластикова нитка, зазвичай 1,75 або 2,85 мм завтовшки. Її вставляють у 3D-принтер, там вона плавиться, і принтер шар за шаром малює нею потрібний об'єкт [10]. Різновиди філаментів можна розрізнити за різними параметрами (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Класифікація філаментів

За хімічною природою полімеру	
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)	зносостійкий, гнучкий, вбирає вологу.
TPU/TPE	еластомери, гнучкі, з високою ударостійкістю.
За хімічною природою полімеру	
Назва	Примітка
HIPS	легкий, використовується як підтримка, розчиняється в лимонній кислоті.
PVA/BVOH	водорозчинні матеріали для підтримок.

Продовження табл. 1.1

За функціональними властивостями	
Назва	Примітка
Стандартні	PLA, ABS, PETG (базові матеріали для загальних задач).
Інженерні	PC, Nylon, ASA, зміцнені композити.
Гнучкі	TPU, TPE, Soft PLA.
Високотемпературні	PEI (Ultem), PEEK, PPSU.
Спеціальні	провідні, антибактеріальні, самозмазувальні, світлонакопичувальні.
За наявністю наповнювачів	
Чисті (без наповнювачів)	тільки полімер.
Композитні	– з вуглецевим волокном (Carbon Fiber Reinforced); – з металевим порошком (бронза, сталь, алюміній); – з деревними волокнами (Woodfill, Corkfill); – з керамічними наповнювачами.
За призначенням	
Прототипування	швидке створення макетів (PLA, PETG).
Функціональні деталі	інженерні пластики (PC, Nylon, ASA).
Підтримки	PVA, BVON, NIPS.
Декоративні вироби	з ефектами (металізовані, флуоресцентні, з блискітками).

Розглянемо більш детально найпоширеніші види філаментів для FFF/FDM 3D-друку.

1.2.1 PLA пластик

Полілактид або PLA (Polylactic Acid) – це, мабуть, найулюбленіший матеріал для 3D-друку (технологія FFF/FDM), особливо коли тільки починаєш або робиш перші зразки. PLA пластик, зроблений з рослин, наприклад, з кукурудзи чи цукрової тростини (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – PLA пластик

До основних властивостей PLA пластика, можливо віднести такі характеристики [11 – 13]:

- біорозкладний термопластик, виготовляється з відновлюваних джерел (кукурудзяний крохмаль, цукрова тростина);
 - температура друку від 180°C до 220°C (залежно від виробника та модифікації);
 - температура платформи від 20°C до 60°C (у більшості випадків можна друкувати й без підігріву);
 - дуже проста в роботі, низька усадка та викривлення;
 - за механічними властивостями жорсткий, але крихкий; має невисоку ударостійкість;
 - добре передає дрібні деталі, не потребує закритої камери.
- До переваг та недоліків PLA пластика, можливо віднести (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Переваги та недоліки PLA пластик

Переваги	Недоліки
Простий у використанні, підходить для більшості 3D-принтерів.	Крихкість не підходить для деталей, що мають витримувати сильні удари чи згин.
Мінімальні проблеми з адгезією та усадкою.	Низька теплостійкість не можна використовувати для деталей, які нагріваються вище 50–60 °C.

Продовження табл. 1.2

Переваги	Недоліки
Гарна якість поверхні та деталізація.	Менша зносостійкість у порівнянні з технічними пластиками.
Широка гама кольорів і варіацій (шовковий, матовий, з блискітками тощо).	
Менше запаху при друку, ніж ABS або інші пластики.	

1.2.2 ABS пластик

Акрилонітрилбутадієнстирол, або ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) – це популярний інженерний пластик. Його часто беруть для 3D-друку (технології FFF/FDM), коли треба зробити щось міцне, стійке до зношування і тепла (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – ABS пластик

До основних властивостей PLA пластика, можливо віднести такі характеристики [14]:

- синтетичний термопластичний полімер;
- температура друку екструдера від 220°C до 260°C. Температура платформи від 80°C до 110°C (обов'язково підігрів для запобігання деформації);
- має значну усадку, тому бажана закрыта камера;
- за механічними властивостями міцний, ударостійкий, гнучкіший за PLA;
- має виражений запах через виділення стиролу – потрібна вентиляція.

До переваг та недоліків ABS пластика, можливо віднести (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Переваги та недоліки ABS пластик

Переваги	Недоліки
Висока міцність та ударостійкість.	Важчий у друці, ніж PLA – схильний до викривлень та розтріскування при охолодженні.
Краща термостійкість, ніж PLA.	Потрібна закрита друкарська камера та підігрів платформи.
Можна обробляти після друку (шліфування, свердління, фрезерування).	Виділяє неприємний запах і потенційно шкідливі випари (потрібна вентиляція).
Можливість хімічного згладжування (ацетоном) для отримання глянцевої поверхні.	Менш екологічний, ніж PLA.
Довговічний у використанні.	

1.2.3 PC пластик

Полікарбонат або PC (Polycarbonate) – це крутий термопластик, який інженери часто беруть для 3D-друку. З нього класно робити міцні, тверді деталі, стійкі до високих температур. Кажуть, це один з найкрутіших матеріалів для FFF/FDM друку (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – PC пластик

До основних властивостей PC пластика, можливо віднести такі характеристики [15, 16]:

– синтетичний аморфний полімер на основі бісфенолу А;

- температура друку від 260°C до 310°C (залежно від марки та модифікації), температура платформи від 90°C до 120°C;
- сильна усадка, рекомендується закрыта та нагрівна камера;
- за механічними властивостями дуже міцний, ударостійкий, зберігає жорсткість при високих температурах;
- високе вологопоглинання потребує попереднього сушіння філаменту перед друком.

До переваг та недоліків PC пластика, можливо віднести (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Переваги та недоліки PC пластик

Переваги	Недоліки
Найвища механічна міцність серед популярних філаментів.	Дуже вимогливий до умов друку без закрытої та підігрітої камери деталі часто деформуються
Висока ударостійкість навіть при низьких температурах.	Потрібні високотемпературні екструдери, більше 300°C.
Стійкість до деформацій при нагріві.	Сильне вологопоглинання друк вологим філаментом призводить до бульбашок і поганої якості.
Можливість створення функціональних деталей для екстремальних умов.	Складніше знайти у продажу, ніж PLA чи ABS.
Можна полірувати до оптичної прозорості.	Необхідна вентиляція через запах та можливі випари.

1.2.4 PETG пластик

Поліетилентерефталат гліколь-модифікований PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol-modified) – це класний пластик для 3D-принтерів, які працюють за технологією FFF/FDM. З ним легко друкувати, як з PLA, але він міцніший і витримує більші температури, майже як ABS (рис. 1.6). Тільки не забудь, він добре вбирає вологу, тому тримай його в сухому місці [17].

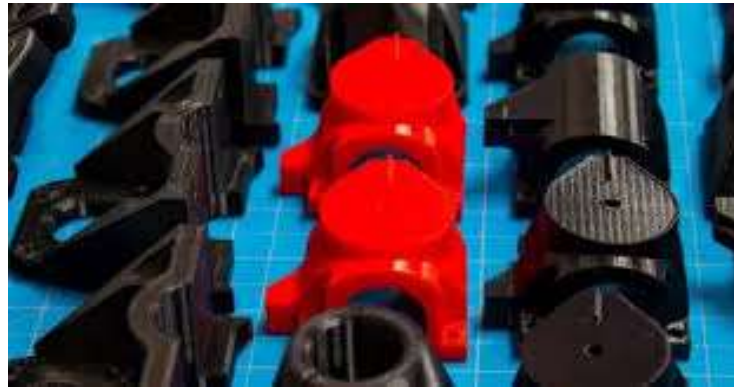


Рисунок 1.6 – PETG пластик

До основних властивостей PETG пластика, можливо віднести такі характеристики:

- модифікований поліетилентерефталат (PET) з додаванням гліколю, що зменшує крихкість і полегшує друк;
- температура друку від 220°C до 250°C, температура платформи від 60°C до 80°C;
- мінімальна усадка, можна друкувати у відкритій камері;
- за механічними властивостями міцний, ударостійкий, гнучкіший за PLA;
- добре витримує контакт з водою, кислотами та лугами;
- схильний вбирати вологу, потребує сушіння перед друком.

До переваг та недоліків PETG пластика, можливо віднести (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Переваги та недоліки PETG пластик

Переваги	Недоліки
Легший у друці, ніж ABS (майже як PLA).	Схильність до «ниток» (stringing) під час друку.
Висока міцність та ударостійкість.	Менша жорсткість, ніж у PLA, і менша термостійкість, ніж у ABS або PC.
Стійкий до вологи та хімічних впливів.	Може прилипати до сопла під час друку, що іноді погіршує якість поверхні.
Гарна адгезія між шарами, що підвищує міцність деталі	Потребує сушіння для стабільної якості.
Можна отримати прозорі вироби.	

1.2.5 Нейлон (PA) пластик

Нейлон PA (Polyamide) – інженерний філамент для FFF/FDM 3D-друку, відомий своєю високою міцністю, гнучкістю та зносостійкістю. Це той матеріал, який часто використовують для функціональних деталей, що працюють під навантаженням (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – PA пластик

До основних властивостей PETG пластика, можливо віднести такі характеристики [18]:

- синтетичний термопластичний полімер (поліамід), найпоширеніші марки: PA6, PA66, PA12;
- температура друку від 240°C до 270°C, температура платформи від 70°C до 100°C;
- схильний до значної усадки, бажана закрита та нагрівна камера;
- за механічними властивостями висока ударостійкість, гнучкість, стійкість до стирання;
- витримує 90–120 °C залежно від марки;
- добре витримує масла, мастила, розчинники;
- дуже високе вологопоглинання, обов'язкове сушіння філаменту перед друком.

До переваг та недоліків PA пластика, можливо віднести (табл. 1.6).

Таблиця 1.6 – Переваги та недоліки PA пластик

Переваги	Недоліки
Висока механічна міцність і зносостійкість.	Вимогливий до умов друку (усадка, викривлення).
Гнучкіший, ніж PLA, ABS та PETG.	Потрібна закрита камера для великих моделей.
Можна друкувати функціональні деталі, шестерні, петлі, втулки.	Дуже швидко вбирає вологу з повітря (навіть за кілька годин).
Добре працює в агресивних середовищах.	Не завжди підходить для деталей, що потребують жорсткості він більш гнучкий.
Стійкість до ударів навіть при низьких температурах.	Складніший у друці, ніж PLA чи PETG.

1.2.6 TPU/TPE пластик

TPU (Thermoplastic Polyurethane) та TPE (Thermoplastic Elastomer) – це гнучкі термопластичні еластомери для FFF/FDM 3D-друку, які поєднують властивості гуми та пластику. Вони дозволяють друкувати еластичні, міцні та зносостійкі деталі (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – TPU/TPE пластик

Ці пластики дуже м'які та гнучкі. Їх все частіше використовують для 3D-друку деталей, які мають згинатися або розтягуватися. Зазвичай, TPU міцніший за TPE і краще витримує знос, вплив масел, хімікатів, спеки та холоду. TPC добре

витримує високі температури та не боїться сонця. Особливо його цінують у медицині. TPE можна знайти також у вигляді порошку та смоли [19, 20].

До основних властивостей TPU/TPE пластика, можливо віднести такі характеристики:

- температура друку від 200°C до 240°C, температура платформи від 20°C до 60°C (залежить від виробника);
- жорсткість від 85A (м'який, дуже гнучкий) до 98A або 64D (жорсткіший, ближче до пластику);
- може розтягуватись у 3–5 разів від початкової довжини;
- добре витримує масла, мастила, абразивне тертя;
- потребує сушіння для якісного друку.

До переваг та недоліків TPU/TPE пластика, можливо віднести (табл. 1.7).

Таблиця 1.7 – Переваги та недоліки TPU/TPE пластик

Переваги	Недоліки
Дуже висока гнучкість і пружність.	Складний у друці на високих швидкостях (потребує від 20 мм/с до 40 мм/с).
Висока зносостійкість та стійкість до розривів.	Може заклинювати в екструдері з прямим приводом (особливо TPE).
Добра адгезія між шарами.	Важче досягти ідеальної деталізації через еластичність.
Хімічна стійкість (масла, розчинники, волога).	Схильний до "ниток" (stringing).
Підходить для ударопоглинаючих деталей.	

1.2.7 HIPS пластик

HIPS (High Impact Polystyrene) – високоефективний ударостійкий полістирол, який часто використовують як підтримуючий матеріал у 3D-друці, а також як самостійний філамент для друку міцних деталей (рис 1.9). HIPS поєднує в собі гнучкість та міцність. Він може тримати високі ударні навантаження та працює з багатьма видами клеїв. Також зручність у використанні полягає в тому,

що вам не потрібний абразив, щоб усунути зайве. Цей матеріал легко забирається за допомогою розчину лимону [21].



Рисунок 1.9 – HIPS пластик

До основних властивостей HIPS пластика, можливо віднести такі характеристики:

- синтетичний термопластичний полімер, похідний від полістиролу, з додаванням бутадієну для підвищення ударостійкості;
- температура друку від 230°C до 260°C, температура платформи від 90°C до 110°C;
- має схожу до ABS усадку, потребує підігріву платформи і бажано закритої камери;
- за механічними властивостями висока ударостійкість, середня жорсткість;
- розчиняється в лимоненовому розчиннику, що дозволяє використовувати його як розчинний підтримуючий матеріал для ABS.

До переваг та недоліків HIPS пластика, можливо віднести (табл. 1.8).

Таблиця 1.8 – Переваги та недоліки HIPS пластик

Переваги	Недоліки
Використовується як розчинний у лимоненовому розчиннику підтримуючий матеріал для ABS.	Не такий міцний і стійкий, як ABS або PC.
Відносно легкий у друці порівняно з ABS.	Потрібна хороша вентиляція через запах при друку.

Продовження табл. 1.8

Переваги	Недоліки
Можливість отримувати міцні, але легкі деталі.	Може швидко вбирати вологу потрібно сушити.
Менше схильний до деформацій, ніж ABS.	Менш поширений, ніж PLA, ABS або PETG.
Хороша адгезія між шарами.	

1.2.8 PVA/BVOH пластик

PVA (Polyvinyl Alcohol) та BVOH (Butenediol Vinyl Alcohol Copolymer) – водорозчинні філаменти, що використовуються переважно як підтримуючі матеріали у FFF/FDM 3D-друці для складних моделей із внутрішніми порожнинами або навісними елементами (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – PVA/BVOH пластик

До основних властивостей PVA/BVOH пластика, можливо віднести такі характеристики [22]:

- водорозчинні полімери;
- температура друку, PVA від 180°C до 220°C, BVOH від 190°C до 220°C;
- температура платформи: 45°C до 60°C (рекомендується підігрів для кращої адгезії);
- вимагають ретельного зберігання в сухому стані через високу гігроскопічність;
- повністю розчиняються у воді при кімнатній або трохи підвищеній температурі;

– використовуються як підтримуючі матеріали для PLA, ABS, PETG, HIPS.
До переваг та недоліків PVA/BVOH пластика, можливо віднести (табл. 1.9).

Таблиця 1.9 – Переваги та недоліки PVA/BVOH пластик

Переваги	Недоліки
Використовується як розчинний у лимоненовому розчиннику підтримуючий матеріал для ABS.	Не такий міцний і стійкий, як ABS або PC.
Відносно легкий у друці порівняно з ABS.	Потрібна хороша вентиляція через запах при друку.
Можливість отримувати міцні, але легкі деталі.	Може швидко вбирати вологу потрібно сушити.
Менше схильний до деформацій, ніж ABS.	Менш поширений, ніж PLA, ABS або PETG.
Хороша адгезія між шарами.	

1.3 Види дефектів FFF/FDM 3D-друку

На якість виробів, надрукованих за технологією FFF/FDM, впливає купа всього: залізо принтера, софт, налаштування, температура і навіть як ви з ним поведетесь. Ще важливо, який пластик ви використовуєте – його товщина, як рівно він подається, сухий він чи ні, і що це взагалі за полімер. Все це впливає на те, наскільки точною вийде деталь, міцною, як шари склеяться і наскільки гладенькою буде поверхня. Щоб все було добре і без браку, треба розбиратися в цих штуках і вміти їх контролювати.

1.4 Параметри філаменту, які впливають на якість друкованого виробу

Хоча пластикові вироби на перший погляд здаються стійкими до вологи, філамент для 3D-друку характеризується гігроскопічністю, через що він легко поглинає вологу з навколишнього середовища. Щоб надрукувати щось якісно і щоб принтер не зажував, нитку треба просушити перед роботою. Якщо правильно зберігати і готувати нитку, то все вийде як треба [23].

Здається, ніби вази зліва та справа зроблені з різних матеріалів: ліва якась мутна, а права – майже прозора. Єдине, що в них однакове – це те, що вони обидві без кольору (рис. 1.11).

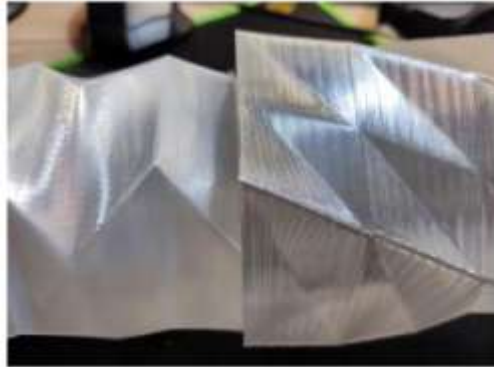


Рисунок 1.11 – Приклад пластику до сушіння та після

Виявилося, що ці дві вази зробили з одного й того самого нейлону, з однієї котушки, тільки з перервою в кілька годин. Ліву надрукували, поки матеріал ще не просох, а праву - вже після. Це показує, що нейлон дуже добре вбирає вологу, і це погано впливає на друк.

Котушка кілька тижнів стояла в шафі без упаковки, і за цей час нейлон набрав багато води просто з повітря. Цей матеріал дуже швидко вбирає вологу, і йому вистачає кількох годин, щоб насититися. Інші види пластику теж вбирають воду, але не так сильно. І навіть у зразків одного типу, або партій від одного виробника, ця властивість може бути різною, тому що відрізняється сировина, технологія, барвники та добавки.

Коли в полімерах забагато вологи, це погано, бо відбувається гідроліз – руйнування молекул через реакцію з водою при нагріванні. У 3D-друці це може призвести до проблем:

– матеріал ніби піниться і з'являються пухирці. Під час друку (наприклад, ABS-пластиком при 240 °C) вода закипає і розширюється, утворюючи бульбашки всередині полімеру. Через це поверхня виробу стає нерівною, та й виглядає він не дуже. Якщо чуєте потріскування під час друку – це воно, пухирці (рис. 1.12);



Рисунок 1.12 – Приклад спінювання та утворення пазирів при друкуванні

– розводи та волосся. Коли волога потрапляє всередину, пластик стає рідшим, ніж треба. Через це важко налаштувати принтер, і з'являються нитки та розводи на виробі;

– виражене викривлення. Якщо друкувати вологим пластиком, виріб може втратити форму та викривитися;

– шари погано склеюються. Вода руйнує довгі молекули в пластику, і він стає слабшим. Тому шари можуть розшаровуватися під час друку або виріб зламається, коли ви почнете ним користуватися;

– колір змінюється. Через вологу пластик може поміняти відтінок. Коли порівнюєш, як друкує сухий і мокрий пластик, видно, що сухий подається рівніше (рис. 1.13).



Рисунок 1.13 – Різниця між вологим пластиком і сухим на виході з сопла екструдера

Багато полімерів вбирають вологу з повітря – їх називають гігроскопічними. У хімії є кілька схожих термінів: гігроскопічність – це коли матеріал вбирає вологу, сорбція – сам процес поглинання, а вологість – це коли в матеріалі вже є якась кількість води. Наскільки сильно полімер вбирає воду, залежить від його типу.

Наприклад, поліпропілен майже не вбирає – просто трохи зволожується зверху, а от нейлон вбирає добре. Волога вбирається тому, що полімер має особливу будову – ніби клубок із великих молекул. Між цими молекулами і збирається вода з повітря.

Якщо вологи забагато, то відбувається ось що:

– полімер починає ніби пінитись. Коли вологий пластик потрапляє в гарячу зону, волога всередині закипає. Пара під тиском робить бульбашки в пластику. Через це на поверхні моделі з'являються дірки та нерівності, і вид у неї стає так собі. А ще, ці бульбашки всередині роблять виріб слабшим і він не тримається довго»;

– гідроліз полімерів. Це коли вода руйнує великі молекули пластику при високій температурі та тиску. Вдома, коли друкуєш на 3D-принтері (наприклад, нейлоном), температура достатня, щоб почався гідроліз, якщо в матеріалі багато вологи. Гідроліз зменшує кількість ланок у великій молекулі, тобто робить її коротшою, і це впливає на те, наскільки міцним буде виріб.

Коли полімерна нитка потрапляє у вологе середовище, особливо під час нагрівання, вона може руйнуватися. Волога робить свою справу: з'являються нові речовини, ланцюги розриваються, і матеріал слабшає. Через це надрукована річ може розшаруватися або зламатися раніше часу. Якщо у нитці забагато вологи, якість друку падає.

Щоб матеріал нормально подавався, доводиться ставити вищу температуру. Але навіть тоді виріб може вийти з браком. Найбільше бояться вологи нитки з нейлону, полікарбонату та сополієфіру. Нитка легко вбирає воду

з повітря. Якщо не дотримуватися правил зберігання, тобто тримати її у вологому місці, виникнуть проблеми [24].

Різні полімери по-різному реагують на вологу. Наприклад, нейлон починає вбирати воду вже через 18 годин на повітрі. А PVA, який використовують для друку підтримок і який повністю розчиняється у воді, ще гірше. PLA та ABS теж вбирають вологу, але PLA робить це швидше, ніж ABS. Волога шкодить не тільки нитці, а й принтеру. PLA-нитка, яка набрякла від вологи, може так забити сопло, що доведеться його міняти.

1.5 Методи контролю вологості філаменту

Сушильні шафи для сушіння пластика є незамінним обладнанням у виробництві, де використовується 3D-друк. Їх можна знайти як на великих заводах, так і в маленьких майстернях, де друкують потроху. Великі виробництва можуть обирати між сушильними шафами та бункерними сушарками. Шафа для сушіння пластику підійде для різних видів пластмас і виробів. У ній є нагрівач, термостат, листи з нержавійки для пластику і двері, що щільно закриваються, щоб тримати температуру в нормі (рис. 1.14).



Рисунок 1.14 – Сушильна шафа серії CD

Сушарка для полімерів – це, по суті, бак (від 15 до 1000 літрів) з кришкою і віконцем, щоб можна було заглядати всередину. У ній є нагрівач, вентилятор, термометр і пульт управління (рис. 1.15) все, що потрібно для сушіння.

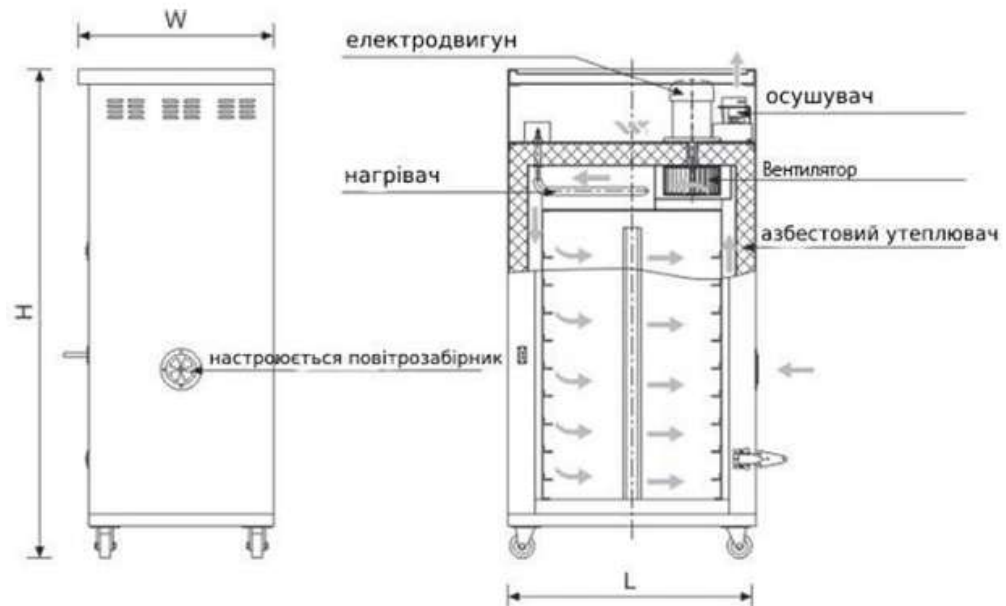


Рисунок 1.15 – Схема сушильної шафи

Цей тип сушарок підходить для сушіння як гранульованої, так і дробленої сировини. Щодо конкретних технологій використання, бункер-сушарки для полімерів можна розділити на три типи [25]:

- з гарячим повітрям: беруть вологе повітря з приміщення. Це просто і дешево, але не дуже добре, бо вологе повітря може зіпсувати продукт. Підходить для того, що не вбирає вологу;

- з осушеним гарячим повітрям: повітря ходить по колу через спеціальний пристрій, який забирає вологу. Тут неважливо, яке повітря в приміщенні, бо воно проходить через фільтри. Це добрий варіант для матеріалів, які легко вбирають вологу;

- зі стисненим гарячим повітрям: використовують стиснене повітря, яке забирає вологу, коли розширюється в бункері. Теж добре підходить для матеріалів, які люблять вологу.

При виборі між бункерною сушаркою та сушильною шафою важливо врахувати особливості роботи обох типів обладнання, а також потреби конкретного виробництва.

1.6 Висновки до першого розділу

У ході аналізу предметної області було встановлено, що технології FFF/FDM 3D-друку займають провідне місце серед адитивних методів виготовлення виробів завдяки відносній простоті процесу, доступності обладнання та широкому вибору матеріалів.

Детальний огляд основних видів філаментів показав, що кожен тип пластику (PLA, ABS, PC, PETG, PA, TPU/TPPE, NIPS, PVA/BVOH) має власні фізико-механічні властивості, переваги та обмеження, які визначають сферу його застосування та вимоги до налаштувань друку.

Особливу увагу приділено впливу параметрів філаменту на якість готового виробу, серед яких ключовими є вологість, діаметр, однорідність та чистота матеріалу. Було встановлено, що підвищена вологість філаменту призводить до дефектів поверхні, зниження міцності та стабільності розмірів виробу.

Розглянуті методи контролю та зниження вологості, такі як використання герметичних контейнерів, вакуумних пакувань, осушувачів та спеціалізованих сушильних пристроїв, забезпечують збереження оптимальних властивостей матеріалу та підвищують стабільність процесу друку.

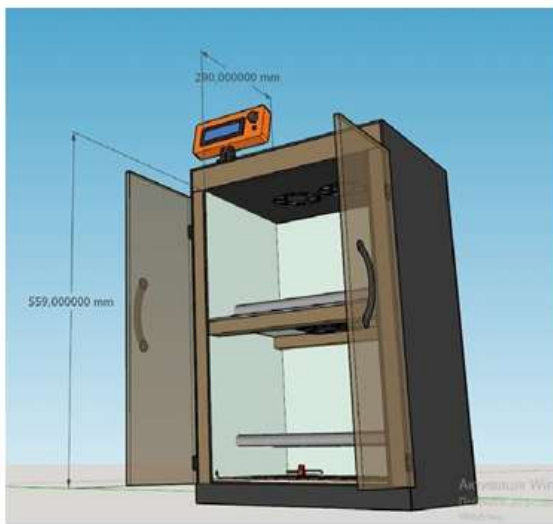
Отже, аналіз підтверджує, що правильний вибір типу філаменту та контроль його параметрів, зокрема вологості, є вирішальними факторами для досягнення високої якості друкованих виробів у технологіях FFF/FDM.

2 РОЗРАХУНОК МАКЕТУ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Опис макету для проведення досліджень

Для проведення досліджень буде використовуватися саморобна сушильна шафа філаменту (рис. 2.1). Сама шафа виготовлена з фанери я якості матеріалу обшивки та дерев'яного каркасу. Стінки шафи складаються з двох шарів фанери товщиною 6 мм, між яким знаходиться теплоізолюючий пінопласт товщиною 20 мм.

В якості нагрівального елемента в камері для гідротації, використовується гнучкий ТЕН потужністю 60 Вт. Також в ній передбачена примусова конвекція нагрітого повітря за допомогою вентиляторів. Максимальна загрузка шафи складає 12 катушок пластику.



а)



б)

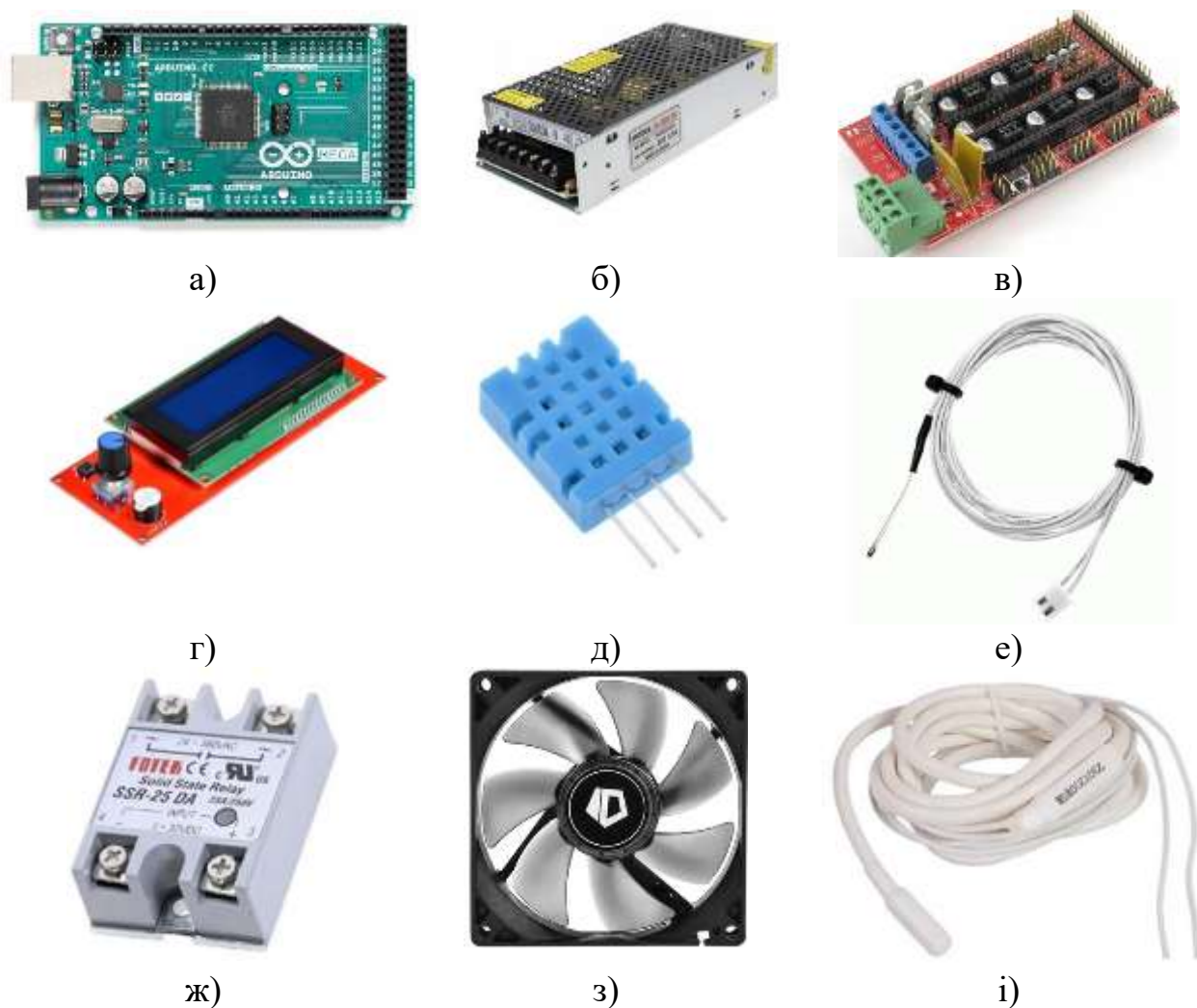
а – 3D-модель сушильної шафи для гідротації філаменту; б – виготовлена сушильна шафа для проведення дослідження

Рисунок 2.1 – Устаткування для проведення дослідження

До основних елементів сушильної входять: плата керування Arduino Mega 2560; блок живлення на 24 В та потужністю 200 Вт; перехідної плати

Ramps 1.4; LCD модуль управління; датчик вологості DHT11; датчик температури NTC термістор 100 кОм; реле SSR-25 DA; вентилятори для примусової конвекції повітря ID-Cooling NO-9225-SD; назриваючий елемент у вигляді гнучкого ТЕНу живленням 220 В та потужністю 60 Вт.

На рисунку 2.2 наведені основні електронні компоненти керування сушильної шафи для гідротрації філаменту.



а – плата керування Arduino Mega 2560; б – блок живлення; в – перехідної плати Ramps 1.4; г – LCD модуль управління; д – датчик вологості DHT11; е – NTC термістор; ж – реле SSR-25 DA; з – вентилятори ID-Cooling NO-9225-SD; і – гнучкий ТЕН

Рисунок 2.2 – Електронні компоненти сушильної шафи

Схема підключення модулів зображена рис. 2.3.

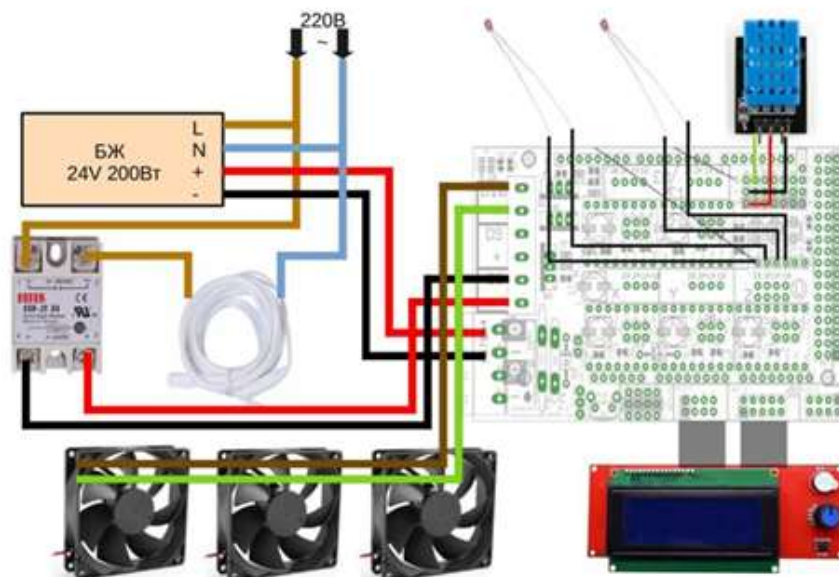


Рисунок 2.3 – Схема підключення модулів сушильної шафи

Загальні характеристики сушильної шафи для сушки філаменту наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики сушильної шафи для проведення досліджень

№	Параметр	Значення
1	Габаритні розміри, мм	360×643×390
2	Об'єм відсіку для сушки філаменту, м ³	≈0,045
3	Кількість котушок пластику, яку можливо сушити в одному циклі роботи	12
4	Живлення, В	220 від мережі
5	Потужність нагнітаючого елемента, Вт	60
6	Максимальна температура нагріву в середній сушильній камері, °С	120
7	Датчики	датчик вологості DHT11 та датчик температури NTC термістор 100 кОм
8	Середні коливання температури в середній камері, °С	±6°С

2.2 Аналіз САУ для сушильної шафи

Згідно із характеристиками сушильної шафи заносимо початкові дані до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Вхідні данні для розрахунку

Найменування	Позначення	Значення
Коефіцієнт підсилення нагрівального елемента НЕ	K_{HE}	500
Коефіцієнт підсилення ТЕНа	K_{TEN}	2,0
Стала часу нагріву	T_H	0,005 с
Коефіцієнт теплопровідності нагрівача	K_{TH}	$0,0111 \text{ Н} \cdot \frac{\text{М}}{\text{А}}$
Стала електромеханічної системи	$T_e = \frac{L}{R}$	0,000567 с
Інерційність нагрівачу елемента (оцінено)	J	$\approx 1,2e-6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Стала часу саморегулювання датчика	$T_{чсд}$	0,02 с
Крок нагрівання	θ_k	$1,8^\circ\text{C}$

Значення K_{TH} обчислено з номінального теплопровідності при номінальному струмі (2.1):

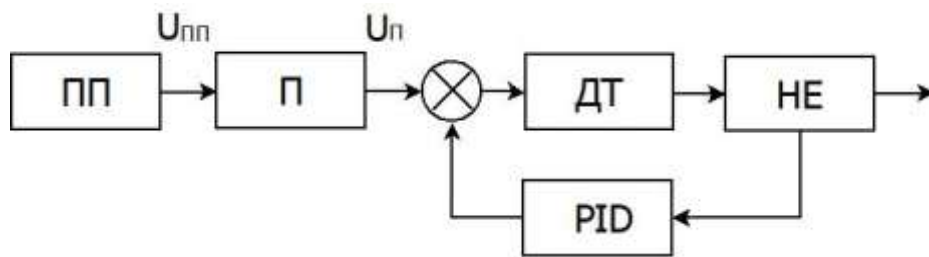
$$K_{TH} = \frac{0,5 \cdot 10^{-2}}{0,45} \approx 0,111 \text{ Н} \cdot \frac{\text{М}}{\text{А}} \quad (2.1)$$

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

Таблиця 2.3 – Вимоги до САУ

Найменування	Позначення	Значення
Максимальний час встановлення	t_c	0.5 с
Допустиме перерегулювання	σ	$\leq 10 \%$
Статична похибка	$\varepsilon_{ст}$	$\leq 1 \%$

На рис. 2.4 наведено функціональна схема САУ.



Лінійна неперервна САУ коливання температури гнучкого ТЕНа: нагрівального елемента (K_{HE}) містить: КД як об'єкт регулювання, плата керування (ПП), підсилювач (П), датчик температури (ДТ) і PID регулятор температури (PID)

Рисунок 2.4 – Функціональна схема САУ

Лінійна неперервна САУ коливання температури гнучкого ТЕНа містить:

– ТЕН довжиною 1,5 м напругою 220 В та потужністю 60 Вт, як об'єкт регулювання;

– NTC термістор 100кОм, у ланцюзі негативного зворотного зв'язку;

– плата керування сушильною шафою, як елемент порівняння;

– реле SSR-25 DA, як підсилювач керування (П);

– датчик температури ТЕНа (ДТ).

Елемент порівняння порівняння розраховується за (2.2):

$$e(t) = \theta_{зад}(t) - \theta_{вих}(t). \quad (2.2)$$

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

$\theta_{зад}(t)$ – задане значення температури ТЕНа;

$\theta_{вих}(t)$ – фактичне значення температури.

Значення підсилення нагрівального елемента (НЕ) знаходимо за (2.3):

$$U_{\text{ПП}}(s) = K_{\text{HE}} \cdot E(s) \quad (2.3)$$

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

K_{HE} – коефіцієнт підсилення нагрівального елемента (HE);

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

Значення передавальної функції ТЕНа, знаходимо за (2.4):

$$W_{\text{ТЕН}}(s) = \frac{K_{\text{ТЕН}}}{T_{\text{H}}s + 1} \quad (2.4)$$

де $W_{\text{Д}}(s)$ – передавальна функція ТЕНа;

$K_{\text{Д}}$ – коефіцієнт підсилення ТЕНа;

$T_{\text{H}}s$ – стала часу нагріву.

Значення передавальної ТЕНа, знаходимо за (2.5):

$$W_{\text{HE}}(s) = \frac{K_{\text{ТН}}}{Js^2 + T_{\text{ЧСД}}s + K_{\text{ТН}}} \quad (2.5)$$

де $W_{\text{HE}}(s)$ – передавальна функція нагрівального елемента;

$K_{\text{ТН}}$ – коефіцієнт теплопровідності нагрівача;

J – інерційність нагрівачу елемента;

$T_{\text{ЧСД}}$ – стала часу саморегулювання датчика;

s – комплексна змінна Лапласа.

Значення передавальної функції всієї замкненої системи, знаходимо за (2.6):

$$W_{\text{САУ}}(s) = \frac{K_{\text{HE}} \cdot K_{\text{ТЕН}} \cdot K_{\text{ТН}}}{(T_{\text{H}}s + 1)(Js^2 + T_{\text{e}}s + K_{\text{ТН}})(T_{\text{ЧСД}}s + 1)} \quad (2.6)$$

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

$$\begin{aligned}
 W_{\text{CAУ}}(s) &= \frac{K_{\text{HE}} \cdot K_{\text{TEH}} \cdot K_{\text{TH}}}{(T_{\text{H}^s} + 1)(J_s s^2 + T_e s + K_{\text{TE}})(T_{\text{ЧCD}^s} + 1)} \\
 &= \frac{K_{\text{HE}} \cdot K_{\text{TEH}} \cdot 0,0111}{1,0 \cdot 10^{-7} s^2 + 5,66 \cdot 10^{-4} s + 0,0111} \\
 W_{\text{CAУ}}(s) &= \frac{2.22}{1,0 \cdot 10^{-7} s^2 + 5,66 \cdot 10^{-4} s + 0,0111}
 \end{aligned}$$

2.3 Визначення маси вологи з філаменту

Виходячи з конструкції та елементної бази сушильної шафи для проведення дослідження, можливо розрахувати очікувану висушену масу вологи філаменту [26, 27]. Для розрахунку будуть обрані три виду філаменту для 3D-друку, які найчастіше використовуються для FFF/FDM технології, а саме: PLA, PETG та ABS пластик. Данні для розрахунку наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Вхідні данні для розрахунку

Матеріал	ρ_b , кг/м ³	$\tau_{\text{пр}}$, год.	$\tau_{\text{во}}$, год.	$W_{\text{кін}}$, %	$W_{\text{поч}}$, %	R, мм	h, мм
PLA	1250	3	2	20	80	197	56
PETG	1270	3	2	20	80	197	56
ABS	1600	3	2	20	80	197	56

Маса вологи $m_{\text{м}^3}$, яка випаровується з філаменту, можливо розрахувати за (2.6):

$$m_{\text{м}^3} = \rho_b \frac{W_{\text{поч}} - W_{\text{кін}}}{100}, \quad (2.6)$$

де ρ_b – базисна (умовна) густина деревини, кг/м³;

$W_{\text{поч}}$ та $W_{\text{кін}}$ – відповідно початкова і кінцева вологість матеріалу, що

висушується, %. (За розрахунковий матеріал приймається філамент).

Таким чином маса вологи, яка випаровується з філаменту m_m^3 для PLA, PETG та ABS пластик, буде мати наступні значення:

$$m_{PLA\ 1m^3} = 1250 \cdot \frac{80 - 20}{100} = 750 \text{ кг/м}^3;$$

$$m_{PETG\ 1m^3} = 1270 \cdot \frac{80 - 20}{100} = 762 \text{ кг/м}^3;$$

$$m_{ABS\ 1m^3} = 1600 \cdot \frac{80 - 20}{100} = 960 \text{ кг/м}^3.$$

Маса вологи, яка випаровується за один оборот камери $m_{об.кам}$, МОЖЛИВО визначити за (2.7):

$$m_{об.кам} = m_{1m^3} \cdot E, \quad (2.7)$$

де E – кількість матеріалу, що завантажується в камеру, m^3 .

Таким чином маса вологи, яка випаровується за один цикл роботи камери $m_{об.кам}$ для PLA, PETG та ABS пластик, буде мати наступні значення:

$$m_{PLA\ об.кам} = 750 \cdot 0,0204 = 15,3 \text{ кг/об. кам};$$

$$m_{PETG\ об.кам} = 762 \cdot 0,0204 = 15,5 \text{ кг/об. кам};$$

$$m_{ABS\ об.кам} = 1600 \cdot 0,0204 = 32,6 \text{ кг/об. кам}.$$

Для розрахунку кількості завантаженого матеріалу, необхідно виявити скільки філаменту вміщує кожна катушка. Для цього скористаємось (2.8).

$$v = \pi R^2 h = 0,0017m^3, \quad (2.8)$$

Отримаємо ємність однієї котушки дорівнює $0,0017 m^3$ завантаженого матеріалу. Виходячи с того що шафа містить дванадцять котушок, отримаємо значення E яке дорівнює $0,0204 m^3$.

Маса вологи що випаровується з філаменту за секунду M_c , можливо визначити за (2.9).

$$M_c = \frac{m_{\text{об.кам}}}{3600 \cdot \tau_{\text{с.р.}}}, \quad (2.9)$$

де $\tau_{\text{с.р.}}$ – тривалість сушіння розрахункового матеріалу, без врахування тривалості початкового прогрівання та кінцевої вологотеплообробки.

Для визначення параметра $\tau_{\text{с.р.}}$ використовуємо (2.10).

$$\tau_{\text{с.р.}} = \tau_c - (\tau_{\text{пр.}} + \tau_{\text{во}}), \quad (2.10)$$

де $\tau_{\text{пр.}}$ – тривалість початкового прогрівання матеріалу, год; $\tau_{\text{во.}}$ – тривалість вологообробок, год.

Таким чином параметр $\tau_{\text{с.р.}}$ буде мати наступні значення:

$$\tau_{\text{с.р.}} = 7 - (3 + 2) = 2 \text{ год.}$$

Таким чином, значення маси вологи що випаровується з філаменту за секунду M_c , будуть дорівнювати:

$$M_{PLA c} = \frac{15,3}{3600 \cdot 2} = 0,0021 \text{ кг/с};$$

$$M_{PETG c} = \frac{15,5}{3600 \cdot 2} = 0,0022 \text{ кг/с};$$

$$M_{ABS c} = \frac{32,6}{3600 \cdot 2} = 0,0045 \text{ кг/с}.$$

Розрахунок маси вологи яка випаровується в камері визначається за допомогою (2.11).

$$M_p = M_c \cdot k, \quad (2.11)$$

де k – коефіцієнт нерівномірності сушіння, приймається $k=1,3$.

Таким чином, значення маси вологи що випаровується в камері M_p , будуть дорівнювати:

$$M_{PLA p} = 0,0021 \cdot 1,3 = 0,0027 \text{ кг/с};$$

$$M_{PETG p} = 0,0022 \cdot 1,3 = 0,0029 \text{ кг/с};$$

$$M_{ABS p} = 0,0045 \cdot 1,3 = 0,0059 \text{ кг/с}.$$

2.4 Висновки до другого розділу

У другому розділі було представлено структуру для проведення дослідження, спрямованого на встановлення параметрів процесу сушіння котушки з філаментом. Опис дозволив вивести конструктивні особливості обладнання та його експлуатаційні можливості.

Сформульований аналіз автоматизованої системи управління сушильною шафою надав фундаментальне розуміння функцій системи, її основних елементів управління та їх взаємодії, а також переваг автоматизації процесу сушіння в порівнянні з ручним управлінням.

Розрахунок маси випарованої вологи з філаменту забезпечив кількісне описання процесу сушіння та дозволив сформулювати технологічний графік процесу, який значно покращив якість матеріалу, підготовленого для використання в 3D-друку.

Таким чином, дослідження обґрунтовує використання автоматизованої сушильної шафи як засобу покращення стабільності процесу, якості філаменту та відтворюваності результатів для використання філаментів FFF/FDM.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ ФІЛАМЕНТУ НА ЯКІСТЬ ДРУКУ ВИРОБІВ

3.1 Побудова плану експерименту

Виходячи з мети роботи, а саме розробка моделі, що дозволяє оцінювати та прогнозувати вплив вологості філаменту на якість друкованих виробів з метою підвищення точності, міцності та стабільності технології FFF/FDM.

Необхідно розробити серію дослідів які би дозволили розробити реальну модель впливу параметрів сушіння філаменту на якісні характеристики пластику та появу дефектів друку виробу. Для цього необхідно провести наступні дослідження, а саме:

- визначити яка сильно змінюється маса філаменту під час випаровування вологи з філаменту;
- визначити які сильно змінюються механічні властивості філаменту під час сушки;
- визначити на скільки сильно філамент для друку може накопичував вологу;
- побудувати регресійну-кореляційну модель впливу параметрів сушки філаменту на якість матеріалу;
- визначити оптимальні параметри сушки філаменту для різних типів пластику.

3.1.1 Дослідження гідратації та абсорбції філаменту

Виходячи з плану дослідження с першу необхідно визначити, як сильно філамент насичуватися вологістю. На цьому етапі дослідження будуть поділені на дві стадії:

- базове сушіння філаменту без попереднього змочування зразка;

– сушіння насиченого філаменту вологою (філамент буде передчасно змоченим, щоб подивитися скільки вологи він зможе поглинути).

В першій стадії експерименту були обрані чотири марки філаменту, які найчастіше використовуються для 3D-друку, а саме: PLA, PETG, ABS та Nylon. Кожен з цих зразків буде братися з нової котушки у базовому пакуванні, яке надає виробник пластика. З кожної котушки буде братися по одному тестовому зразку філаменту діаметром 1,75 мм доведеною 30 мм (рис. 3.1).

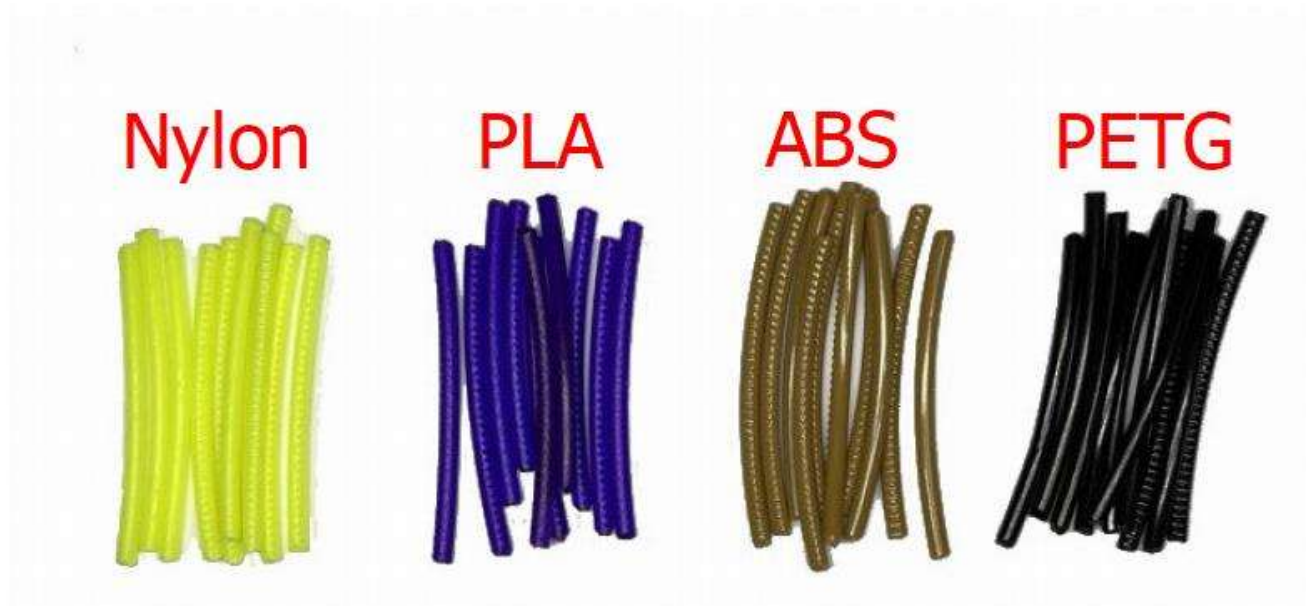


Рисунок 3.1 – Тестові зразки для дослідження

Оскільки важко визначити вологість зразка з використанням спеціалізованих датчиків вологості твердого тіла, буде використовуватися метод зміни маси зразка до та після сушіння. Дозволить визначити скільки вологи втрачає зразок під час гідратації філаменту. Для того щоб визначити відсоток втраченої вологи буде використовуватися (3.1):

$$W = \frac{m_{\text{волог}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

де W – вологість зразка, %;

$m_{\text{волог}}$ – маса зразка перед сушінням;

$m_{\text{сух}}$ – маса зразка після сушінням.

Кожен з цих зразків буде зважений на ювелірних вагах, щоб зафіксувати початкову вагу філаменту. Після чого кожен з зразків буде поміщений до сушильної шафи на час від 1 години до 10 годин, та зважений повторно. Оскільки для кожного виду філаменту, рекомендована своя температура сушіння, для спрощення експерименту та обробки даних буде обрана середнє значення температури сушки, для кожного пластику (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Середні значення температури сушіння тестових зразків

Пластик	Температура сушки, °C	Час сушіння, г	Середнє значення температури сушіння, °C
PLA	від 40 до 50	від 4 до 6	45
PETG	від 65 до 70	від 4 до 6	70
ABS	від 70 до 80	від 2 до 4	75
Nylon	від 75 до 85	від 8 до 12	80

Таким чином, були отримані значення 40 тестових зразків з різним ступенем гідратації філаменту. Окрім значень зміни маси та вологості зразка, зафіксовані зміна механічних властивостей. Результати дослідження наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати першого дослідження гідратації філаменту

Час сушки	PLA		PETG		ABS		Nylon		Примітка
Початкова вага $m_{\text{волог}}$, Г	0,0894		0,0924		0,0752		0,0851		
Маса та вологість	$m_{\text{сух}}$, Г	W, %	$m_{\text{сух}}$, Г	W, %	$m_{\text{сух}}$, Г	W, %	$m_{\text{сух}}$, Г	W, %	
1	0,0892	2,24	0,0922	2,16	0,0752	0	0,0843	9,5	
2	0,0891	1,12	0,0921	1,06	0,0752	0	0,0837	7,16	
3	0,089	1,12	0,092	1,08	0,0751	1,33	0,0832	6,0	
4	0,089	0	0,0919	1,08	0,0751	0	0,0828	4,8	
5	0,089	0	0,0919	0	0,0751	0	0,0825	3,6	ABS крихкий.
6	0,089	0	0,0918	1,1	0,0751	0	0,0823	2,4	ABS крихкий.
7	0,089	0	0,0918	0	0,0751	0	0,0821	2,4	ABS крихкий; Nylon зразок вирівнявся.

Продовження табл. 3.2

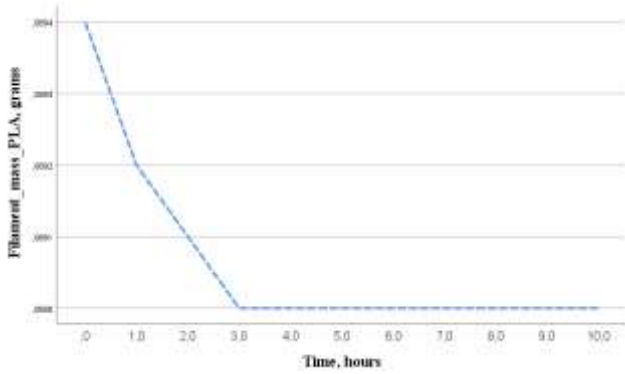
Маса та вологість	$m_{\text{сух}}, \text{Г}$	$W, \%$	$m_{\text{сух}}, \text{Г}$	$W, \%$	$m_{\text{сух}}, \text{Г}$	$W, \%$	$m_{\text{сух}}, \text{Г}$	$W, \%$	Примітка
8	0,089	0	0,0918	0	0,0751	0	0,082	1,2	ABS крихкий; Nylon зразок вирівнявся.
9	0,089	0	0,0918	0	0,0751	0	0,0819	1,2	ABS крихкий та покрився сколками; Nylon зразок вирівнявся.
10	0,089	0	0,0918	0	0,0751	0	0,0818	1,2	ABS крихкий та покрився сколками; Nylon зразок вирівнявся.

За результатами дослідження можливо спостерігати що ABS пластик має найбільш різкий ступінь зміни вологи філаменту серед усіх інших матеріалів. Також слід зазначити що при температурі сушіння 75°C на 5 годині сушки стає крихким, а на 9 годині утворюються сколи на поверхні зразка. Це в свою чергу призводить до того що філамент може зламатися при проштовхуванні матеріалу через механізм подачі.

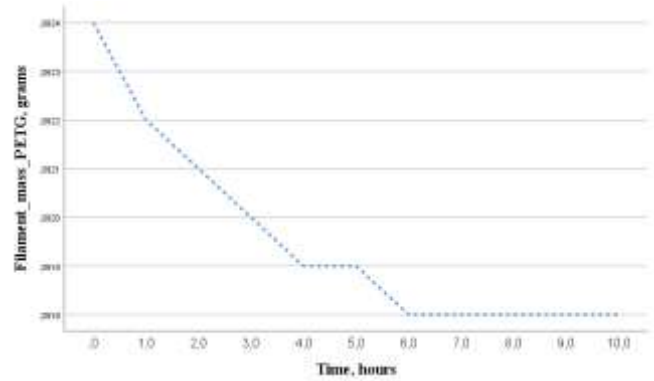
PLA та PETG, мають більш плавний ступінь втрати вологи зразків та менш впливові до зміни механічних властивостей матеріалів. Це доводить що ці пластики менш схильні випитувати вологу ніж ABS пластик, та більш стійкі до термічних змінах середовищах при температурах 45°C та 70°C .

Nylon пластик, має самий плавний процес випаровування вологи з філаменту, показує що цей матеріал більш схильний до накопичування вологи. Також незважаючи на най більшу температуру сушки філаменту 80°C , цей філамент не втрачає свої механічні властивості.

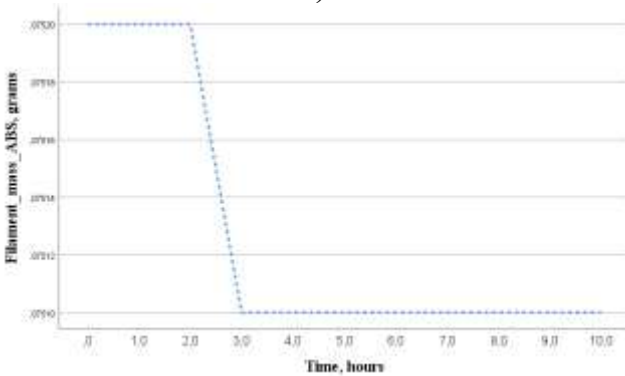
Графічна демонстрація спостережень першої стадії досліджень наведені на рисунку 3.2.



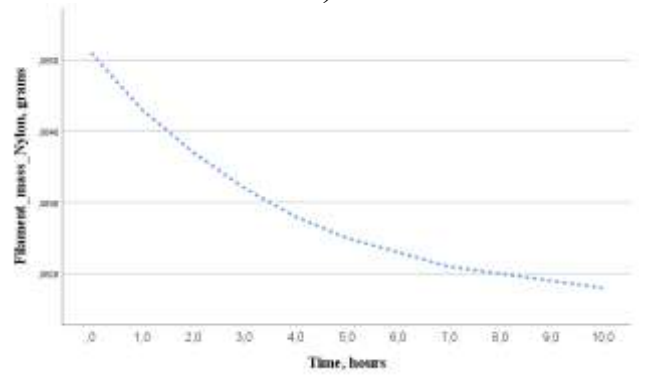
а)



б)



в)



г)

а – зміна маси PLA пластику; б – зміна маси PETG пластику; в – зміна маси ABS пластику; г – зміна маси Nylon пластику
Рисунок 3.2 – Графіки зміни маси філаменту

Порівняння зміни випаруваної вологи всіх дослідних зразків для різних матеріалів наведено на рисунку 3.3.

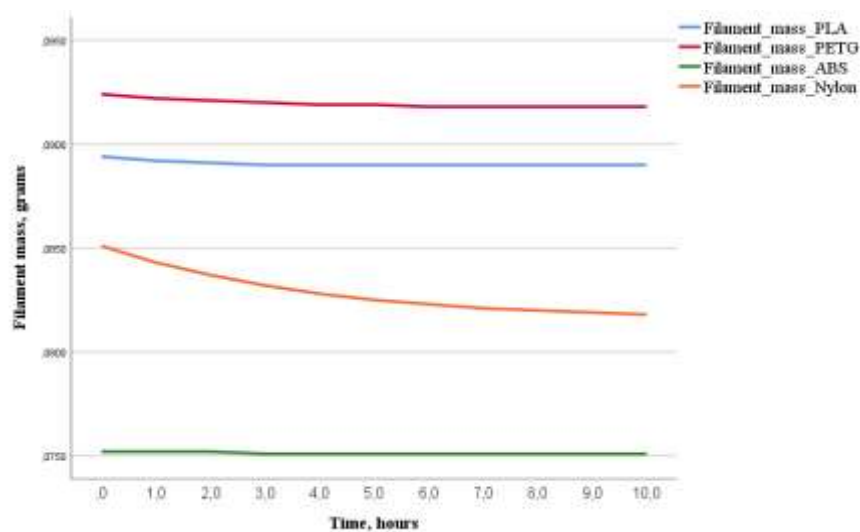


Рисунок 3.3 – Загальний графіки зміни маси зразків філаменту

Другий етап досліджень полягає у визначенні критичної маси вологи, яку філамент може поглинути. Це дозволить визначити максимальний відсоток волоки для кожного пласти, що в свою чергу дозволить на наступних етапах дослідження включити ці критичні значення до регресійно-кореляційної моделі.

Для цієї стадії дослідження будуть взяті по три зразки кожного філаменту але інших розміру (діаметром 1,75 мм та довжиною 2 м), щоб після сушки пластику можливо було надрукувати тестову модель та повитися які дефекти друку можуть з'явитися. Три зразка для кожного типу пластику, дозволять уникнути раптових викидів у замірах та усереднити кінцеве значення для кожного філаменту. Була звішена їх початкова маса, після чого кожен зразок був розміщений у воду кімнатної температури 23°C на одну добу, та знову зважений. Це дозволить визначити, як сильно кожний тип філаменту може накопичувати вологу та наскільки сильно може змінюватися його маса. Наступним кроком було проведена сушка пластику на максимальний рекомендований час та температури сушки, для кожного типу пластику (табл. 3.1):

- ABS пластик: час сушки 4 години, температура сушки 75°C;
- PLA пластик: час сушки 6 години, температура сушки 45°C;
- PETG пластик: час сушки 6 години, температура сушки 70°C;
- Nylon пластик: час сушки 12 години, температура сушки 80°C.

Це дозволить порівняти наскільки сильно будуть відрізнятися маси філаменту перед початком експерименту та після сушіння. Результати дослідження наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати другого етапу досліджень

ABS пластик						
№	Початкова маса, $m_{нач}$, (г)	Маса вагового філаменту, $m_{ваг}$, (г)	Відсоток вологи, W_1 , %	Маса після сушки, $m_{ваг}$, (г)	Відсоток випарюваної вологи після сушки, W_2 , %	Примітка
1	5,00	5,02	0,1	5,01	95	Немає зовнішніх змін
2	4,98	5,00	0,1	4,99	95	
3	5,01	5,03	0,1	5,00	95	

Продовження табл. 3.3

PLA пластик						
№	Початкова маса, $m_{нач}$, (г)	Маса вагового філаменту, $m_{влаг}$, (г)	Відсоток вологи, W_1 , %	Маса після сушки, $m_{влаг}$, (г)	Відсоток випарюваної вологи після сушки, W_2 , %	Примітка
1	5,96	6,08	2	5,97	90	Немає зовнішніх змін
2	6,02	6,14	2	6,03	90	
3	5,99	6,11	2	6,00	90	
PETG пластик						
№	Початкова маса, $m_{нач}$, (г)	Маса вагового філаменту, $m_{влаг}$, (г)	Відсоток вологи, W_1 , %	Маса після сушки, $m_{влаг}$, (г)	Відсоток випарюваної вологи після сушки, W_2 , %	Примітка
1	6,11	6,13	0,13	6,11	95	Немає зовнішніх змін
2	6,05	6,07	0,13	6,08	94	
3	6,18	6,21	0,13	6,18	95	
Nylon пластик						
№	Початкова маса, $m_{нач}$, (г)	Маса вагового філаменту, $m_{влаг}$, (г)	Відсоток вологи, W_1 , %	Маса після сушки, $m_{влаг}$, (г)	Відсоток випарюваної вологи після сушки, W_2 , %	Примітка
1	5,48	6,02	10	5,51	90	Немає зовнішніх змін
2	5,57	6,11	10	5,60	90	
3	5,62	6,26	10	5,65	90	

Виходячи з отриманих результатів можливо зробити наступні закономірності:

– ABS та PETG пластик, напитують менше всього вологи, а саме 0,1% для ABS пластику та 0,13% PETG пластику. Серед зростання маси філаменту після занурення у воду складає 0,016 г та 0,02 г;

– PLA та Nylon пластик, напитують більше всього вологи, а саме 2,0% для PLA пластику та 10,0% Nylon пластику. Серед зростання маси філаменту після занурення у воду складає 0,12 г та 0,54 г;

– всі пластики мають високий ступінь гідrataції після примусового зволоження зразків в межах від 90% до 95% втрати вологи після сушки. Але ці позикки можливо поліпшити при використанні більшої температури сушки в залежності від типу пластика та збільшення часу сушки.

Для перевірки якості надрукованих моделей, було роздруковано по чотири тестові моделі з кожного типу пластику, щоб визначити наскільки примусова абсорбція та гідратація філаменту вплинуть на появу дефектів поверхні моделі.

Тестова модель для перевірки розмірами 20×20×20 мм зображення на рисунку 3.4.

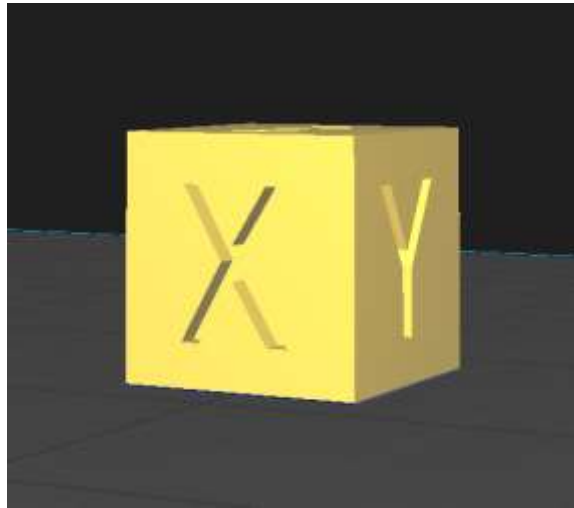


Рисунок 3.4 – Тестова модель для дослідження

Параметри друку для кожного типу пластику, є наступними:

- висота шару моделі 0,2 мм;
- кількість шарів стінки, кришки та дна моделі 3;
- заповнення моделі 15%;
- швидкість друку моделі 80 мм/с;
- температура екструдера для друку моделі: ABS пластик 230°C, PLA пластик 215°C, PETG пластик 240°C, Nylon пластик 260°C;
- температура стола, для ABS, PLA та PETG пластів 60°C, а для Nylon пластику 80°C.

Результати друку тестових моделей наведені на рисунку 3.5.



а)



б)



в)



г)

а – зразок PLA пластику; б – зразок PETG пластику; в – зразок ABS пластику;
г – зразок Nylon пластику

Рисунок 3.5 – Результати тестових зразків на абсорбцію та гідратацію вологи

Виходячи з отриманих тестових моделей можливо спостерігати, що після циклу примусової абсорбції та гідратації філаменту, спостерігаються певні дефекти друкованої моделі, які пов'язані саме з проблемою матеріалу на не апаратно-програмної частини 3D-принтеру.

Навіть за результатними зміни маси філаменту після сушки та повернення значення до початкової велечени, спостерігається певна деградація матеріалу навіть після повного циклу сушіння матеріалу.

Особливо проблеми з якістю матеріал спостерігаються на моделі виготовленої з ABS пластика. На поверхні моделі є напливи пластику, які утворилися у вході випаровування підчас екстракції пластику.

Це означає, що після гідратації маса пластику збільшилася з 5 г до 5,01 г, тобто філамент увібрав 0,01 г води у свою гігроскопічну структуру. У результаті під час друку на поверхні тестової моделі з'явилися бульбашки.

PLA та PETG пластик, мають більш кращий результат, і хоча критичних зовнішніх дефектів не спостерігається, в моделях спостерігається делімітація по шарам друку виробу. Це призвело до пониження міцності моделі. Особливо погана спікаймось шарів можливо побачити на зразку з PETG пластику.

Модель з Nylon пластику, має гарні стінки без суттєвих дефектів, але великі напливи на гранях тестової моделі. Також під час друку дужий сильно утворювалося пластикове павутиння, та напливи на соплі екструдера.

Виходячи з проведених досліджень можливо винести наступний висновок, що під час процесу абсорбції гідратації пластику ушкоджується структура прутка філаменту, що в свою чергу призводить до дефектів друку. Це явище можливо пояснити тим що, підчас абсорбції пластику вологою, волога потрапляє у мікро сколи та пори філаменту. Це призводить до того що коли відбувається процес гідратації пластику при високих значеннях температури вода в цих порах починає випаровуватися. Пар розширює цю пору та робить структуру прутка, ще більш ушкодженою.

Також ушкодження прудка іде не тільки по його полушені а і в глибину, що дозволяє вологі ще глибше приникати в матеріал, та зберігатися в середні філаменту до самого початку друку.

Для того щоб зменшити ушкодження матеріалу для друку, необхідно вірно визначити параметри сушки, щоб процес випаровування вологи проходив більш лагідно по відношенню до структури філаменту. Для цього необхідно визначити як саме параметри гідратації філаменту впливають на якість друку пластику.

3.1.2 Побудова моделі впливу параметрів сушки філаменту на якість друкованих виробів

Виходячи проведеного дослідження необхідно визначити, як саме впливають параметри сушки філаменту на вологість пластику та на якість надрукованої моделі. Для цього необхідно визначити параметри та обрати діапазон значень в які будуть входити до регресійно-кореляційної моделі впливу.

Модель буде в себе включати такі параметри:

- вихідний параметр: маса вологи філаменту та дефекти друку поверхні моделі;
- вхідні параметри: час сушки, температура та конвекція повітря в середній сушильній шафі.

Виходячи з того що вхідних параметра два і вони є взаємо пов'язані та один параметр є чисельним а інший якісний, то оцінка буде виставлятися в два етапи. С першу буде побудована модель впливу параметрів сушки на зміну відсотка вологи в середній матеріалу. Після чого будуть надруковані тестові моделі з цих зразків щоб оцінити якість поверхні та проведене ранжирування, щоб визначити оптимальні параметри сушки для кожного з чотирьох марок філаменту.

В дослідженні буде використовуватися чорти марки філаменту PLA, PETG, ABS та Nylon. Оскільки у них різні параметри сушки то діапазон значень параметрів сушки буде різний для кожного.

Для PLA пластику:

- час сушки від 4 годин до 6 годин з інтервалом 1 годину;
- температура сушки від 40°C до 50°C з інтервалом 5°C.

Для PETG пластику:

- час сушки від 4 годин до 6 годин з інтервалом 1 годину;
- температура сушки від 60°C до 75°C з інтервалом 5°C.

Для ABS пластику:

- час сушки від 2 годин до 4 годин з інтервалом 1 годину;
- температура сушки від 70°C до 85°C з інтервалом 5°C.

Для Nylon пластику:

- час сушки від 8 годин до 10 годин з інтервалом 1 годину;
- температура сушки від 75°C до 85°C з інтервалом 5°C.

Вплив примусової конвекції відбуваються від кількості обертів від вентилятора. Та складає від 25% до 100% потужності з інтервалом 25% для кожного з типів філаменту.

В якості тестових зразків будуть використовуватися відрізки філаменту діаметром 1,75 мм та довжиною 2 м, як і в попередньому дослідженні. Після чого будуть надруковані моделі з тестових зразків. Таким чином для кожного з пластиків буде проведена серія з 36 експериментів.

Результати вимірювань впливу параметрів абсорбції пластику на масу вологи філаменту наведені в Додатку Б. За результатними проведених вимірювань можливо оцінити динаміку впливу параметрів абсорбції філаменту для різних типів.

Динаміка впливу параметрів сушки для PLA пластику наведено на рисунку 3.6.

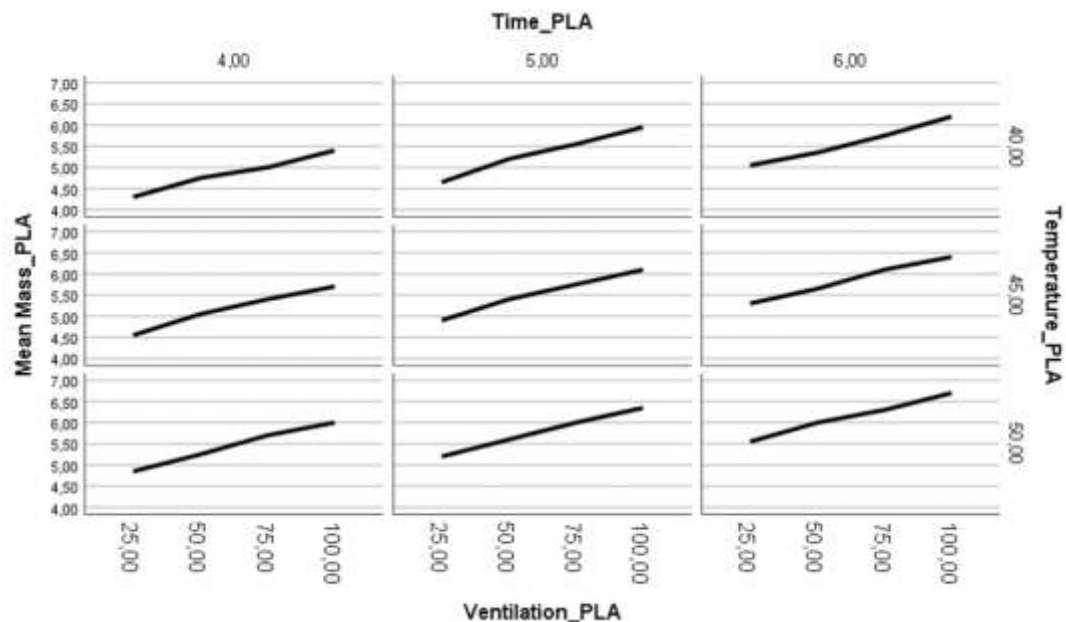


Рисунок 3.6 – Динаміка впливу параметрів сушки на масу вологи для PLA пластику

Динаміка впливу параметрів сушки для PETG пластику наведено на рисунку 3.7.

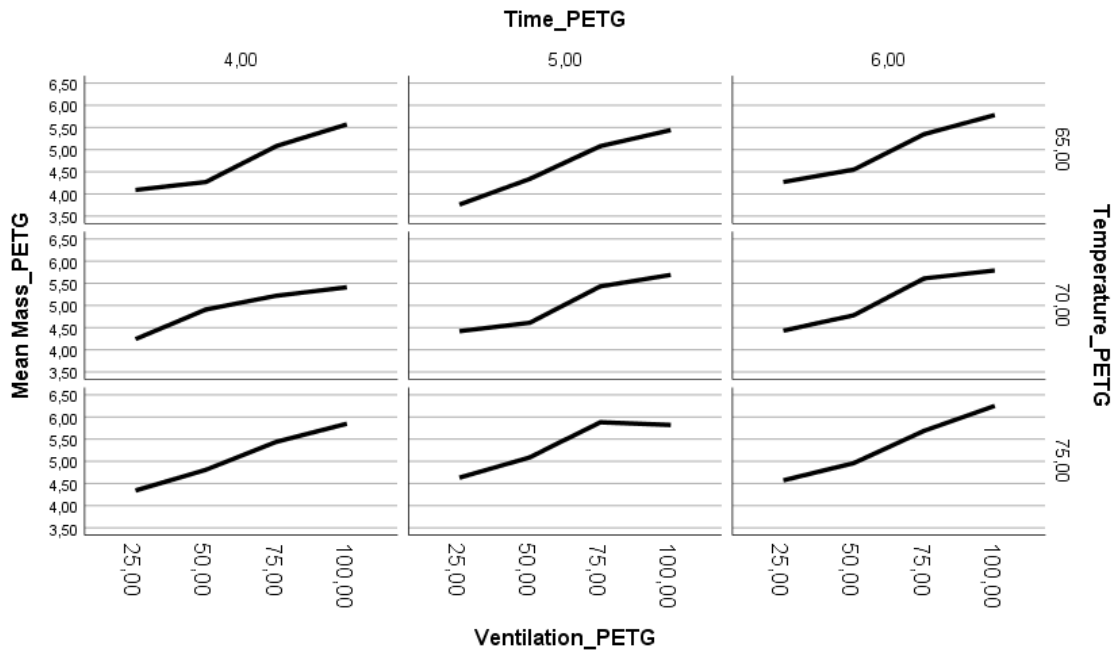


Рисунок 3.7 – Динаміка впливу параметрів сушки на масу вологи для PETG пластику

Динаміка впливу параметрів сушки для ABS пластику наведено на рисунку 3.8.

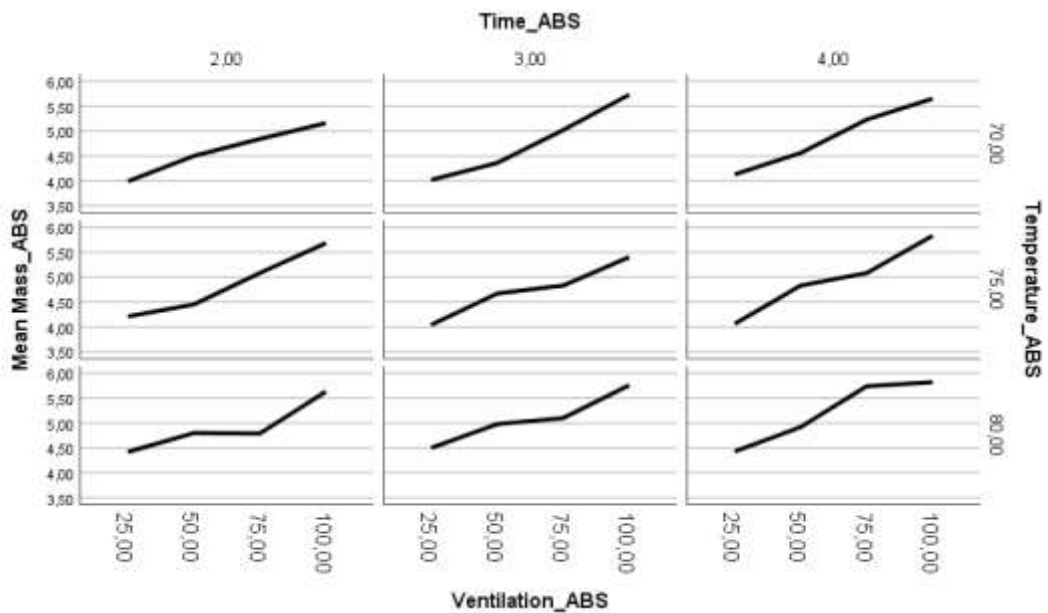


Рисунок 3.8 – Динаміка впливу параметрів сушки на масу вологи для ABS пластику

Динаміка впливу параметрів сушки для Nylon пластику наведено на рисунку 3.9.

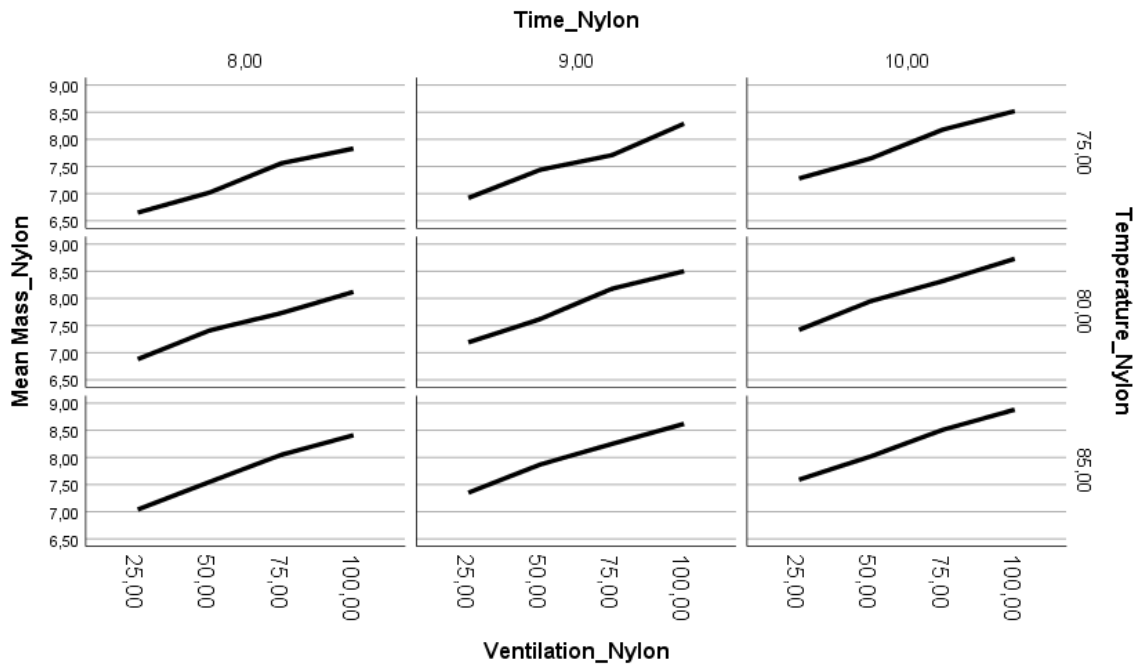


Рисунок 3.9 – Динаміка впливу параметрів сушки на масу вологи для Nylon пластику

На підставі отриманих результатів можна створити регресійно-кореляційну модель, яка відображає вплив параметрів абсорбції на масу філаменту, використаного у FFF/FDM 3D-друку.

Для цього дані заносяться у програмне забезпечення IBM SPSS Statistics, де проводиться основний лінійний регресійний аналіз параметрів сушки філаменту 3D-моделі [28]. За підсумком розрахунків у модулі Model Summary визначається значення коефіцієнта детермінації R для кожного типу філаменту (рис. 3.10).

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	,996 ^a	,991	,990	,05651	,991	1178,351	3	32	,000

a. Predictors: (Constant), Ventilation_PLA, Time_PLA, Temperature_PLA

a)

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	,969 ^a	,939	,933	,16202	,939	164,557	3	32	,000

a. Predictors: (Constant), Temperature_PETG, Time_PETG, Ventilation_PETG

б)

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	,961 ^a	,923	,915	,16800	,923	127,356	3	32	,000

a. Predictors: (Constant), Ventilation_ABS, Time_ABS, Temperature_ABS

в)

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	,994 ^a	,988	,987	,06426	,988	914,238	3	32	,000

a. Predictors: (Constant), Ventilation_Nylon, Time_Nylon, Temperature_Nylon

г)

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	,942 ^a	,887	,885	,44610	,887	367,173	3	140	,000

a. Predictors: (Constant), Ventilation_All, Time_All, Temperature_All

д)

а – PLA пластик; б – PETG пластик; в – ABS пластик;

г – Nylon пластик; д – спільна зведена модель для всіх пластиків

Рисунок 3.10 – Зведення значень коефіцієнтів детермінації R для кожного типу філаменту

Показник «R» відображає ступінь кореляції між фактичними значеннями залежної змінної та передбаченими моделлю, характеризуючи відповідність між розрахованою лінією регресії та експериментальними даними. Коефіцієнт множинної детермінації «R²» показує частку впливу включених у модель параметрів на результат, яка, наприклад, становить 94,5% загалом: для PLA-

пластику – 99,1%, PETG – 93,9%, ABS – 92,3%, Nylon – 98,8%.

Середнє скориговане значення коефіцієнта « R^2 » для всіх досліджуваних філаментів дорівнює 88,7%, при цьому середня стандартна похибка оцінки становить 0,4461. Важливим є те, що цей показник перевищує порогове значення 0,5. Аналіз результатів за всіма осями підтверджує, що « R^2 » > 0,5. Додатково, за допомогою таблиці ANOVA перевіряється гіпотеза про рівність « $R^2 = 0$ ». Якщо рівень значущості Sig. < 0,05, це свідчить про статистичну достовірність отриманих результатів, що відображено на рисунку 3.11.

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	11,290	3	3,763	1178,351	,000 ^b
	Residual	,102	32	,003		
	Total	11,392	35			

a. Dependent Variable: Mass_PLA
b. Predictors: (Constant), Ventilation_PLA, Time_PLA, Temperature_PLA

а)

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	12,959	3	4,320	164,557	,000 ^b
	Residual	,840	32	,026		
	Total	13,799	35			

a. Dependent Variable: Mass_PETG
b. Predictors: (Constant), Temperature_PETG, Time_PETG, Ventilation_PETG

б)

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	10,784	3	3,595	127,356	,000 ^b
	Residual	,903	32	,028		
	Total	11,687	35			

a. Dependent Variable: Mass_ABS
b. Predictors: (Constant), Ventilation_ABS, Time_ABS, Temperature_ABS

в)

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	11,327	3	3,776	914,238	,000 ^b
	Residual	,132	32	,004		
	Total	11,459	35			

a. Dependent Variable: Mass_Nylon
b. Predictors: (Constant), Ventilation_Nylon, Time_Nylon, Temperature_Nylon

г)

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	219,206	3	73,069	367,173	,000 ^b
	Residual	27,860	140	,199		
	Total	247,066	143			

a. Dependent Variable: Mass_All
b. Predictors: (Constant), Ventilation_All, Time_All, Temperature_All

д)
а – PLA пластик; б – PETG пластик; в – ABS пластик;
г – Nylon пластик; д – розрахунки значимості для всіх пластиків

Рисунок 3.11 – Результати розрахунків значимості «ANOVA»

У всіх випадках рівень значущості «Sig.» виявився меншим за 0,05, що підтверджує достовірність отриманих результатів. Для оцінки внеску кожної змінної застосовуються стандартизовані коефіцієнти Beta (Standardized Coefficients Beta), які показують, наскільки змінюється значення параметра при

збільшенні одного з факторів на одиницю (рис. 3.12).

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	,433	,121		3,576	,001			
	Temperature_PLA	,053	,002	,384	22,936	,000	,384	,971	,384
	Time_PLA	,350	,012	,508	30,340	,000	,508	,983	,508
	Ventilation_PLA	,015	,000	,765	45,700	,000	,765	,992	,765

a. Dependent Variable: Mass_PLA

a)

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	-,148	,496		-,297	,768			
	Ventilation_PETG	,020	,001	,903	20,706	,000	,903	,965	,903
	Time_PETG	,117	,033	,154	3,528	,001	,154	,529	,154
	Temperature_PETG	,048	,007	,316	7,244	,000	,316	,788	,316

a. Dependent Variable: Mass_PETG

б)

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	1,069	,529		2,021	,052			
	Temperature_ABS	,031	,007	,221	4,496	,000	,221	,622	,221
	Time_ABS	,114	,034	,163	3,317	,002	,163	,506	,163
	Ventilation_ABS	,019	,001	,921	18,731	,000	,921	,957	,921

a. Dependent Variable: Mass_ABS

в)

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	,794	,242		3,277	,003			
	Temperature_Nylon	,042	,003	,307	16,168	,000	,307	,944	,307
	Time_Nylon	,283	,013	,410	21,599	,000	,410	,967	,410
	Ventilation_Nylon	,017	,000	,852	44,886	,000	,852	,992	,852

a. Dependent Variable: Mass_Nylon

г)

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	1,369	,205		6,693	,000			
	Temperature_All	,012	,003	,127	4,320	,000	,346	,343	,123
	Time_All	,461	,017	,819	27,795	,000	,853	,920	,789
	Ventilation_All	,018	,001	,381	13,428	,000	,381	,750	,381

a. Dependent Variable: Mass_All

д)

а – PLA пластик; б – PETG пластик; в – ABS пластик;

г – Nylon пластик; д – для всіх пластиків

Рисунок 3.12 – Значення «Standardized Coefficients Beta»

Значення Beta-коефіцієнтів можливо використовувати як коефіцієнти кореляції. Якщо переглянути попередні розрахунки, вся модель має лінійну залежність, тоді дані коефіцієнти можна підставити в рівняння лінійної регресії (3.2).

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+\dots + b_nx_n. \quad (3.2)$$

де Y – фактор втрати вологи філаменту;

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

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

Для більшої зручності побудуємо п'ять рівня регресії. Чотири для кожної марки філаменту та одне загальне рівняння.

На рисунку 3.13 наведені результати кореляції Пірсона.

Correlations					
	Mass_PLA	Temperature_PLA	Time_PLA	Ventilation_PLA	
Pearson Correlation	Mass_PLA	1,000	,384	,508	,765
	Temperature_PLA	,384	1,000	,050	,000
	Time_PLA	,508	,000	1,000	,000
	Ventilation_PLA	,765	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Mass_PLA		,010	,001	,000
	Temperature_PLA	,010		,500	,500
	Time_PLA	,001	,500		,500
	Ventilation_PLA	,000	,500	,500	
N	Mass_PLA	36	36	36	36
	Temperature_PLA	36	36	36	36
	Time_PLA	36	36	36	36
	Ventilation_PLA	36	36	36	36

а)

Correlations					
	Mass_PETG	Temperature_PETG	Time_PETG	Ventilation_PETG	
Pearson Correlation	Mass_PETG	1,000	,922	,154	,318
	Temperature_PETG	,922	1,000	,000	,000
	Time_PETG	,154	,000	1,000	,000
	Temperature_PETG	,318	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Mass_PETG		,000	,185	,030
	Ventilation_PETG	,000		,500	,500
	Time_PETG	,185	,500		,500
	Temperature_PETG	,030	,500	,500	
N	Mass_PETG	36	36	36	36
	Ventilation_PETG	36	36	36	36
	Time_PETG	36	36	36	36
	Temperature_PETG	36	36	36	36

б)

Correlations					
	Mass_ABS	Temperature_ABS	Time_ABS	Ventilation_ABS	
Pearson Correlation	Mass_ABS	1,000	,221	,163	,821
	Temperature_ABS	,221	1,000	,000	,000
	Time_ABS	,163	,000	1,000	,000
	Ventilation_ABS	,821	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Mass_ABS		,098	,171	,000
	Temperature_ABS	,098		,500	,500
	Time_ABS	,171	,500		,500
	Ventilation_ABS	,000	,500	,500	
N	Mass_ABS	36	36	36	36
	Temperature_ABS	36	36	36	36
	Time_ABS	36	36	36	36
	Ventilation_ABS	36	36	36	36

в)

Correlations					
	Mass_Nylon	Temperature_Nylon	Time_Nylon	Ventilation_Nylon	
Pearson Correlation	Mass_Nylon	1,000	,307	,410	,852
	Temperature_Nylon	,307	1,000	,000	,000
	Time_Nylon	,410	,000	1,000	,000
	Ventilation_Nylon	,852	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Mass_Nylon		,034	,007	,000
	Temperature_Nylon	,034		,500	,500
	Time_Nylon	,007	,500		,500
	Ventilation_Nylon	,000	,500	,500	
N	Mass_Nylon	36	36	36	36
	Temperature_Nylon	36	36	36	36
	Time_Nylon	36	36	36	36
	Ventilation_Nylon	36	36	36	36

г)

а – PLA пластик; б – PETG пластик; в – ABS пластик;

г – Nylon пластик

Рисунок 3.13 – Кореляція Пірсона

Для остаточної побудови рівняння регресії будемо використовувати загалі коефіцієнти з спільної кореляції Пірсона (рис. 3.14).

		Mass_All	Temperature_All	Time_All	Ventilation_All
Pearson Correlation	Mass_All	1,000	,346	,853	,381
	Temperature_All	,346	1,000	,267	,000
	Time_All	,853	,267	1,000	,000
	Ventilation_All	,381	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Mass_All	.	,000	,000	,000
	Temperature_All	,000	.	,001	,500
	Time_All	,000	,001	.	,500
	Ventilation_All	,000	,500	,500	.
N	Mass_All	144	144	144	144
	Temperature_All	144	144	144	144
	Time_All	144	144	144	144
	Ventilation_All	144	144	144	144

Рисунок 3.14 – Спільна кореляція Пірсона для всіх філаментів

Таким чином отримуємо, що рівняння регресії для вологості філаменту з урахуванням температури сушки буде мати наступний вигляд (3.3):

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2=0,01369+(0,346\times x_1)+(0,853\times x_2)+(0,381\times x_3), \quad (3.3)$$

Для перевірки якості друку абсорбованого пластику після сушки, були надруковані тестові моделі, щоб оцінити поверхню та появу дефектів. Параметри друку для кожного типу пластику, є наступними:

- висота шару моделі 0,2 мм;
- кількість шарів стінки, кришки та дна моделі 3;
- заповнення моделі 15%;
- швидкість друку моделі 80 мм/с;
- температура екструдера для друку моделі: ABS пластик 230°C, PLA пластик 215°C, PETG пластик 240°C, Nylon пластик 260°C;

– температура стола, для ABS, PLA та PETG пластів 60°C, а для Nylon пластику 80°C.

В якості тестового зразка була обрана модель розміром 35×29×27,5 мм (рис. 3.15).

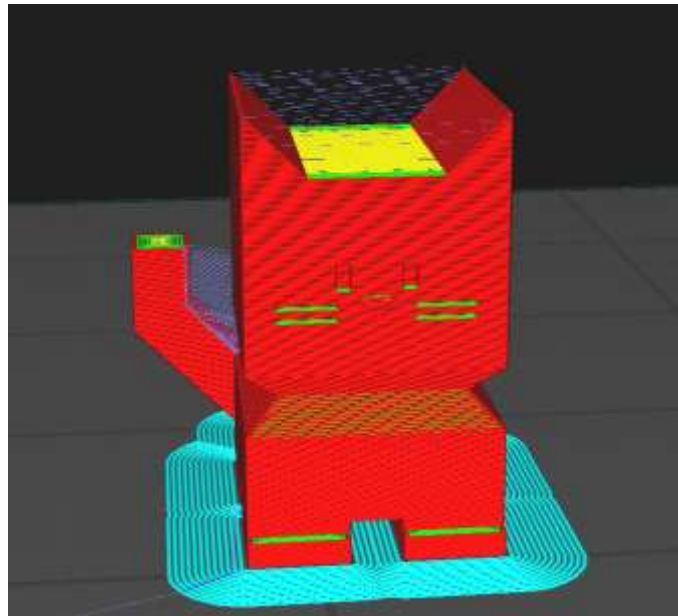


Рисунок 3.15 – Тестова модель для перевірки якості друку

За результатами друку були обрані найкращі тестові зразки, які були про ранжуванні за наступними показниками, а саме:

- наявність дефектів друку;
- міцність адгезії шарів;
- напливи на гранях моделі.

Оцінка для цих трьох показників якості від 1 до 5 балів. Де 1 найгірший результат з категорією, а 5 найкращій показник. Оскільки для кожного пластика виходить по 36 зразків, то і нумерація зразків для кожного з філаментів від №1 до №36.

В таблиці 3.4 наведена оцінка для ранжирування отриманих тестових моделей надрукованих після абсорбції філаменту. Для зручності в таблиці буде обрано по 5 кращих зразків з кожного типу філаменту

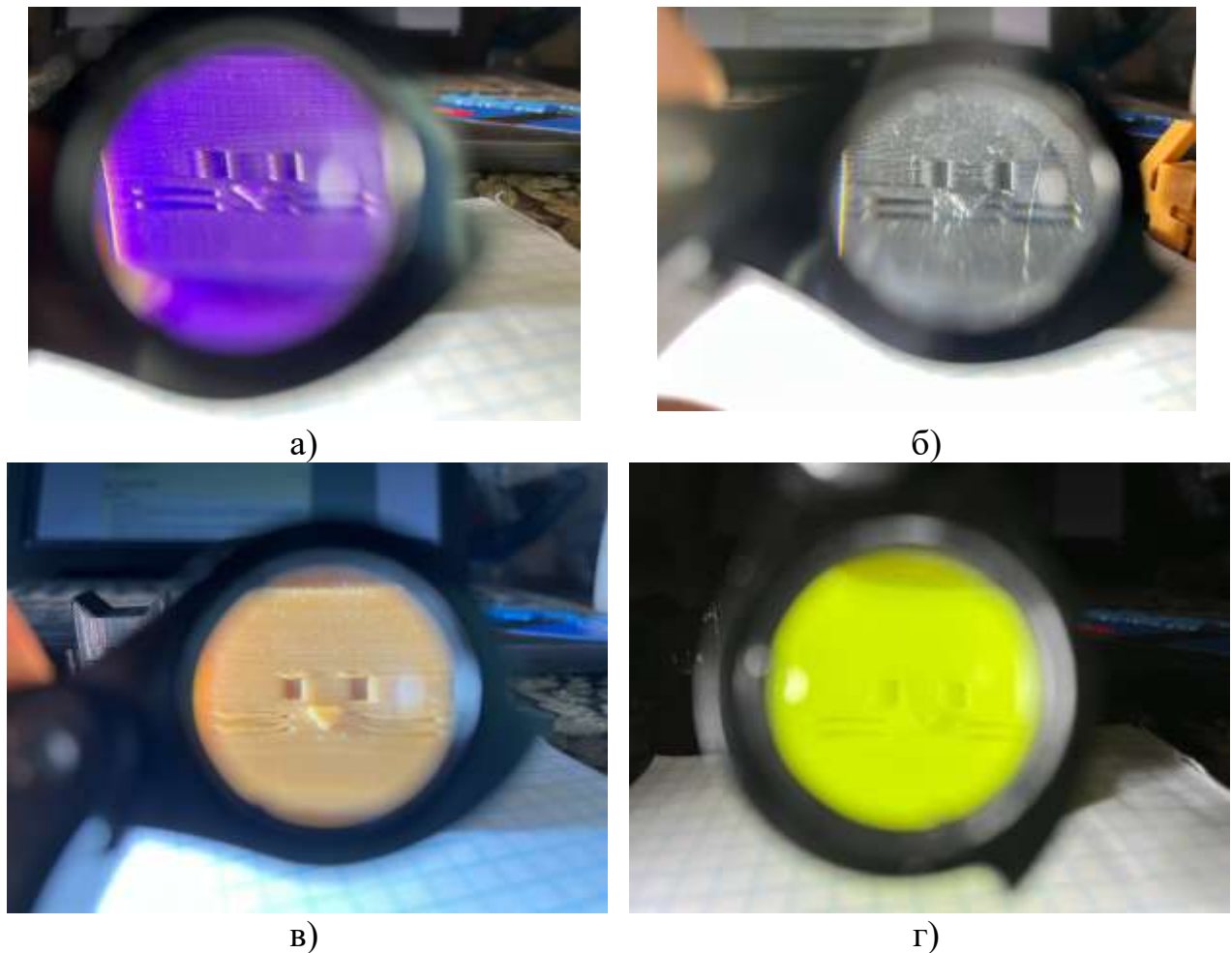
Таблиця 3.4 – Результати оцінки якості друку

Зразок	Дефект поверхні	Міцність	Напливи на гранях	Сумарний ранг
№10 PLA	5	4	5	14
№13 PLA	5	5	4	14
№20 PLA	4	4	5	13
№2 PLA	5	4	4	13
№12 PLA	3	5	5	13
№23 PETG	4	5	4	13
№12 PETG	5	3	5	13
№13 PETG	5	5	3	13
№17 PETG	4	5	4	13
№20 PETG	5	3	5	13
№11 ABS	4	3	5	12
№12 ABS	5	4	3	12
№13 ABS	3	5	4	12
№14 ABS	4	4	3	11
№15 ABS	2	5	4	11
№26 Nylon	3	4	4	11
№27 Nylon	5	3	3	11
№28 Nylon	4	4	2	10
№29 Nylon	3	3	4	10
№30 Nylon	2	4	3	9

За результатами спостереження, можливо зробити наступні висновки:

- для більшості філаментів, оптимальні значення вентиляції лежать в межах 25% до 50%, окрім Nylon пластику (від 75% до 100%);
- значення температури оптимальні в середньому діапазоні, тобто для PETG 70°C, для ABS 75°C, для Nylon 80°C. Окрім PLA пластику, кращі результати моделей надруковані на зразках філаменту у нижньому діапазоні температури 40°C;
- значення часу на якість друкованого виробу лежить для всіх зразків філаменту по вищому значенню, а саме: PETG 6 годин, для ABS 4 години, для Nylon 10 годин та для PLA 6 годин.

Результати друку тестових моделей наведені на рисунку 3.16.



а – зразок PLA пластику; б – зразок PETG пластику; в – зразок ABS пластику; г – зразок Nylon пластику

Рисунок 3.16 – Результати тестових зразків на якість друкованого виробу

3.2 Висновки до третього розділу

У ході проведених досліджень встановлено, що вологість філаменту є одним із ключових факторів, які визначають якість виробів, надрукованих за технологіями FFF/FDM. Надмірне поглинання вологи призводить до процесів гідратації та абсорбції, що зумовлює виникнення пористості, дефектів поверхні та зниження міцності готових зразків. Побудова плану експерименту дала змогу систематизувати вплив основних параметрів сушіння (температури, часу та інтенсивності вентиляції) на зниження вологовмісту матеріалу. Проведені

дослідження підтвердили, що оптимізація цих параметрів забезпечує відновлення вихідних властивостей філаменту та підвищує стабільність процесу друку. На основі побудованої моделі впливу параметрів сушіння на якість виробів встановлено залежності, що дозволяють прогнозувати результат та обирати оптимальні режими підготовки матеріалу перед друком. Це підтверджує важливість попередньої обробки філаменту для досягнення високої точності, міцності та однорідності надрукованих виробів. За результатами експериментальних досліджень, проведених на 144 тестових зразках, було виконано ранжування друкованих моделей за трьома ключовими критеріями: наявність дефектів поверхні, міцність та наявність напливів на гранях. Такий підхід дав змогу отримати комплексну оцінку якості друку та визначити оптимальні режими сушіння для кожного типу філаменту.

За результатами спостережень можливо зробити наступні висновки:

- для більшості філаментів оптимальні значення вентиляції лежать у межах від 25% до 50%, окрім Nylon, для якого кращі результати досягаються при 75% до 100%;
- оптимальні значення температури сушіння відрізняються залежно від матеріалу: для PETG – 70°C, для ABS – 75°C, для Nylon – 80°C, тоді як для PLA ефективнішим є нижній діапазон – 40°C;
- час сушіння має вирішальне значення для якості виробів і для більшості зразків кращі результати отримано при максимальних значеннях: PETG – 6 годин, ABS – 4 години, Nylon – 10 годин, PLA – 6 годин;
- най більш впливовий параметр який впливає на якість абсорбції пластика є час сушки філаменту (рис. 3.14).

Отже, результати дослідження доводять, що контроль та регулювання вологості філаменту є необхідною умовою підвищення ефективності та надійності процесу FFF/FDM 3D-друку, а також дозволяють на основі ранжування отриманих зразків обґрунтовано визначити оптимальні параметри сушіння для конкретних полімерів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Правила безпеки під час роботи з 3D-принтером

Основними факторами небезпеки, при роботі з 3D принтерами можуть бути [28]:

- небезпека ураження електричним струмом, від відкритих елементів проводки;
- відсутність або недолік необхідного природного освітлення;
- відсутність або недоліки необхідного штучного освітлення;
- знижена світлова і колірна контрастність;
- підвищена пульсація світлового потоку;
- підвищений рівень загальної вібрації;
- підвищений рівень локальної вібрації;
- рухомі тверді, рідкі або газоподібні об'єкти, що завдають удар по тілу працюючого (в тому числі рухомі машини і механізми; рухомі частини виробничого обладнання);
 - нерухомі ріжучі, колючі, обдирають, що розривають (наприклад, гострі кромки, задирки і шорсткість на поверхнях заготовок) частини твердих об'єктів
 - дія сили тяжіння в тих випадках, коли воно може викликати падіння твердих, сипучих, рідких об'єктів на працюючого;
 - підвищений рівень шуму;
 - небезпека і шкідливого впливу газових компонентів (включаючи пари), що забруднюють природне повітря;
 - підвищена або знижена температура в приміщенні;
 - підвищена або знижена відносна вологість.

Щоб захиститись від будь-яких пошкоджень, які можуть виникнути у процесі роботи з принтером необхідно поровести заходи з охорони праці, такі як:

- забезпечення надійної ізоляції електронних компонентів;

- проведення інструктажу з техніки безпеки;
- видання засобів індивідуального захисту;
- забезпечення достатньої вентиляції у робочій зоні;
- використовувати природну вентиляцію для необхідних параметрів повітря в приміщенні;
- окреслення небезпечної частини робочої зони;
- впровадження закритого боксу з системою пило пригнічення для очистки виробів;
- проведення профілактичних оглядів електромережі.

4.2 Правила роботи з сушильною шафою

Підготовка до роботи. Працівник повинен мати першу групу з електробезпеки.

- щорічно проходити медичний огляд у обсязі та терміни, затвержені наказом ректора;
- перед початком роботи працівник зобов'язаний ознайомитися з інструкцією з експлуатації сушильної шафи та пройти необхідний інструктаж.

Загальні вимоги:

- працівник повинен дотримуватися правил внутрішнього розпорядку;
- використовувати санітарно-гігієнічний одяг, спецодяг та інші засоби індивідуального захисту відповідно до чинних норм;
- чітко знати і дотримуватися інструкцій з пожежної безпеки;
- забороняється самовільно електрообладнання сушильної шафи.

Перед початком роботи:

- відкривати або ремонтувати перевірити стан електропроводки та наявність заземлення;
- переконатися у справності шафи та всіх її компонентів;
- перевірити наявність та справність засобів індивідуального захисту (рукавичок, захисних окулярів тощо).

Під час роботи:

- заборонено залишати сушильну шафу без нагляду під час її роботи;
- не перевантажувати шафу надмірною кількістю матеріалів;
- під час завантаження і розвантаження шафи використовувати відповідні інструменти та засоби індивідуального захисту;
- дотримуватися встановлених температурних режимів і часу роботи не торкатися нагрівальних елементів або внутрішніх частин шафи під час її роботи.

Після завершення роботи:

- вимкнути сушильну шафу з мережі;
- дати шафі охолонути перед розвантаженням матеріалів; перевірити стан шафи і, за необхідності, провести її очищення. Дії у разі надзвичайних ситуацій:
 - у разі виявлення несправного обладнання або відсутності засобів індивідуального захисту негайно повідомити завідувача кафедрою;
 - у разі пожежі або задимлення негайно вимкнути живлення шафи, повідомити пожежну службу та евакуюватися з приміщення;
 - у разі нещасного випадку потерпілий або очевидець повинні негайно сповістити завідувача лабораторією. Дотримання гігієнічних норм:
 - дотримуватися правил особистої гігієни, санітарно-гігієнічного та протиепідемічного режиму;
 - забезпечити регулярне прибирання робочого місця та приміщення.

Для роботи з сушильною шафою працівник повинен мати першу групу з електробезпеки. Щорічно працівник зобов'язаний проходити медичний огляд у обсязі та терміни, затверджені наказом ректора. Працівник зобов'язаний дотримуватися правил внутрішнього розпорядку.

4.3 Техніка безпеки при роботі з філаментом для 3D-друку

Працівник повинен бути забезпечений санітарно-гігієнічним одягом, спецодягом та іншими засобами індивідуального захисту відповідно до чинних типових норм і використовувати їх за призначенням. Необхідно чітко знати і

дотримуватися інструкцій з пожежної безпеки. Про кожний нещасний випадок потерпілий або свідок повинні негайно повідомити завідувача лабораторією.

Якісна система вентиляції виробничих приміщень є необхідною умовою для організації ефективного та безпечного робочого процесу. Експлуатація промислових об'єктів та різноманітного обладнання для виготовлення продукції часто супроводжується викидами шкідливих речовин, тепла, газів, пилу, металевих та полімерних часток, а також надмірної вологи. Це формує основне завдання системи вентиляції у виробничих цехах: ефективно видалення забрудненого повітря і забезпечення приміщень свіжим повітрям. У приміщеннях із концентрованими викидами небезпечних речовин зазвичай використовуються місцеві витяжні системи. Таке обладнання швидко видаляє основні забруднення під час їх виникнення, але не забезпечує належного припливу свіжого повітря. Тому для виробничих приміщень найкращим рішенням є застосування припливно-витяжної вентиляції.

Вентиляція виробничих приміщень може бути реалізована як природна або примусова припливно-витяжна система. Оптимальний тип вентиляції обирається залежно від технологічного процесу, архітектурних особливостей будівлі та кількості людей у цеху. Найкращі показники обсягу та якості повітрообміну в приміщенні забезпечує децентралізована промислова система вентиляції. Припливно-витяжна вентиляція дозволяє створювати різні мікрокліматичні зони в межах одного приміщення без необхідності зведення стін та додаткових перегородок:

- сушіння та попереднє нагрівання пластичних матеріалів повинні проводитися в технологічному обладнанні, що виключає забруднення повітря робочої зони шкідливими речовинами;

- сушіння полімерних порошкових матеріалів для видалення залишкових кількостей вологи повинна здійснюватися в закритих апаратах під розрідженням;

- завантаження прес-порошку в бункери прес-автоматів, реактопласт автоматів, роторних ліній та таблетмашин має бути механізовано;

– технологічне обладнання повинне виключати пиловиділення; при вивантаженні гарячих виробів із пластмас із технологічного обладнання повинен бути виключений безпосередній контакт працівників із цими виробами. Охолодження виробів необхідно здійснювати у передбачених для цього укриттях або спеціальних приміщеннях, обладнаних витяжною вентиляцією;

– вивантаження виробів із пластмас із печей повинне проводитися після остигання їх у печах до температури, що не перевищує 40 °С, при працюючій місцевій вентиляції;

– допускається вивантаження виробів із пластмас із печей при температурі, що не перевищує 150 °С, у спеціальні контейнери, розміщені під аспіраційними пристроями, до повного остигання виробів; – при обробці виробів із пластмас у камерах машин (при нагріванні, промиванні, обробці виробів) перебування працівників усередині камер забороняється;

– при виготовленні та використанні свинцевих форм повинні дотримуватися заходів безпеки, що запобігають забрудненню свинцем повітря робочої зони та шкірних покривів працівників.

Мономери. Більшість із них виділяються в процесі поліконденсації, вони надзвичайно реактивні та біологічно агресивні. Виробничий контакт з цими речовинами може викликати ураження шкіри та слизових оболонок, печінки, органів дихання, центральної нервової системи, індукувати канцерогенез, алергічні захворювання, позначитися на репродуктивній функції організму.

Добавки, що застосовуються у виробництві полімерних сполук. Їх токсичність може бути більшою за токсичність основного полімеру. Використання при виготовленні пластмас різних наповнювачів, які в основному є порошкоподібними речовинами, досить часто викликає запиленість повітря робочої зони, що може призвести до бронхолегеневої захворюваності працівників. Пил також утворюється на стадіях сушіння, дроблення, шліфування, просіювання деяких полімерів.

Газоподібні речовини та пил. Залежно від їхньої концентрації та тривалості впливу можуть призвести до різних змін в організмі працівників. Діапазон цих

порушень досить широкий - від змін окремих показників гемостазу до розвитку гострих та хронічних інтоксикацій та захворювань. Клінічні прояви останніх залежать від переважання тих чи інших компонентів, що використовуються під час виробництва та обробки полімерних сполук.

Гігієнічні вимоги до полімерних матеріалів залежать від їх застосування. Головне, щоб полімери були нешкідливими у токсикологічному відношенні.

Слід максимально обмежувати контакт працівників, особливо рук та інших відкритих частин тіла із шкідливими речовинами; також слід використовувати захисний спецодяг та засоби індивідуального захисту.

Важливе значення має теплоізоляція нагрітого обладнання та комунікацій, герметизація обладнання, забезпечення ефективної роботи вентиляційних установок. Дотримання цих правил допоможе забезпечити безпечну та ефективну роботу з сушильною шафою та філаментами.

4.4 Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі охорони праці було розглянуто основні вимоги та заходи безпеки під час сушіння пластику для 3D-друку. Проаналізовано потенційні ризики, пов'язані з використанням нагрівальних установок та контактами з термопластичними матеріалами, а також можливість виділення шкідливих випарів.

Вигонений аналіз організації робочого місця, застосування засобів індивідуального захисту та правильного маркування матеріалів дав змогу оцінити ефективність заходів охорони праці та визначити ключові аспекти безпечного виконання технологічного процесу. Таким чином, проведене дослідження підтверджує доцільність дотримання встановлених правил безпеки та використання відповідного захисного обладнання для зменшення ризиків, забезпечення безпечної роботи персоналу та підвищення якості підготовки філаменту для подальшого використання у технології FFF/FDM.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено комплексне дослідження впливу вологості філаменту на якість друку виробів технологіями FFF/FDM та розроблено підхід до оптимізації параметрів сушіння за допомогою автоматизованої сушильної шафи. Особливу увагу приділено аналізу предметної області, характеристикам основних видів філаментів, їх фізико-механічним властивостям, а також визначенню критичних параметрів, що впливають на якість друку.

Дослідження підтвердили, що ключовим фактором є рівень вологості філаменту, оскільки надмірне поглинання води призводить до дефектів поверхні, пористості та зниження міцності виробів. Для усунення цих негативних ефектів було обґрунтовано використання спеціалізованих сушильних пристроїв з автоматизованою системою управління, що забезпечує стабільність процесу та відтворюваність результатів.

Побудова плану експерименту дозволила визначити оптимальні режими сушіння (температуру, час та інтенсивність вентиляції) для різних видів філаментів. На основі серії експериментів із 144 тестовими зразками було проведено ранжування друкованих моделей за трьома критеріями: наявність дефектів поверхні, міцність та напливи на гранях. Це дало змогу отримати об'єктивну оцінку якості друку та сформулювати рекомендації щодо попередньої підготовки матеріалу.

За результатами досліджень встановлено, що оптимальні параметри сушіння відрізняються залежно від типу пластику:

– для більшості філаментів оптимальна вентиляція становить від 25% до 50%, тоді як для Nylon від 75 % до 100%;

– температура сушіння є середньою для більшості полімерів (PETG – 70°C, ABS – 75°C, Nylon – 80°C), проте для PLA найкращі результати досягнуто при нижчій температурі – 40°C;

– час сушіння має вирішальний вплив на якість: PETG – 6 годин, ABS – 4 години, Nylon – 10 годин, PLA – 6 годин.

Таким чином, у роботі доведено, що контроль та регулювання вологості філаменту є необхідною умовою забезпечення високої якості друкованих виробів. Виконані дослідження дозволили не лише сформулювати модель впливу параметрів сушіння на властивості матеріалу, але й обґрунтувати доцільність використання автоматизованих систем для стабілізації процесу FFF/FDM-друку.

Результати мають практичне значення для покращення якості 3D-друку, оптимізації технологічних процесів підготовки матеріалів та можуть бути використані у виробничих і дослідницьких проєктах, що пов'язані з адитивними технологіями.

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. Церцек М., Нікітін Д. Дослідження впливу параметрів сушки філаменту на якість друку // Виробництво & Мехатронні Системи: матеріали ІХ-ої Міжнародної конференції, Харків, 25-26 жовтня 2025 р.: – Харків, 2025. – С. 62–65.
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., & СТРИЛЕЦЬ, 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 «ХПІ», 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. ДСТУ 3400:2015. Охорона праці. Безпека при роботі з електричними установками. – К.: Національний стандарт України, 2015. – 33 с.