

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Моделювання впливу технологічних параметрів фотополімерів на точність 3D-
друку деталей роботів

(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи КТРСм-22-2

Коротун Єгор Вадимович

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютеризовані та
робототехнічні системи

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Овчаренко В.Є.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАМ

(підпис)

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

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

Дата

22.01.24



ПІБ

Коротун Є.В.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАР _____ (підпис)
«01» вересня 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Коротуна Єгора Вадимовича _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання впливу технологічних параметрів фотополімерів на точність 3D-друку деталей роботів _____

Затверджена наказом по університету від 03.01.2023 р. № 1288 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 22.01.2024 _____

3. Вихідні дані до роботи: _____

3.1 Технології фотополімерного 3D-друку; _____

3.2 Властивості фотополімерних смол; _____

3.3 Програми NanoDLP і Chitubox для підготовки моделей, та IBM SPSS 26 для побудови регресійної моделі; _____

3.4 Проведення досліджень впливу різних фотополімерних смол на збереження геометричних розмірів моделі _____

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

4.1 Вступ; _____

4.2 Аналіз предметної області; _____

4.3 Опис макету для дослідження; _____

4.4 Проведення експериментальних досліджень; _____

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) 16 – с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Розробка розділу «Аналіз предметної області»	ас. каф. КІТАМ Нікітін Дмитро Олександрович		09.10.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	01.09.2023	виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	25.09.2023	виконано
3	Розробка розділу «Аналіз предметної області»	09.10.2023	виконано
4	Розробка розділу «Опис макету для дослідження»	15.10.2023	виконано
5	Розробка розділу «Проведення експериментальних досліджень»	19.12.2023	виконано
6	Розробка розділу Охорона праці	30.12.2023	виконано
7	Оформлення кваліфікаційної роботи	04.01.2024	

Дата видачі завдання 01.09.2023

Студент _____
(підпис)

Коротун Є.В.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Овчаренко В.Є.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 89 с., 14 табл., 47 рис., 3 дод., 35 джерел.

ФОТОПОЛІМЕРНИЙ ДРУК, LCD 3D-ДРУК, ФОТОПОЛІМЕРНІ СМОЛИ, ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ, РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ.

Мета роботи – підвищення якості деталей (збереження геометричних розмірів) в процесі фотополімерного 3D-друку, за рахунок визначення параметрів експонування моделі для конкретних фотополімерних смол.

Об'єкт дослідження – процеси адитивного виробництва об'ємних моделей.

Предмет дослідження – технологія фотополімерного 3D-друку.

У роботі були проаналізовані області використання фотополімерного друку. Розглянуті види технологій 3D-друку, а саме SLA, DLP та LCD. Проаналізовані різні марки фотополімерних смол, їх сфери застосування та технологічні характеристики.

Був проведений факторний аналіз різних фотополімерних смол та побудована регресійно-кореляційна модель впливу фотополімерних смол при різних параметрах друку на збереження геометричних розмірів моделі. Проведено виготовлення деталі з урахуванням отриманих відхилень по кожній осі X, Y та Z для збереження геометричного розміру моделі.

ABSTRACT

Report of the practice: 89 p., 14 tabl., 47 fig., 3 app., 35 sources.

PHOTOPOLYMER PRINTING, LCD 3D-PRINTING, PHOTOPOLYMER RESINS, FACTOR ANALYSIS, REGRESSION MODEL.

The purpose of the work – is to improve the quality of details (preserving geometric dimensions) in the process of photopolymer 3D printing by determining exposure parameters for the model using specific photopolymer resins.

The object of research – is the processes of additive manufacturing of volumetric models.

The subject of research – is the technology of photopolymer 3D printing.

The paper analyzed the areas of use of photopolymer printing. The types of 3D printing technologies, namely SLA, DLP and LCD, are considered. Various brands of photopolymer resins, their fields of application and technological characteristics are analyzed.

A factor analysis of various photopolymer resins was carried out and a regression-correlation model of the influence of photopolymer resins at various printing parameters on the preservation of the geometric dimensions of the model was built. The fabrication of the detail was carried out taking into account the deviations obtained along each X, Y, and Z axis to preserve the geometric size of the model.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз предметної області.....	12
1.1 Технології фотополімерного 3D-друку.....	14
1.2 Аналіз фотополімерних смол.....	19
1.3 Висновки до першого розділу.....	24
2 Опис макету для проведення досліджень.....	26
2.1 Кінематична схема макету для досліджень Anycubic Photon Mono 4K.....	28
2.2 Електрична частина макету	30
2.3 Висновки до розділу 2.....	34
3 Проведення експериментальних досліджень.....	36
3.1 Факторний аналіз фотополімерних смол для проведення досліджень	36
3.2 Проведення дослідження	44
3.3 Перевірка результатів дослідження.....	47
3.3.1 Зміни вимірювань в шкалах інтервалу та відносин і мінімальна кількість вимірювань.....	47
3.3.2 Відсутність викидів у вимірюваннях.....	47
3.3.3 Нормальний розподіл залишків.....	50
3.4 Побудова регресійно-кореляційної моделі впливу фотополімерних смол та параметрів друку на збереження геометричних розмірів моделі.....	55
3.5 Висновки до розділу 3.....	61
4 Охорона праці.....	63
4.1 Аналіз умов праці в лабораторії.....	63
4.2 Промислова безпека в лабораторії.....	64
4.3 Виробнича безпека в лабораторії	65
4.4 Висновки до четвертого розділу	67
Висновки.....	68

Перелік джерел посилання.....	71
Додаток А Абробація наукових результатів дослідження.....	75
Додаток Б Результати дослідження.....	85
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	88

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

DLP – digital light processing;

FDM – fused deposition modeling;

LCD – liquid crystal display;

MEMS – microelectromechanical systems;

SLS – sodium lauryl sulfate;

SLM - selective laser melting;

SLA – selective laser sintering.

ВСТУП

Розвиток адитивних технологій виробництва все більше стає поширеним в промисловості та повсякденному житті. Одним з найбільш універсальним та доступним для споживачів засобом для отримання об'ємних деталей складних форм є 3D-друк. На даний час за допомогою 3D-принтерів можливо виготовлювати деталі з пластика (FDM – друк), з металу (SLS/SLM – друк) та з фотополімеру (SLA, DLP та LCD – друк).

Фотополімерний 3D-друк, має ряд переваг, як: доступність, висока точність виготовлення деталей, простота технології та велика кількість безкоштовного програмного забезпечення. За рахунок цих переваг та особливостей технології, даний метод виготовлення можливо використовувати в багатьох сферах, як: ювелірне виробництво (створення майстер-моделей для лиття), стоматологи (створення протезів зубів), створення декоративних моделей для дизайну інтер'єру. Точність виготовлення деталей за цими технологіями залежить не тільки від технічних характеристик принтера, а і від властивостей фотополімерної смоли. Тому визначення впливу смол на збереження геометричних розмірів, є актуальною задачею при виготовленні моделі.

У роботі буде описано сфери застосування фотополімерного 3D-друку, розглянуті види фотополімерного друку та проаналізовані марки фотополімерних смол, які зараз використовуються для створення деталей. В експериментальній частині роботи буде, проведений факторний аналіз для фотополімерних смол, проведення серії експериментів на відхилень розмірів зразків при різних смолах та параметрах обробки.

Мета роботи – підвищення якості деталей (збереження геометричних розмірів) в процесі фотополімерного 3D-друку, за рахунок визначення параметрів експонування моделі для конкретних фотополімерних смол.

Об'єкт дослідження – процеси адитивного виробництва об'ємних моделей.

Предмет дослідження – технологія фотополімерного 3D-друку.

Задачі дослідження – проаналізувати технології фотополімерного друку та матеріали для виготовлення моделей, провести факторний аналіз смол та побудувати регресійно-кореляційну модель.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз технологій адитивного фотополімерного 3D-друку;
- проаналізувати види та властивості існуючих фотополімерних смол;
- розглянути характеристики макету для дослідження;
- провести факторний аналіз та обрати які саме смоли будуть використовуватися для дослідження;
- побудувати план експериментів;
- на основі отриманих даних провести перевірку вибірки;
- побудувати регресійно-кореляційну модель впливу властивостей смол та параметрів друку на відхилення геометричних розмірів 3D моделі;
- провести виготовлення деталі з урахуванням отриманих відхилень по кожній осі X, Y та Z для збереження геометричного розміру моделі.

Пояснювальну записку виконано згідно з [1-3]. За результатами проведених досліджень опублікована теза доповідь в студентському збірнику ADED-2023 Part 1 (Key infrastructure 2023) – Kharkiv / The Editorial.: Nevlyudov I.Sh. (head), that all. Kharkiv: Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics [electronic edition], 2023. – 336 p.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

Фотополімерні форми дозволяють відтворювати складні зображення з текстовими, штриховими та растровими елементами. Вони, у порівнянні з металевими формами, володіють більшою фарбовіддачею, що забезпечує отримання відбитків з підвищеною оптичною щільністю. Принцип отримання друкувальних елементів є ідентичним для всіх видів друку, крім трафаретного. При експонуванні через негатив під дією ультрафіолетових променів у шарі фотополімеру відбувається фотополімеризація й утворюються нерозчинні ділянки. Ці ділянки і є друкувальними елементами, на які пізніше наносять фарбу. У трафаретних друкарських формах нерозчинні ділянки є проміжними елементами, а ділянки, де фотополімери розчиняються, — друкувальними елементами [5].

Фотополімерні форми мають ряд переваг:

- процес виготовлення фотополімерних друкарських форм швидкий, доступний, дешевий;
- при їх використанні поліпшуються умови праці та не забруднюється довкілля;
- друкарські форми порівняно з іншими добре сприймають і віддають фарбу;
- використання фотополімерів значно скорочує витрати кольорових металів;
- форми стійкі до дії в'язучих фарб і змивальних речовин;
- можуть відтворювати дрібні зображення на відбитку;
- мають високу стійкість деталей.

Завдяки цим перевагам, існує безліч сфер застосування фотополімерного 3D-друку. Це надзвичайно велика область, яка охоплює неймовірну кількість завдань, рисунок 1.1. Сюди можливо віднести:

- ювелірна справа (виготовлення майстер-моделей);

- медицина (стоматологія, протези зубів пломб і.т.д.);
- аерокосмічна промисловість (виготовлення лопастей для дронів);
- машинобудування (створення корпусів та елементів вузлів);
- прототипування (розробка тестових моделей);
- макетування (створення моделей для архітектурних макетів);
- дизайн;
- сувенірна продукція.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

а – ювелірна справа; б – стоматологія; в – аерокосмічна промисловість;
 г – машинобудування; д – прототипування; е – сувенірна продукція
 Рисунок 1.1. – Приклади використання фотополімерного 3D-друку

1.1 Технології фотополімерного 3D-друку

На сьогоднішній день технології друку фотополімерними смолами та порошковими матеріалами одні з найбільш популярних для точного прототипування в порівнянні з іншими технологіями адитивного виробництва, так як дозволяють виготовляти з високою точністю та деталізацією деталі різного призначення.

Існують декілька технологій засвічування полімеру в фотополімерних принтерах [5]. З них можна виділити три основних, рисунок 1.2:

- SLA – селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering);
- DLP – цифрова обробка світла (Digital Light Processing);
- LCD – рідко-кристалічний екран (Liquid Crystal Display).

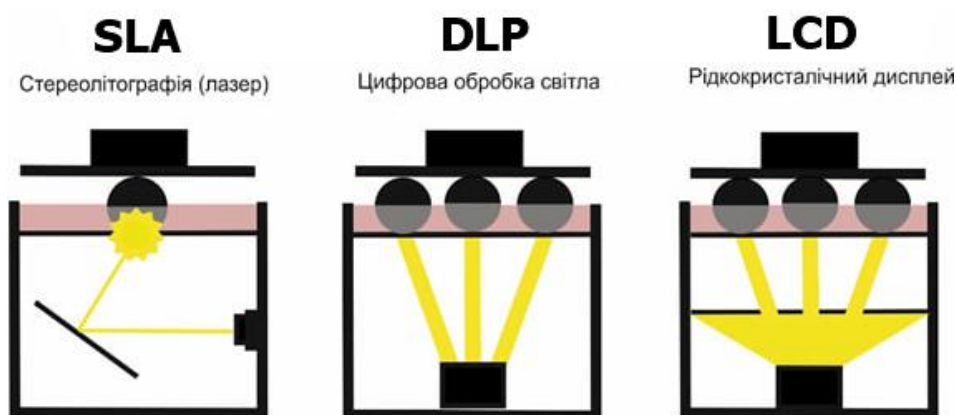


Рисунок 1.2 – Види фотополімерних технологій 3D друку

SLA технологія. Спосіб адитивного виробництва (3D-друку) під назвою "стереолітографія" полягає в послідовній полімеризації тонких шарів рідкого фото-чутливого полімеру променем ультрафіолетового лазера малої потужності. У робочій ємності 3D принтера розташована платформа, занурена в рідку смолу. Спочатку платформа знаходиться біля поверхні полімеру, покрита тонким шаром від 20 мікронів до 150 мікрон, на якому лазер починає формувати шар деталі [6].

Модель нарізується на тонкі шари, рівні роздільній здатності принтера по вертикальній осі. Створивши один шар, принтер занурює платформу на товщину нового шару моделі (від 10 мкм до 150 мкм) і створює наступний шар, рисунок 1.3.

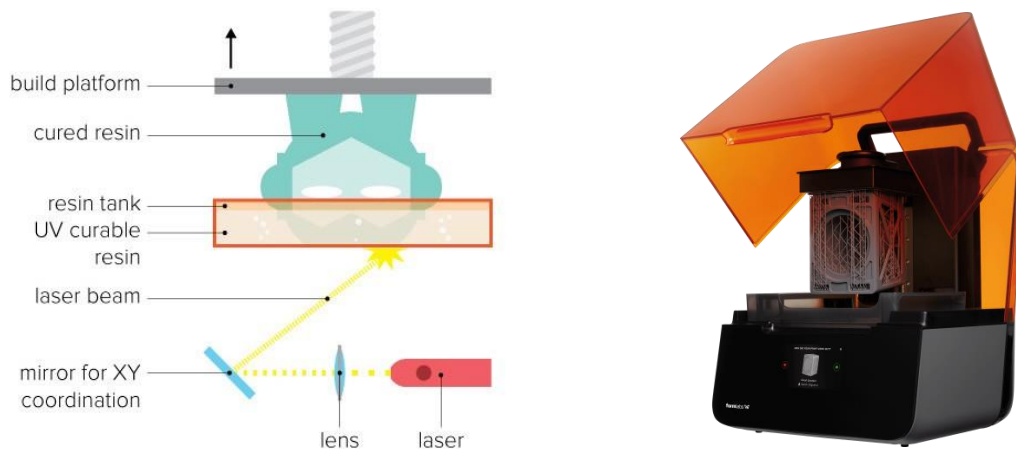


Рисунок 1.3 – Схема роботи SLA принтера

Під впливом лазера (його потужність може бути відносно невеликою – що робить принтер дешевше апаратів, що працюють з порошковими матеріалами SLS (Sodium Lauryl Sulfate), SLM (Selective Laser Melting) і т.д.) полімер твердне, утворюючи стінки майбутнього виробу [6-7]. Таким чином, шар за шаром, створюється модель цілком. Якщо в ній є навісні елементи, то для них вибудовуються підтримки з того ж полімеру, які потім механічно видаляється. Підтримки в моделі передбачають та створюють в CAD-програмах на стадії проектування моделі.

Перевага такої технології: можливість побудови моделей великих розмірів; велика точність; можливість побудови моделей будь-якої форми та конструкції; низький процент втрати зайвого матеріалу; низький шум роботи [6].

Недоліки: використання фотополімеру, що є дорожче ніж інші матеріали; висока вартість самого принтера; необхідність забезпечення високого класу точності при побудові принтера, що забезпечить правильний кут виставлення дзеркала; необхідність точної механіки, що забезпечить знаходження ванни на

рівні одного шару від поверхні до платформи; необхідність частого обслуговування принтера.

DLP технологія. Принцип роботи 3D принтерів, що використовують технологію 3D друку DLP схожий на роботу проектора [8]. Полімер переходить в тверду форму під дією світла (видимого спектру). Засвічується відразу весь шар.

Потік світла модулюється системою MEMS (Microelectromechanical systems) – мікромеханічними дзеркалами, які керується кожне окремо. Залежно від положення дзеркала, світло або проходить в дану точку шару, чи ні. Таким чином, машина має фіксоване логічне розширення – кількість точок по координатам XY. Їх фізичний розмір залежить від того, на якій відстані від джерела випромінювання в системі мікро-дзеркал перебуває модель, рисунок 1.4.

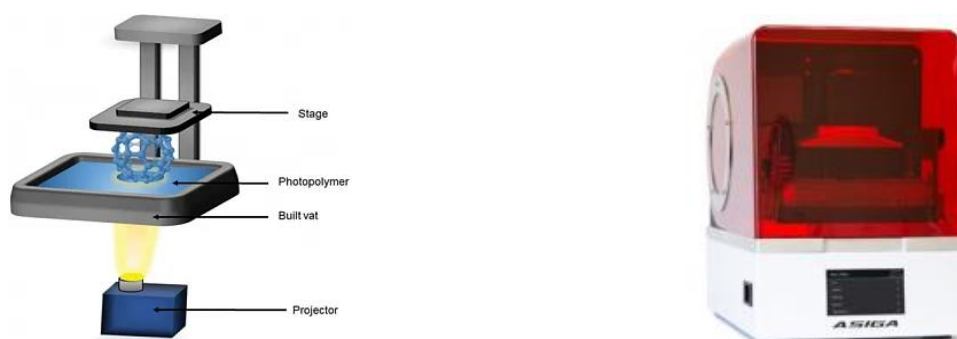


Рисунок 1.4 – Схема роботи DLP принтера

Недоліком даної технології є залежність від проектора, що встановлює робочу зону та точність по осі XY. Такі проектори мають високу ціну, що також є недоліком. Використання можливо лише з персонального комп'ютера або мікрокомп'ютера, що буде управляти проектором та платою управління. Може мати великі розміри при маленьких розмірах робочої зони, задля забезпечення необхідної відстані від лінз проектора до ванни.

Перевагами є невелика, порівняно з SLA технологією, вартість. Потребує меншої точності виготовлення компонентів. Може мати велику швидкість друку

за рахунок великої потужності лампи проектора [6].

LCD технологія. Принтер із засвіченням фотополімера світлодіодним УФ-матрицею з використанням в якості маски LCD-дисплея, рисунок 1.5.

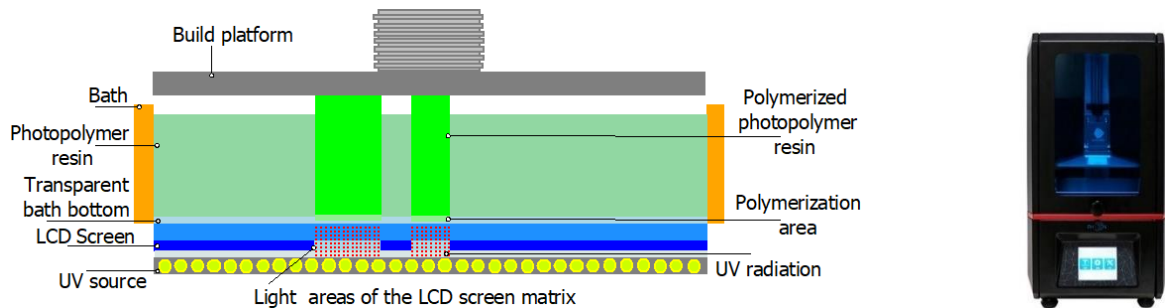


Рисунок 1.5 – Схема роботи LCD принтера

Фотополімер засвічується світлодіодною матрицею, зображення формується за рахунок LCD-дисплея, який покадрово виводить переріз формованої деталі. Якщо відмінності класичної SLA технології від DLP та LCD очевидні, то DLP і LCD-технології засвічування часто плутають, що невірно, тому що кожна з цих технологій має свої особливості, які впливають на можливості принтера, якість друку. У таблиці 1.1, наведено порівняння SLA, DLP і LCD технологій [9-10].

Недоліком даної технології є залежність робочої області від розміру екрана, точність залежить від екрана та його розміру, на сьогодні більше 10 дюймових екранів на ринку не має, також при такому екрані навіть з розширенням 8K менше ніж 50 мікрон розмір пікселя отримати неможливо. Також відносним недоліком є знаходження екрана безпосередньо під ванною. Ванна складається з алюмінієвого корпусу та плівки товщиною в 50-150 мкм, що при невеликих механічних пошкодженнях може пропускати фотополімерну смолу, яка буде потрапляти на екран та електроніку і призводити до можливого загоряння чи пошкодження принтера [10].

Перевагами даної технології є невелика вартість, простота обслуговування та широкі можливості модернізації. Порівняно з технологією DLP, перевагою є

відсутність спотворення зображення на робочій області. В результаті порівняння можливо зробити висновок, що ці три різновиди технології на сьогодні мають велику область використання, кожна з яких займає свою нішу в побуті та виробництві. Але технологія LCD на сьогодні має найбільший розвиток, завдяки чому має великий науковий інтерес в дослідженні та вдосконаленні технології та її використання.

Таблиця 1.1 – Порівняння SLA, DLP та LCD технологій

Технологія	Особливості
1. Розмір області друку по XY	
SLA	Не обмежений, чим вище область друку, тим нижче швидкість (променю треба встигнути «оббігти» велику площу).
DLP	Не обмежений, чим вище область друку, тим нижче швидкість друку і нижче роздільна здатність принтера.
LCD	Область друку жорстко прив'язана до розміру LCD-дисплея.
2. Швидкість друку	
SLA	Самий «повільний» з трьох технологій. Пов'язано це з послідовною засвіченням і низькою потужністю лазера.
DLP	Самий «швидкий», обумовлено високою потужністю проектора.
LCD	«Середній» по швидкості друку. Швидкість друку пов'язана з потужністю УФ-матриць. Потужність матриці збільшувати нескінченно не можна, тому що потужні матриці вимагають потужного охолодження, і починають «пробивати» «трафарет» з LCD-дисплея.
3. Паразитна засвічення по осі Z	
SLA	Мінімальна.
DLP	Максимальна. Висока засвічення пов'язана як з великою потужністю ламп проектора, так і з більшою часткою довгохвильового актинічного випромінювання в спектрі.
LCD	Середня.
4. Паразитна засвічення по XY	
SLA	Мінімальна.
DLP	При правильній наведенні на різкість - мінімальна, але вище, ніж у SLA.
LCD	Максимальна. Сильна паразитне засвічення пов'язана із засвіченням сусідніх пікселів за рахунок недосконалості фокусує системи УФ-матриці (точніше - з її повною відсутністю - світло на маску потрапляє під різними кутами). У майбутньому цей недолік, ймовірно, буде виправлений.
5. Фактори, що впливають на роздільну здатність (крім властивостей полімеру і товщини шару)	
SLA	1) Діаметр плями лазера і точність позиціонування плями. Типові значення від 100 мкм до 200 мкм (для плями лазера), від 40 мкм до 20 мкм (точність позиціонування). 2) 3D принтерах з технологією SLA можна друкувати, наприклад, об'єкти з дуже тонкими - вертикальними стінками товщиною всього 100 мікрон, горизонтальний шар - близько від 30 мкм до 50 мкм.
DLP / LCD	1) Розмір пікселя і точність наведення на різкість. Типове дозвіл 1920×1080, відповідно розмір пікселя залежить від області друку по XY. 2) Менше дозвіл в порівнянні з SLA принтерами, оскільки зображення в них формується через піксельну матрицю (від 33 мкм до 47 мкм), не дозволяє досягти більш плавних контурів деталі в порівнянні з SLA технології, рисунок 1.6.
6. Ціна	
SLA	Ціни на бюджетні моделі ціна в межах 2500 – 5300 доларів, «професійні» – від 5300 доларів і вище.
DLP	Ціни на серійно-випускаються – 4000 доларів і вище.
LCD	Ціна 400 – 700 доларів.

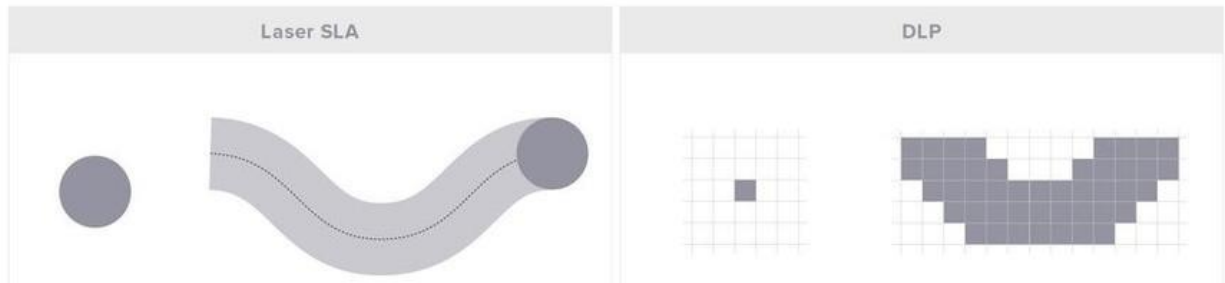


Рисунок 1.6 – Роздільна здатність SLA та DLP/LCD

1.2 Аналіз фотополімерних смол

Основні матеріали для фотополімерного друку, є фотополімерна смола. Фотополімери – це високомолекулярні органічні речовини, молекули яких під дією світла при наявності ініціаторів «полімеризує» між собою і втрачають здатність розчинятися. Цей процес називається фотополімеризацією, рисунок 1.7.



Рисунок 1.7 – Фотополімерні смоли

На даний момент існує безліч виробників і марок фотополімерних смол [15]. Їх ціни обумовлені точністю друку і мінімально допустимою висотою шару, додатковими характеристиками.

Також їх можливо умовно поділити на такі види, як:

- стандартні смоли для порипування;
- смоли для виплавлених моделей;
- біо-сумісні смоли;

- термо-стійкі смоли;
- хімічно стійкі смоли;
- механічно стійкі смоли.

В таблиці 1.2 наведені характеристики смол, які найчастіше мають попит на ринку фотополімерного друку, для домашнього використання.

Таблиця 1.2 – Марки та характеристики фотополімерних смол

№	Назва смоли	Твердість по Шору, шкала D	Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	Коефіцієнт усадки, %	Час засвітлено шару, с	Час засвітлено базових шарів, с	Товщи на шару, мкм	Ціна за літр, грн/л
1	Anycubi c 405nm UV [11]	88	405	2,76 – 3,54	5	15	35	1400
2	Plexiwir e Resin Basic [12]	73	405-450	3,04 – 3,82	7	20	35	880
3	MonoFil ament Basic [13]	82	405-450	2,37 – 4,22	7	25	35	1320
4	FunToD o [14]	73	225-415	1,27 – 2,43	6	17	20	2463
5	Wanhao Castable [15]	74	395-420	1,16 – 3,14	8	15	35	1650
6	BlueCas t CR3A [16]	70	400-410	3,74 – 4,82	4	9	10	5927, 40
7	Elegoo 3D [17]	69	385-450	5,37 – 5,74	3	10	35	1283, 37
8	Weistek [18]	90	385-410	2,38 – 3,02	7	15	50	972
9	Tevo [19]	80	380-420	3,53 – 4,22	8	12	50	1173, 40

В ювенільний справі найчастіше використовуються смоли для виплавлених моделей, наприклад FunToDo CB або Maker Juice Waxcast [20-21], рисунок 1.8.



а)



б)

а – фотополімерна смола FunToDo CB; б – фотополімерна смола Maker Juice Waxcast

Рисунок 1.8 – Фотополімерні смоли для виплавляємих моделей

Майстер-моделі з цих смол використовують для отримання литих металевих виробів. Перевагами таких смол є те, що в процесі вижигання майстер-моделі та заливтя метала у фору, майже нема шлаку та полімеризована смола легко виплавляється і дозволяє металі заповнювати форму виробу, рисунок 1.9.



а)



б)

а – результати лиття фотополімерної смоли FunToDo CB; б – результати лиття фотополімерної смоли Maker Juice Waxcast

Рисунок 1.9 – Приклади використання фотополімерних смол для лиття

Технічні характеристики смол для випалювання наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Характеристики фотополімерних смол для лиття

Фотополімерна смола FunToDo CB		
№	Параметер	Значення
1	Твердість по Шору	73
2	Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	225 – 415
3	Товщина шару, мкм	50
4	Час засвітлено шару, с	5
5	В'язкість, МПа	1000
6	Усадка готового виробу, %	0,5
Фотополімерна смола Maker Juice Waxcast		
№	Параметер	Значення
1	Твердість по Шору	70
2	Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	405
3	Товщина шару, мкм	25 – 50
4	Час засвітлено шару, с	10
5	В'язкість, МПа	1000
6	Усадка готового виробу, %	0,6

Anycubic Dental (Skin) Non-Castable (не випалювана) – фотополімерна смола, призначена спеціально для застосування в стоматологічних клініках, рисунок 1.10.

Основна відмінність цього фотополімеру від інших у тому, що він має найкращі показники чутливості та в'язкості, а також здатний швидко твердіти, не втрачаючи при цьому своєї стабільності через мінімальну усадку. Надруковані моделі відрізняються підвищеною міцністю та високою деталізацією, що дуже важливо у стоматологічному протезуванні [22].



Рисунок 1.10 – Фотополімерна смола Anycubic Dental (Skin) Non-Castable

Технічні характеристики смоли наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Характеристики фотополімерної смоли Anycubic Dental (Skin) Non-Castable

№	Параметер	Значення
1	Твердість по Шору	80
2	Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	405
3	Товщина шару, мкм	50
4	Час засвітлено шару, с.	4
5	В'язкість, МПа	100 – 150
6	Усадка готового виробу, %	1,8 – 2,12
7	Гранична міцність, МПа.	42 – 62
8	Інтенсивність випромінювання, Лм	1600

Фотополімерна смола Anycubic plant-based ECO resin є екологічним біорозкладним фотополімером з низькою усадкою, рисунок 1.11.



Рисунок 1.11 – Фотополімерна смола Anycubic plant-based ECO resin

Цей фотополімер призначений для роботи з DLP LCD 3D принтерами, які полімеризують моделі довжиною хвилі 395-405 нанометрів: Anycubic лінійка Photon та Mono, Wanhao (D7, D7 Plus, D8, GR1) та іншими, що друкують за технологією стереолітографії (DLP) [23].

Смола має відмінну комбінацію твердості та міцності, низьку усадку, має високу швидкість полімеризації. Завдяки своїй плинності чудово відтворює дрібно деталізовані елементи об'єктів, забезпечує високоточне прототипування.

Особливості екологічної фотополімерної смоли Anycubic 405nm UV resin, ECO:

- біорозкладний фотополімер виготовлений із соєвої олії, без летких органічних сполук та без шкідливих хімічних речовин;
- підходить для більшості DLP LCD 3D-принтерів. Чутливий до ультрафіолетового випромінювання 355-405 нм;
- низька в'язкість смоли полегшує очищення принтера та моделі;
- смола стабільна у різних кліматичних умовах.

При роботі з будь-яким полімером для 3D-друку рекомендуємо дотримуватися запобіжних заходів: використовувати захисну маску і рукавички і уникати попадання смоли на шкіру і слизову. Технічні характеристики смоли наведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Характеристики фотополімерної смоли Anycubic plant-based ECO resin

№	Параметер	Значення
1	Діапазон довжини хвилі для полімеризації, нм	355 – 410
2	Коефіцієнт усадки, %	3,74 – 4,24
3	Подовження на розриві, %	11 – 20
4	Міцність на розтяг, МПа	59 – 70
5	Твердість повністю затверділого полімеру Шору	84 за шкалою D
6	В'язкість (25°C), МПа	300
7	Щільність, г/см ³	1,05 – 1,25
8	Товщина шару друку, мкм	від 35
9	Рекомендований час запікання шарів, с	6 – 10
10	Інтенсивність випромінювання, Лм	1600

1.3 Висновки до першого розділу

В даному розділі були проаналізовані сфери застосування фотополімерного 3D-друку, розглянуті технології SLA, DLP та LCD, їх переваги та недоліки. Зокрема були розглянуті види фотополімерних смол та їх особовості.

За результатами аналізу можливо виділити наступне, що збереження геометричних розмірів моделі при друці на сам перед залежить не тільки від обраної технології друку, а значною мірою від матеріалу для друку (фотополімер).

Основними характеристиками фотополімеру, які впливають на точність виготовлення деталі при 3D-друці є:

- час експонування шару (час дії УФ-випромінювання на фотополімер), с;
- товщина шару, мкм;
- довжина хвилі полімеризації, нм;
- інтенсивність випромінювання, Лм;
- коефіцієнт усадки фотополімеру, %.

Для кожного фотополімеру ці значення різні, тому дослідження впливу цих параметрів на модель, є актуальною задачею.

2 ОПИС МАКЕТУ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для проведення досліджень був обраний фотополімерний 3D-принтер за технологією LCD Anycubic Photon Mono 4K [24], рисунок 2.1.



Рисунок 2.1 – Фотополімерний 3D-принтер Anycubic Photon Mono 4K

Цей принтер був обраний через те що, джерело УФ-випромінювання в даній моделі складає 405 нм, що підходить для більшості фотополімерних смол.

Також в ньому використовується монохромний РК-дисплей для затвердіння смоли, що дозволяє:

- збільшити швидкість друку;
- підвищує точність виготовлення;
- дає високу роздільною здатністю друку (4K).

Область друку становить 132 мм × 80 мм × 65 мм. Дана модель дозволяє регулювати потужність УФ-випромінювання від 30% до 100% залежності від особливостей фотополімерної смоли та швидкості друку, що дозволяє отримувати якісніші моделі.

Anycubic Photon Mono 4K має роздільну здатність дисплея, яка керується за технологією MSLA (Masked Stereolithography). Роздільна здатність дисплею

складає 3840×2400 пікселів.

Це дозволяє отримувати точніші результати друку порівняно з попередніми поколіннями LCD 3D принтерів (2K). При цьому термін експлуатації монохромного (чорно-білого) дисплея приблизно в 4 рази більше ніж у кольорового і становить близько 2000 годин.

Модель укомплектована паралельним джерелом світла для більш рівномірної експозиції, а також оснащена якісним блоком живлення для безперервної роботи та тривалого терміну служби. Матриця з кварцовими лінзами рівномірно розсіює УФ-промені, роблячи печатку ще більш точною по всій робочій площі екрана.

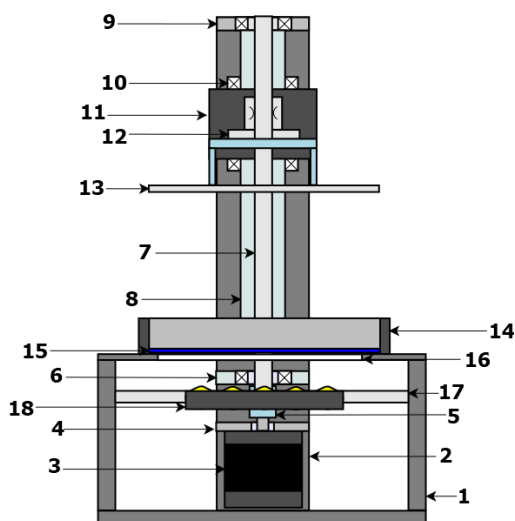
Технічні характеристики фотополімерного 3D-принтера Anycubic Photon Mono 4K наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики фотополімерного принтера Anycubic Photon Mono 4K

№	Характеристики	Значення
1	Технологія друку	LCD
2	Область друку, мм	132×80×65
3	LCD-дисплей роздільна здатність, піксел	3840×2400 (4K)
4	Товщина шарів, якими друкує принтер, мм	0,01 – 0,15
5	Максимальна швидкість друку, мм/годину	50
6	Довжина хвилі, нм	405
7	Підтримка моделей із програм	Anycubic Photon Worksop
8	Витратні матеріали (смоли якими можливо друкувати)	Фотополімерна смола Anycubic, Wanhao 405nm UV resin, Esun, та фотополімер з довжиною хвилі 405 nm: серія FunToDo, B9R-4-Yellow та ін.
9	Операційні системи	Windows XP, Windows Vista, Windows 7, Windows 8, Windows 10, Linux, MacOS
10	Дисплей	Сенсорний
11	Інтерфейс підключення	USB
12	Вага, кг	6
13	Загальні розміри принтера, мм	270×192×365

2.1 Кінематична схема макету для досліджень Anycubic Photon Mono 4K

Кінематична схема макету для досліджень, являє собою стандартне інженерне рішення для фотополімерного 3D-принтера за технологією LCD. Кінематична схема наведена на рисунку 2.2.



1 – корпус верстата; 2 – вертикальна направляюча; 3 – кроковий двигун Nema 17A 1,7A 17HS4401 вертикальної осі; 4 – кронштейн двигуна;
 5 – муфта ходового гвинта; 6 – нижня опора ходового гвинта;
 7 – ходовий гвинт; 8 – рельсова лінійна направляюча вертикальної осі;
 9 – верхня опора ходового гвинта; 10 – каретка вертикальної осі;
 11 – кронштейн вертикальної осі; 12 – гайка ходового гвинта;
 13 – платформа для друку; 14 – ванна; 15 – плівка дно ванни; 16 – LCD матриця; 17 – кронштейн для УФ-лампи; 18 – УФ-лампа

Рисунок 2.2 – Кінематична схема макету для досліджень

Принтер складається з корпусу «1» до якого приєднана вертикальна направляюча «2». За переміщення моделі при друці на новий шар відповідає ходовий гвинтовий T8 «7», з діаметром 10 мм та кроком різьби 2 мм [25]. Для цього до вертикальної осі «2» в низу та верху встановлюються опори ходового гвинта «6» та «9». Між опорами розташована лінійна направляюча MGN12 «8»

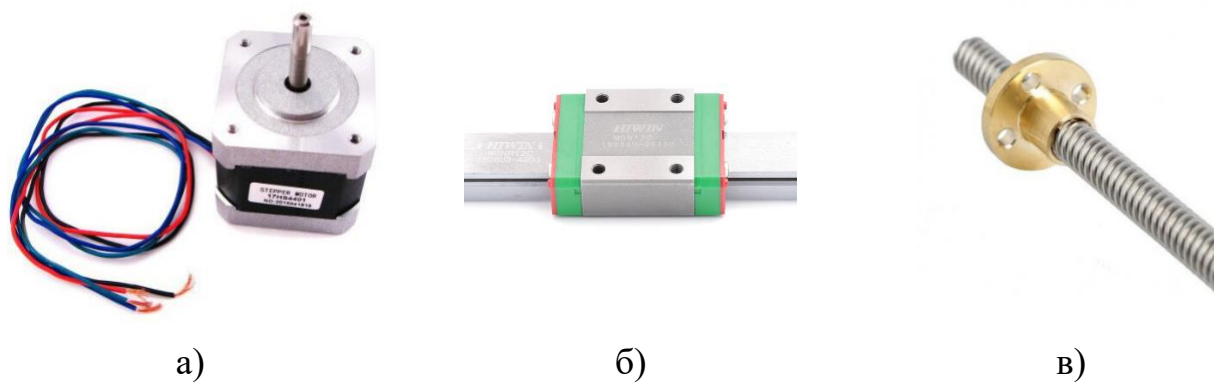
на якій знаходиться каретка MGN12H «10» [26]. Ця каретка з'єднана з кронштейном вертикальної осі «11».

До кронштейну вертикальної осі «11» встановлюється платформа для друку «13» з робочою площею 132×80 мм. Для переміщень платформи в низ та гору до кронштейну вертикальної осі встановлюється гайка ходового гвинта «12», через яку проходить ходовий гвинт «7». Обертання гвинта відбуваються за допомогою крокового двигуна Nema 17A 1,7A 17HS4401 «3» [27], вал якого з'єднаний до гвинта за допомогою муфтою гвинта «5».

За допомогою цієї передачі платформа може переміщатися в гору або в низ до ванни з фотополімером «14». Дно ванни виконано з прозорої плівки «15» товщиною 0,15 мкм. Плівка прилягає до LCD матриця «16», тим самим захищаючи його поверхню від пошкоджень та від контакту з фотополімерною смолою. LCD екран створює форму шару для друку.

Для експонування зображення шару через LCD екрана, використовується УФ-лампа «18», яка кріпиться до корпусу за допомогою кронштейну УФ-лампи «17».

На рисунку 2.3, наведені механічні компоненти макету.



а – кроковий двигун Nema 17A 1.7A 17HS4401; б – рельсова лінійна направляюча MGN12 з кареткою MGN12H; в - ходовий гвинтовий T8 та ходова гайка

Рисунок 2.3 – Механічні компоненти макету

2.2 Електрична частина макету

Електронна складова макету для дослідження на базі Anycubic Photon Mono 4K наведена на рисунку 2.4.

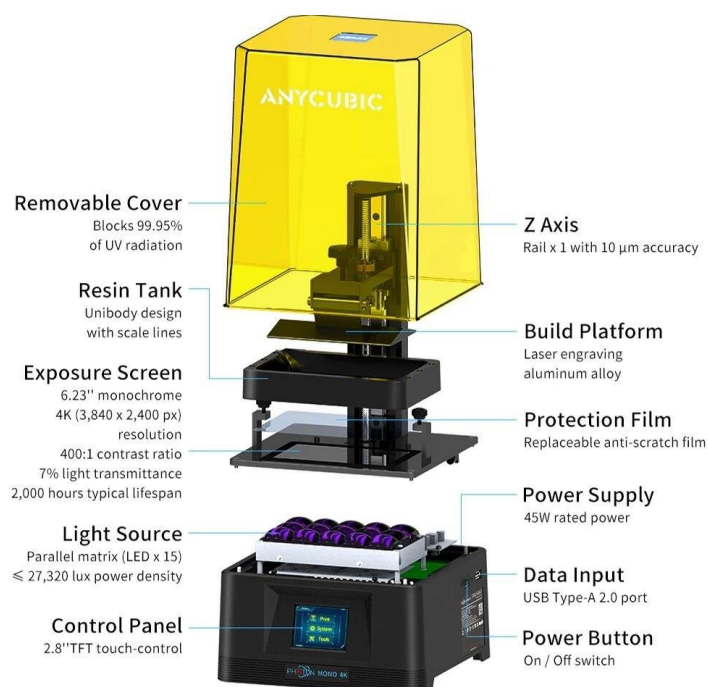


Рисунок 2.4 – Компоновка електроніки в Anycubic Photon Mono 4K

В якості плати для управління використовується спеціальна материнська плата Anycubic Photon Mono V0.05 на базі мікроконтролера ANLOGIC EF2L45L614B, рисунок 2.5 [28]. Ця плата предназначена для фотополімерних LCD 3D-принтерів, в ній спроектовані основні роз'єми та елементи необхідні для таких принтерів, а саме:

- роз'єм для підключення LCD матриці;
- роз'єм для підключення УФ-діодів;
- роз'єм для підключення крокових двигунів;
- роз'єм для підключення датчиків положення платформи (End-Stop);
- роз'єм для підключення сенсорного дисплея;
- роз'єми для живлення;
- USB порт;

– кнопка On/Off.

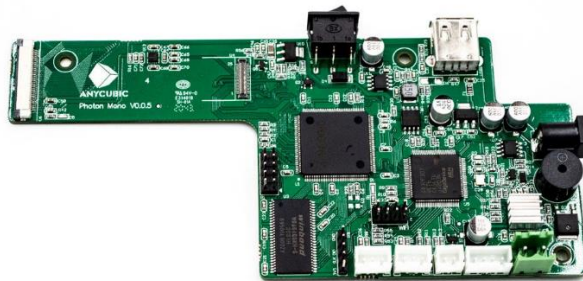


Рисунок 2.5 – Материнская плата Anycubic Photon Mono V0.05

LCD матриця теж від виробника фірми Anycubic. Матриця має роздільну здатність дисплея, яка керується за технологією MSLA (Masked Stereolithography) [29]. Роздільна здатність дисплею складає 3840×2400 пікселів. Матриця підключається до материнської плати за допомогою двох шлейфів та плати перехідника, рисунок 2.6.

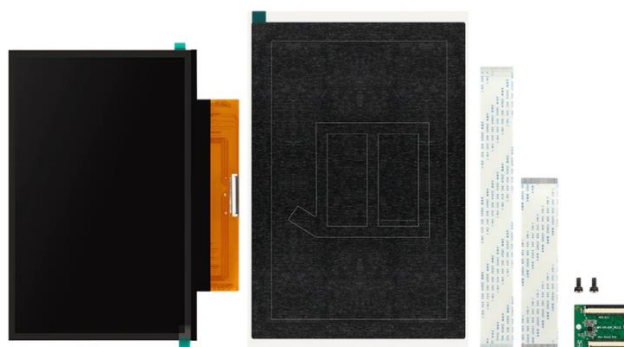
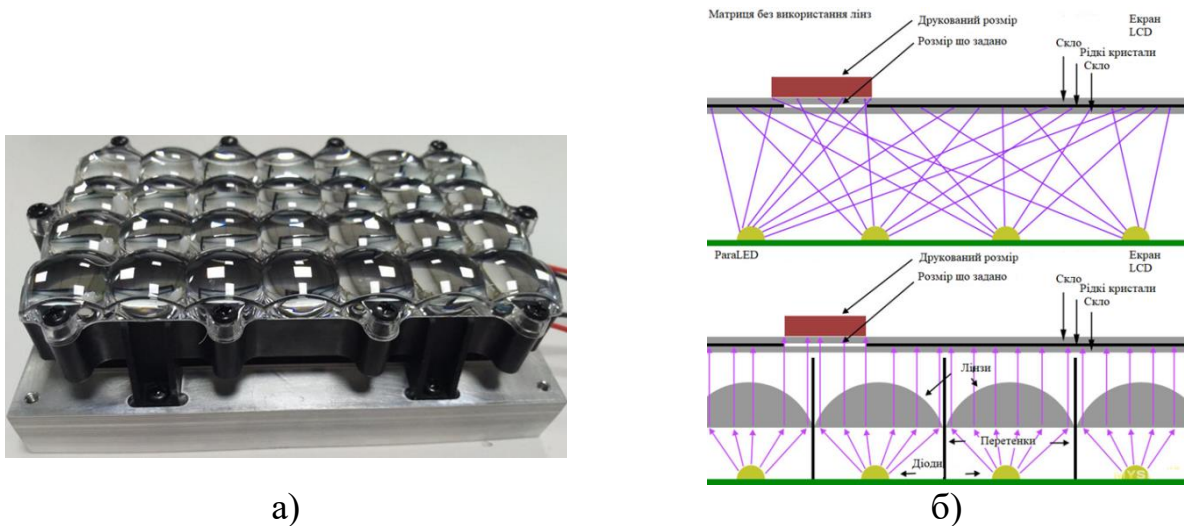


Рисунок 2.6 – LCD матриця Anycubic Photon Mono 4K

В якості джерела УФ-випромінювання в даній моделі використовується світлодіодна матриця з використанням кварцових лінз–ParaLED, яка має кут розсіювання випромінювання 15° . Для використання даної матриці потрібно 50 В напруги та 1,5 А струму. Системи ParaLED більш поширена за рахунок надійність в порівнянні з системами засвітлення зі світлодіодною матрицею та фокусатором.

В результаті друку багатьох моделей було визначено, що дана система дає менше паразитного засвітлення, рисунок 2.7. Встановлений радіатор, що має поперечні пластини, що краще відводять тепло [30].



а – світлодіодна матриця ParaLED; б – порівняння системи ParaLED та звичайні світлодіоди з фокусатором

Рисунок 2.7 – Світлодіодна матриця ParaLED

Взаємо дія з макетом виконуються через сенсорний дисплей MKS TFT24, рисунок 2.8. В таблиці 2.2 наведені характеристика сенсорного дисплея [31].

Таблиця 2.2 – Характеристики сенсорного дисплею MKS TFT24

№	Параметер	Значення
1	Розмір дисплея, мм	87×50
2	Colorful сенсорний екран, дюйми	2,4
3	Формат файлу	Gcode
4	Мікропроцесор	32 біт STM32
5	Масштабований модуль	WIFI / автоматичне вимкнення / визначення рівня сигналу / визначення потужності / зовнішній зовнішній зчитувач
6	Підтримка картки	SD



Рисунок 2.8 – Сенсорний дисплей MKS TFT24

Для живлення принтеру використовуються зовнішній блок живлення 12 В на 45 Вт, рисунок 2.9.



Рисунок 2.9 – Блок живлення для Anycubic Photon Mono 4K

В таблиці 2.3 наведені характеристика блоку живлення.

Таблиця 2.3 – Характеристики блоку живлення

№	Параметер	Значення
1	Вхідна напруга, В	220 AC
2	Вихідна напруга, В	12 DC
3	Вихідна сила струму, А	6
4	Потужність, Вт	45
5	Розміри, мм	115×60×35
6	Вага, кг	0,4

Для визначення положення платформи використовуються два оптичні датчика верхній (на верху вертикальної осі) та нижній (в низу вертикальної осі), рисунок 2.10.



Рисунок 2.10 – Оптичний датчик End-Stop

В таблиці 2.4 наведені характеристика оптичного датчика End-Stop.

Таблиця 2.4 – Параметри оптичного датчика

№	Параметер	Значення
1	Точність позцінування, мм	0,1
2	Сила струму, А	2
3	Потужність, Вт	360
4	Розміри, мм	32×10×20

Внутрішня компоновка Anycubic Photon Mono 4K наведена на рисунку 2.11.

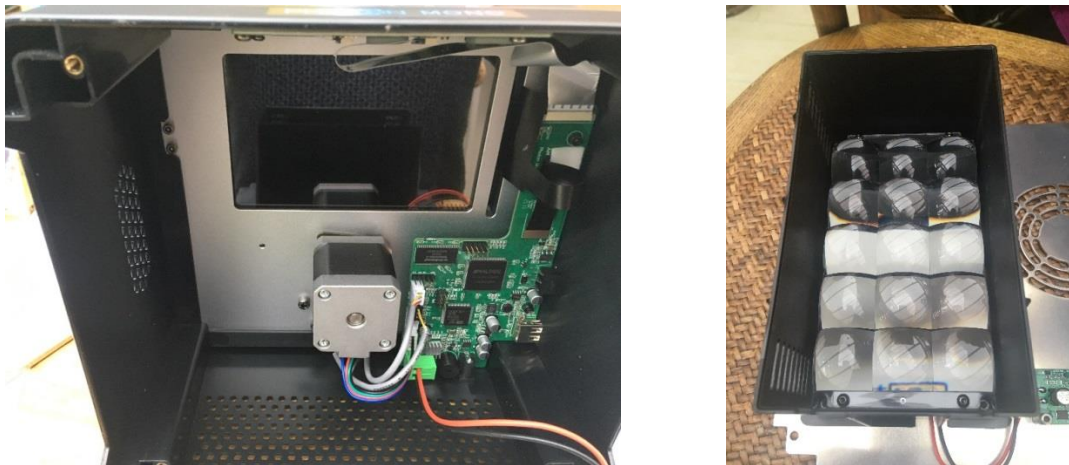


Рисунок 2.11 – Компоновка електроніки Anycubic Photon Mono 4K

2.3 Висновки до розділу 2

В даному розділі був розглянут макет для проведення досліджень Anycubic Photon Mono 4K. Розглянуті його характеристика та особливості. Була описана

кінематика та принцип дії даного верстата з ЧПУ (числове програмне управління).

Особлива увага була приділена до його електронній складовій, бо в залежності від роздільної здатності LCD матриці, кількості пікселів та типу джерела УФ-випромінювання, можуть безпосередньо вплив на відхилення геометричних розмірів моделі при друці.

За результатами аналізу можливо виділити наступне, що даний фотополімерний 3D-принтер Anycubic Photon Mono 4K, підходить для проведення досліджень за рахунок:

- високої роздільної здатності;
- можливості регулювати інтенсивність випромінювання;
- довжині хвилі встановленому на ньому УФ-матриці, 405 нм.

3 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Факторний аналіз фотополімерних смол для проведення досліджень

Основною задачею даної кваліфікаційної роботи – є визначення впливу різних марок фотополімерних смол на збереження геометричних розмірів моделі. Тому на першому етапі необхідно обрати, які саме фотополімерні смоли ми будемо використовувати в подальшому дослідженні.

На даній момент існує великий асортимент фотополімерів на ринку, тому були обрані 9 фотополімерів, які найчастіше використовуються простим користувачем. Та обрані основні характеристики, котрі можуть впливати на відхилення геометричних розмірів моделі, таблиця 3.1.

Таблиця 3.1 – Марки та характеристики фотополімерних смол для дослідження

№	Назва смоли	Мін. Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	Мак. Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	Мін. Коефіцієнт усадки, %	Мак. Коефіцієнт усадки, %	Час засвітлення шару, с	Час засвітлення базових шарів, с	Товщина шару, мкм	Інтенсивність випромінювання, Лм
1	Anycubic 405nm UV	405	405	2,76	3,54	5	15	35	1600
2	Plexiwire Resin Basic	405	450	3,04	3,82	7	20	35	1800
3	MonoFilament Basic	405	450	2,37	4,22	7	25	35	1600
4	FunToDo [225	415	1,27	2,43	6	17	20	2600
5	Wanhao Castable	395	420	1,16	1,16	8	15	35	2600
6	BlueCast CR3A	400	410	3,74	4,82	4	9	10	1800
7	Elegoo 3D	385	450	5,37	5,74	3	10	35	1600
8	Weitek	385	410	2,38	3,02	7	15	50	1800
9	Tevo	380	420	3,53	4,22	8	12	50	2400

Для побудови моделі множинної регресії впливу смол на розміри 3D-моделі, планується обрати дві марки фотополімерів, з найкращими початковими показниками. Для вирішення які саме обрати марки смоли, використаємо факторний аналіз.

Факторний аналіз дозволяє зменшити розмірність вибірки. Якщо предмет описується за допомогою багатьох рис або характеристик, які можуть бути між собою пов'язані (при зміні однієї характеристики змінюється інша) то факторний аналіз дозволяє всі ці характеристики та риси звести до меншого числа притому не порушуючи дані для подальшого аналізу.

Для проведення аналізу вносимо початкові дані в IBM SPSS Statistics 26. Таким чином ми отримуємо 8 параметрів які описують конкретну марку фотополімерної смоли, рисунок 3.1.

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
1	405,00	405,00	2,76	3,54	5,00	15,00	35,00	1600,00
2	405,00	450,00	3,04	3,82	7,00	20,00	35,00	1800,00
3	405,00	450,00	2,37	4,22	7,00	25,00	35,00	1600,00
4	225,00	415,00	1,27	2,43	6,00	17,00	20,00	2600,00
5	395,00	420,00	1,16	1,96	8,00	15,00	35,00	2600,00
6	400,00	410,00	3,74	4,82	4,00	9,00	10,00	1800,00
7	385,00	450,00	5,37	5,74	3,00	10,00	35,00	1600,00
8	385,00	410,00	2,38	3,02	7,00	15,00	50,00	1800,00
9	380,00	420,00	3,53	4,22	8,00	12,00	50,00	2400,00

а)

	Name	Type	Width	Decimals	Label	Values	Missing	Columns	Align	Measure	Role
1	Q1	Numeric	8	2	Min. Діапазон ...	None	None	8	Right	Scale	Input
2	Q2	Numeric	8	2	Max. Діапазон ...	None	None	8	Right	Scale	Input
3	Q3	Numeric	8	2	Min. Коефіцієнт...	None	None	8	Right	Scale	Input
4	Q4	Numeric	8	2	Max. Коефіцієнт...	None	None	8	Right	Scale	Input
5	Q5	Numeric	8	2	Час засвітлено...	None	None	8	Right	Scale	Input
6	Q6	Numeric	8	2	Час засвітлено...	None	None	8	Right	Scale	Input
7	Q7	Numeric	8	2	Товщина шару...	None	None	8	Right	Scale	Input
8	Q8	Numeric	8	2	Інтенсивність в...	None	None	8	Right	Scale	Input

б)

а – дані параметрів (Data View); б – налаштування змінних (Variable View)

Рисунок 3.1 – Внесення та налаштування в IBM SPSS Statistics 26

Для побудови факторного аналізу заходимо в вкладку (Analyze) → (Dimension Reduction) → (Factor). Вносимо всі зміни, які нам необхідні для аналізу рисунок 3.2.

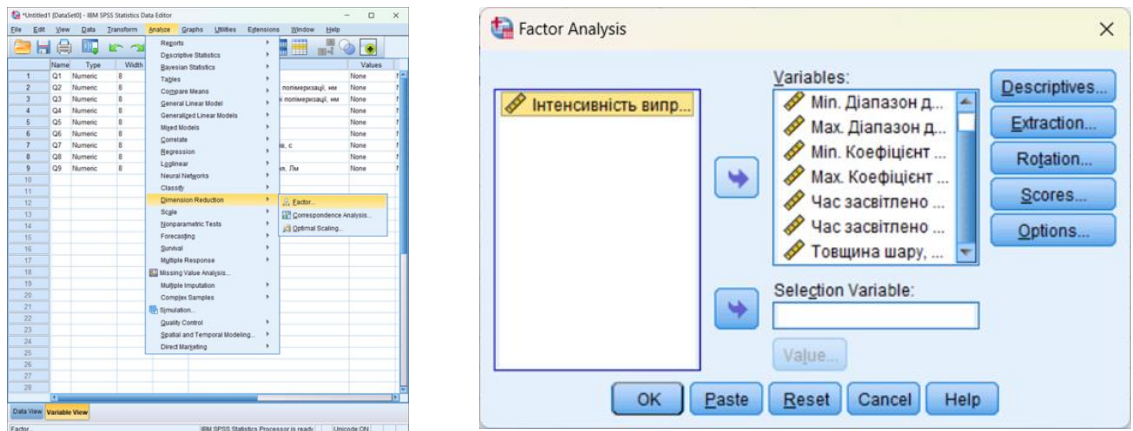


Рисунок 3.2 – Зміни в факторному аналізі

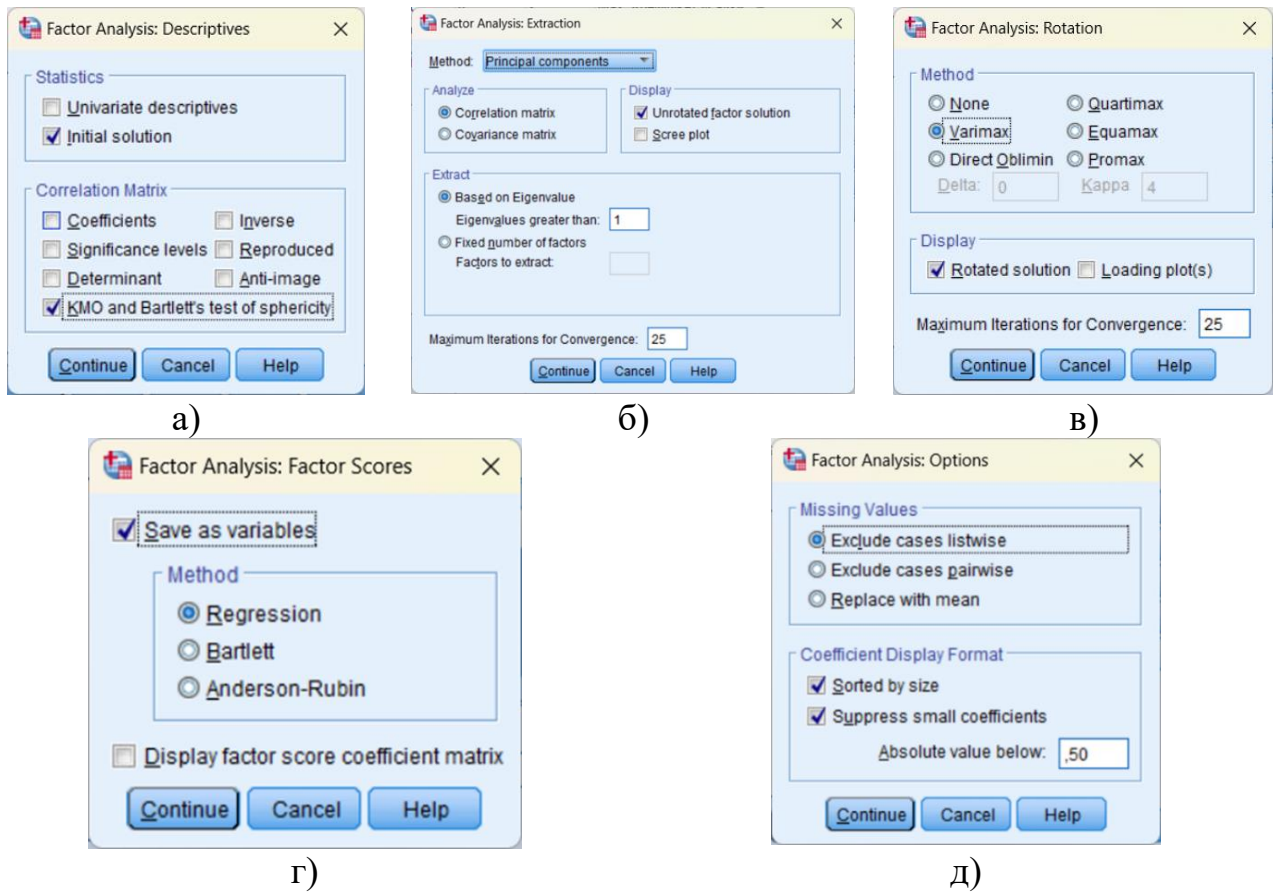
Також необхідно встановити вкладці (Descriptives), розрахунок (КМО and Bartlett`s test of sphericity) критерій сферичності. Це потрібно для того щоб він розрахував величенну, яка покаже наскільки доцільно використовувати отримані результати при подальшому аналізі. Ця величенна повинна бути більше ніж 0,5.

В кладці (Extraction), залишаємо базові налаштування. В вкладці (Rotation) ставимо метод (Varimax), в процесі факторного аналізу, будуть виконуватися ряд кореляційних аналізів для визначення впливу змінних між собою, тому даний метод дозволяє це зробити більш простіше та швидше [32-33].

В (Factor Scores) виставляємо (Save as variables) → (Regression), це необхідно для того що, з'являться зміни факторного аналізу, які потім датують можливість провести класифікацію отриманих верстатів.

Для зручності, щоб убрати мало значимі фактори, в вкладці (Options), та виставляємо (Suppress small coefficients) → (Absolute value below), виставляємо 0,5. Кореляція з меншим значенням можливо вважати не значними.

На рисунку 3.3 наведені всі налаштування профілів для факторного аналізу.



а – налаштування (KMO and Bartlett`s test of sphericity); б – налаштування (Extraction); в – налаштування методу (Varimax);
 г – налаштування (Factor Scores); д – налаштування (Options)

Рисунок 3.3 – Налаштування факторного аналізу

Після чого отримаємо результати розрахунку. В мірі адекватності та критерію Бартлетта (KMO and Bartlett`s test of sphericity), дивимося на значення 0,685. Це значення більше 0,5 та доводить що факторний аналіз вдався, рисунок 3.4.

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		,685
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	82,341
	df	28
	Sig.	,000

Рисунок 3.4 – Мірі адекватності та критерію Бартлетта

Інша таблиця яка необхідна це таблиця перевернутих матриць компонентів (Component Matrix^a), рисунок 3.5.

Component Matrix^a

	Component		
	1	2	3
Max. Коефіцієнт усадки, %	,951		
Min. Коефіцієнт усадки, %	,943		
Інтенсивність випромінювання, Лм	-,775		
Час засвітлено шару, с	-,755	,540	
Час засвітлено базових шарів, с		,693	-,564
Товщина шару, мкм		,662	,602
Max. Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм		,609	
Min. Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	,501	,535	

Extraction Method: Principal Component Analysis.

a. 3 components extracted.

Рисунок 3.5 – Матриця перевернутих компонентів

Ми отримали 8 початкових характеристик та 3 компоненти (три макро-факторів). Значення які були отримані це є кореляції, наприклад:

– максимальний коефіцієнт усадки корелює з першим фактором на 0,951 (значима кореляція).

Час засвітлення шару одночасно корелює з першим на -0,755 (значима кореляція) та з другим фактором на 0,54 (слабка кореляція).

Якщо повернутися до (Data View), отримуємо нові зміни а саме: FAC1_1, FAC2_1 та FAC3_1. Де «1» – це номер фактору, а «_1» – номер проведення аналізу, рисунок 3.6.

FAC1_1	FAC2_1	FAC3_1
,20287	-,50645	,18471
,19937	1,26038	,27438
,16833	2,00716	,15599
-1,41492	,03328	-1,91029
-1,28562	-,29054	,46089
,87906	-1,02689	-1,11815
1,81318	-,13850	-,33970
-,37465	-,48040	1,06883
-,18761	-,85805	1,22335

Рисунок 3.6 – Отримані значення факторного аналізу

Якщо проаналізувати результати рисунок 3.5, можливо побачити, що в перший макро-фактор потрапили:

- max. діапазон довжини хвилі полімеризації;
- min. коефіцієнт усадки;
- інтенсивність випромінювання;
- час засвітлено шару;
- min. діапазон довжини хвилі полімеризації.

Що досить логічно та пов'язано між собою, бо:

– від часу експонування шару може залежить усадка, бо чим менше час на шар, то більше відсоток усадки від загального об'єму шару, через те що недостатня полімеризація шару більш схильна до усадки друкованого шару;

– мінімальний діапазон хвилі полімеризації та інтенсивність випромінювання також можуть впливати на усадку, в залежності від хімічних властивостей смоли.

До другого макро-фактора потрапили, наступні параметри:

- час засвітлено шару;
- час засвітлено базових шарів;
- товщина шару;
- max. діапазон довжини хвилі полімеризації;
- min. діапазон довжини хвилі полімеризації.

Залежність цих параметрів також можливо пояснити:

– час експонування основних та базових шарів може впливати на товщину шару, бо чим більше час тим більше ризик виникнення паразитного засвітлення шарів;

– довжина хвилі полімеризації також впливає на товщину шару, бо може існувати залежності від хімічних властивостей смоли. Чим більше довжина хвилі то, рекомендована висота шаро теж збільшується. В цьому можливо переконатися, якщо подивитися в таблицю 3.1.

До третього макро-фактора потрапили час експонування базових шарів та товщина шару. Тут кореляція пояснюється тим, що чим більше висота базових шару тим менше потрібен час експонування бази.

Для зручності подальшої оцінки фотополімерних смол перейменуємо отримані нові зміни:

- FAC1_1 – «Показники усадки»;
- FAC2_1 – «Час експонування та висота шару»;
- FAC3_1 – «Показники адгезії перших слоїв».

Для того щоб було зручно працювати далі необхідно привести данні значення в нормальний стан. Для цього всі значення факторів необхідно розділити на три рівних проміжку (зробити ранжирування ряду). Це дозволить описати значення за допомогою балів (1 – низько, 2 – середньо; 3 – високий рівень) [32].

Для цього переходимо в вкладку (Transform) → (Rank Cases) та вносимо отримані нові зміни. В (Rank Type), дилемо значення на три відрізка, рисунок 3.7.

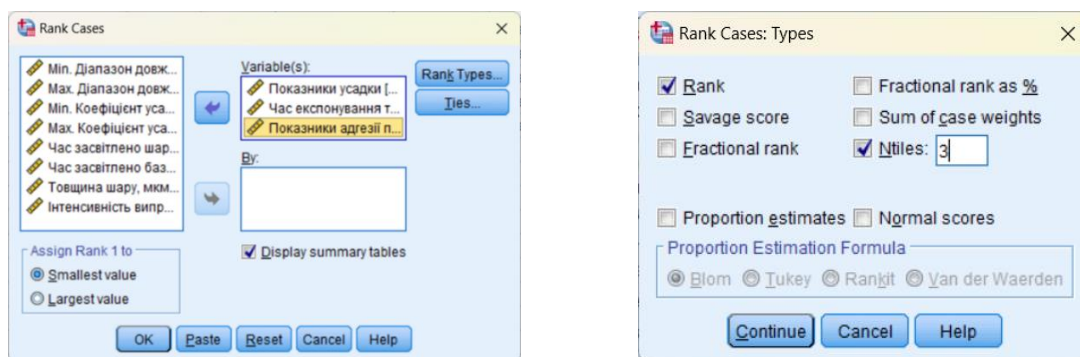


Рисунок 3.7 – Ранжирування ряду

В (Data View), отримуємо нові змінні NFAC1_1, NFAC2_1 та NFAC3_1, за якими можна буде провести оцінку, рисунок 3.8

	NFAC1_1	NFAC2_1	NFAC3_1
	3	1	2
	2	3	2
	2	3	2
	1	3	1
	1	2	3
	3	1	1
	3	2	1
	1	2	3
	2	1	3

Рисунок 3.8 – Отримане ранжирування

Якщо підставити ці значення під конкретну марку смоли, то отримуємо оцінку за трьома показниками, таблиця 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати оцінювання фотополімерних смол

№	Марка смоли	Показники оцінки		
		Показники усадки	Час експонування та висота шару	Показники адгезії перших слоїв
1	Anycubic 405nm UV	3	1	2
2	Plexiwire Resin Basic	2	3	2
3	MonoFilament Basic	2	3	2
4	FunToDo	1	3	1
5	Wanhao Castable	1	2	3
6	BlueCast CR3A	3	1	1
7	Elegoo 3D	3	2	1
8	Weistek	1	2	3
9	Tevo	2	1	3

Виходячи з результатів для подальшого проведення досліджень найкращими марками фотополімерних смол виявилися, Plexiwire Resin Basic та MonoFilament Basic. Ці смоли будуть використовуватися для створення тестових зразків.

3.2 Проведення дослідження

Для проведення досліджень була обрана тестова 3D модель, в якій є велика кількість базових геометричних форм, рисунок 3.9.



Рисунок 3.9 – Тестова модель

За допомогою елементів буде позводитись контроль відхилень геометричних розмірів при різних смолах та при різних значеннях параметрів обробки. Загальні розміри моделі 37 мм × 30,29 мм × 7 мм.

Для підготовки моделі до друку та задання параметрів обробки використовується програма ChituBox V1.9.3, яка на основі вказаних значеннях параметрів генерує G-code, рисунок 3.10.

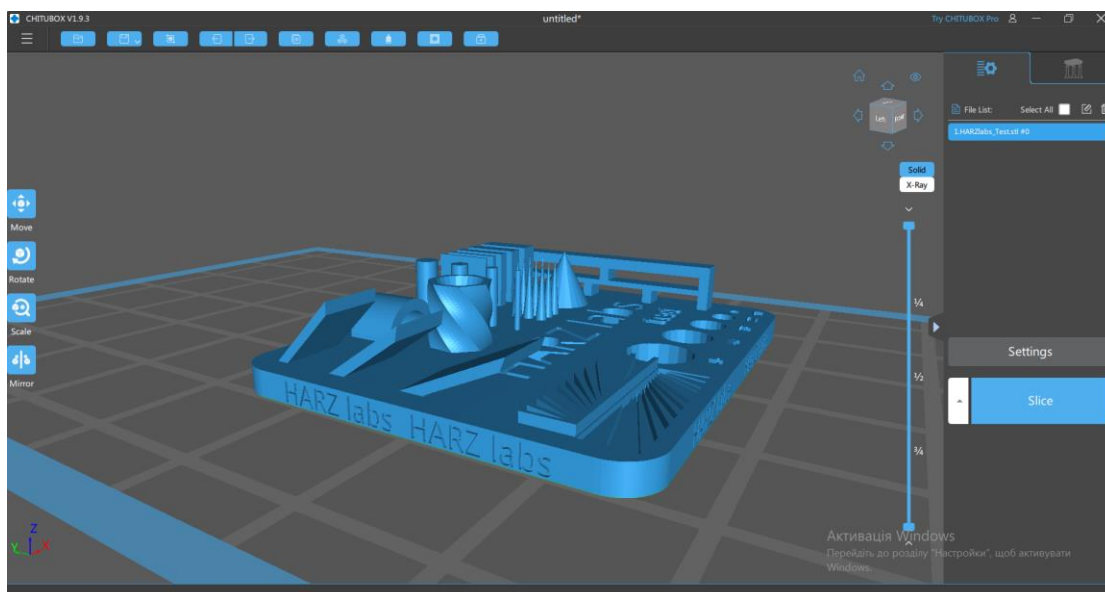


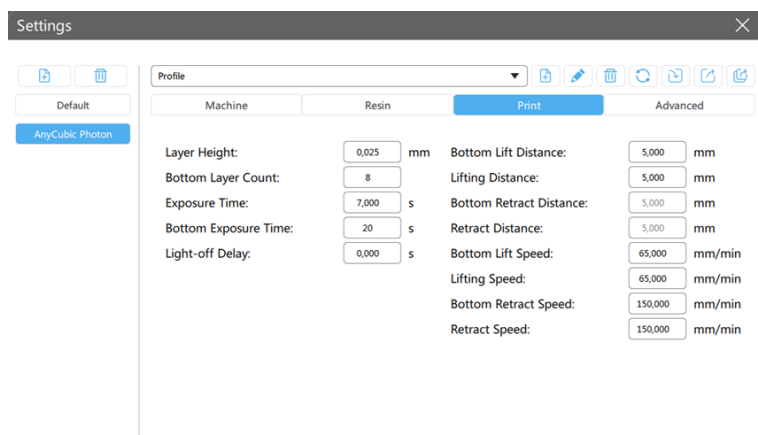
Рисунок 3.10 – Робоче вікно програми ChituBox V1.9.3

В дослідженні буде проводитися на базі двох марок фотополімерних смол, Plexiwire Resin Basic та MonoFilament. Параметри, які будуть змінюватися в ході проведення експериментів наступні:

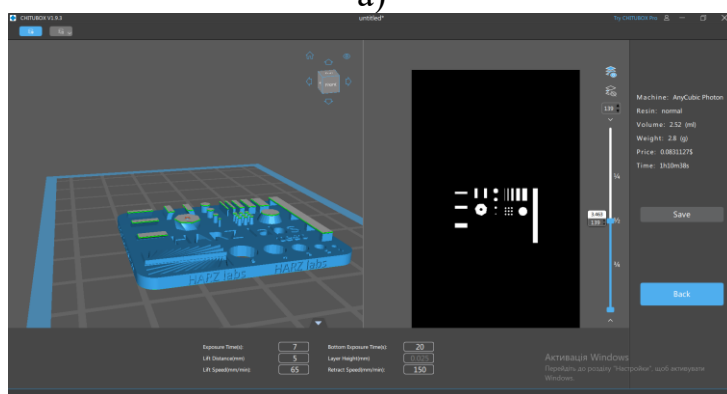
- час експонування основних шарів (Time), від 7 секунд до 12 секунд;
- час експонування базових шарів (Base time), 20 та 25 секунд;
- товщина шару (Thickness), 25 та 35 мкм;
- інтенсивність УФ-випромінювання (Intensity), 1600 та 1800 Лм.

Цей діапазон значення був обрані згідно характеристика цих смол. Довжина хвилі випромінювання 405 нм, кількість базових шарів 3. В цілому для побудови регресійної моделі та виявлення кореляції, виготовлено 96 тестових зразка по 48 зразка на кожен марку смоли (Додаток А). Вимірювання відхилень геометричних розмірів моделі відбуваються по трьох осях (XYZ).

Для цього в програмі ChituBox V1.9.3, для кожного зразка були створені окремі налаштування часу експонуванням та висоти шару, рисунок 3.10. Налаштування значень інтенсивності випромінювання, відбуваються за допомогою налаштувань в самому макеті.



а)



б)

а – налаштування профілю друку в ChituBox V1.9.3; б – результати підготовки моделі

Рисунок 3.10 – Підготовка моделі в ChituBox V1.9.3

За результатами виготовлення зразків було отримано 96 тестових моделей, рисунок 3.11.



а)



б)

а – тестовий зразок Plexiwire Resin Basic; б – тестовий зразок MonoFilament

Рисунок 3.11 – Тестові зразки

3.3 Перевірка результатів дослідження

Для побудови моделі множинної лінійної регресії необхідно зробити перевірку базових припущень, які підвередять або спростують адекватність початкових значень для розрахунку та дозволять переконатися що параметри, які були включені в модель дійсно впливають на залежну змінну.

Для перевірки базових припущень множинної лінійної регресії, необхідно переглянути наступні припущення [33]:

- зміні вимірювань в шкалах інтервалу та відносин і мінімальна кількість вимірювань на кожний незалежну;
- відсутність викидів у вимірюваннях;
- нормальний розподіл залишків.

3.3.1 Зміні вимірювань в шкалах інтервалу та відносин і мінімальна кількість вимірювань

Всі данні вимірювань в даному дослідженні мають порядковий характер, тому по першому припущенню модель проходить.

В даній моделі використовується чотири незалежні змінні: час експонування (Time); час експонування базових шарів (Base time); товщина шару (Thickness); інтенсивність випромінювання (Intensity).

Виходячи з правила на ножну незалежну змінну мінімальна кількість вимірювань 20, то для побудови даної множинної лінійної регресії кількість вимірювань повинна бути не менше 80 вимірянь. В даному випадку в цій моделі вимірювань 96 (Додаток Б). Тому по другому припущенню модель проходить.

3.3.2 Відсутність викидів у вимірюваннях

Для перевірки відсутності викидів не обходимо скористатися програмою IBM SPSS Statistics 26. Вносимо отримані значення (Додаток Б) в данину програму, рисунок 3.12.

	Name	Type	Width	Decimals	Label	Values	Missing	Columns	Align	Measure	Role
1	Deviations_X	Numeric	8	5		None	None	8	Right	Unknown	Input
2	Deviations_Y	Numeric	8	5		None	None	8	Right	Unknown	Input
3	Deviations_Z	Numeric	8	5		None	None	8	Right	Unknown	Input
4	Time	Numeric	8	2		None	None	8	Right	Unknown	Input
5	Base_time	Numeric	8	2		None	None	8	Right	Unknown	Input
6	Thickness	Numeric	8	2		None	None	8	Right	Unknown	Input
7	Intensity	Numeric	8	2		None	None	8	Right	Unknown	Input

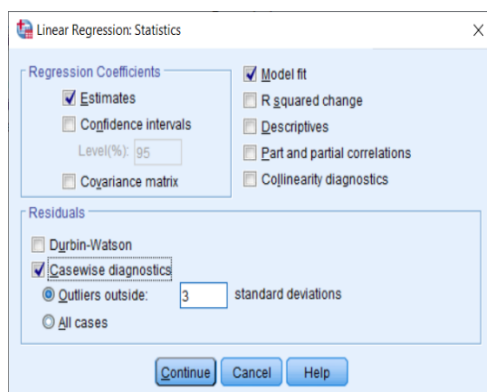
Рисунок 3.12 – Внесення даних в IBM SPSS Statistics 26

Значення відхилень по осях (X, Y та Z), беремо разом для кожної марки фотополімерної смоли, щоб перевірити наявність викидів в цілому [33].

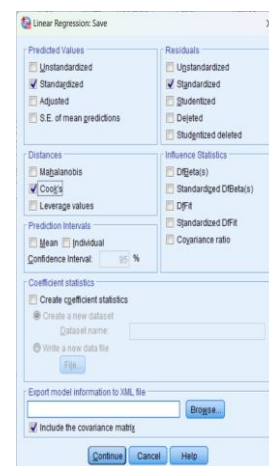
Переходимо в (Analyze) → (Regression) → (Linear), створюємо модель переходимо (Statistics) для перевірки наявності викидів та обираємо діагностику по вимірюванням (Casewise diagnostics). Це дозволить дати деякі відомості про викидів. Переходимо в кладку (Save), та побудуємо додаткові змінні, а саме:

- відстань Кука (Cook`s);
- стандартизовані залишки (Residuals), (Standardized);
- стандартизовані передбачені значення (Predicted Values), (Standardized).

Стандартизовані значення цих величин необхідні того щоб, побачити чи знаходяться ці значення до діапазону норми, рисунок 3.13.



а)



б)

а – діагностика по вимірюванням; б – побудова додаткових змінних

Рисунок 3.13 – Налаштування розрахунків викидів у вимірюваннях

Після налаштувань отримуємо таблицю статистику залишків (Residuals Statistics^a), Підставляючи значення відхилень окремо по різних осях, отримуємо три таблиці статистик залишків, рисунок 3.14.

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	,0107677	,0141719	,0124698	,00089093	96
Std. Predicted Value	-1,910	1,910	,000	1,000	96
Standard Error of Predicted Value	,000	,000	,000	,000	96
Adjusted Predicted Value	,0107450	,0141700	,0124695	,00089111	96
Residual	-,00062563	,00081688	,00000000	,00029515	96
Std. Residual	-2,075	2,709	,000	,979	96
Stud. Residual	-2,120	2,781	,000	1,005	96
Deleted Residual	-,00065343	,00086693	,00000030	,00031125	96
Stud. Deleted Residual	-2,163	2,892	,004	1,020	96
Mahal. Distance	3,054	5,089	3,958	,851	96
Cook's Distance	,000	,106	,011	,018	96
Centered Leverage Value	,032	,054	,042	,009	96

a. Dependent Variable: Deviations_X

a)

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	,0106738	,0139345	,0123042	,00085075	96
Std. Predicted Value	-1,916	1,916	,000	1,000	96
Standard Error of Predicted Value	,000	,000	,000	,000	96
Adjusted Predicted Value	,0106447	,0139369	,0123041	,00085114	96
Residual	-,00078869	,00093262	,00000000	,00036707	96
Std. Residual	-2,103	2,487	,000	,979	96
Stud. Residual	-2,174	2,551	,000	1,005	96
Deleted Residual	-,00084261	,00098140	,00000005	,00038689	96
Stud. Deleted Residual	-2,220	2,633	,002	1,016	96
Mahal. Distance	3,054	5,089	3,958	,851	96
Cook's Distance	,000	,078	,011	,015	96
Centered Leverage Value	,032	,054	,042	,009	96

a. Dependent Variable: Deviations_Y

б)

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	,0053249	,0069874	,0061561	,00043113	96
Std. Predicted Value	-1,928	1,928	,000	1,000	96
Standard Error of Predicted Value	,000	,000	,000	,000	96
Adjusted Predicted Value	,0053122	,0069900	,0061561	,00043125	96
Residual	-,00045401	,00047913	,00000000	,00019097	96
Std. Residual	-2,327	2,456	,000	,979	96
Stud. Residual	-2,378	2,519	,000	1,005	96
Deleted Residual	-,00047420	,00050419	,00000009	,00020145	96
Stud. Deleted Residual	-2,442	2,597	,000	1,015	96
Mahal. Distance	3,054	5,089	3,958	,851	96
Cook's Distance	,000	,069	,011	,015	96
Centered Leverage Value	,032	,054	,042	,009	96

a. Dependent Variable: Deviations_Z

в)

а – відхилення по осі X; б – відхилення по осі Y; в – відхилення по осі Z

Рисунок 3.14 – Статистика залишків

Виходячи с того що, максимальні та мінімальні значення стандартизовані залишки (Std.Residual) та стандартизовані передбачені значення (Std.Predicted Value) не виходять з діапазону ± 3 :

- залишки осі X – (Std.Residual) в діапазоні від -2,075 до 2,709, (Std.Predicted Value) в діапазоні від -2,120 до 2,781;
- залишки осі Y – (Std.Residual) в діапазоні від -2,103 до 2,487, (Std.Predicted Value) в діапазоні від -2,174 до 2,551;
- залишки осі Z – (Std.Residual) в діапазоні від -2,327 до 2,456, (Std.Predicted Value) в діапазоні від -2,378 до 2,519.

Що свідчить про, відсутність викидів у вимірюванні. Значення відстані Кука (Cook`s Distance) для кожної осі, наступні:

- відстань Кука по відхиленням осі X – 0,106;
- відстань Кука по відхиленням осі Y – 0,078;
- відстань Кука по відхиленням осі Z – 0,069.

Що значно менше одиниці, що теж піддержує відсутність викидів. Тому можна вважати що, отримані результати відповідають вимогам про відсутність викидів у вимірюваннях.

3.3.3 Нормальний розподіл залишків

Залишком називається різниця між залежною зміною та передбаченим значенням (Y), через яку проходить лінія регресії. Для перевірки нормального розподілу необхідно побудувати графік розподілу. Переходимо в кладку (Analyze) → (Regression) → (Linear). В вкладці статистики (Statistics), убираємо описові статистики (Descriptives) та діагностика колінеарності (Collinearity diagnostics). Заходимо в (Plots) обираємо гістограму (Histogram) та нормально імовірний графік (Normal probability plot), рисунок 3.15.

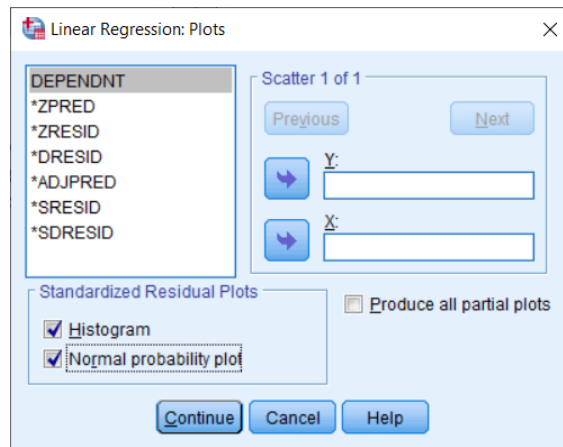
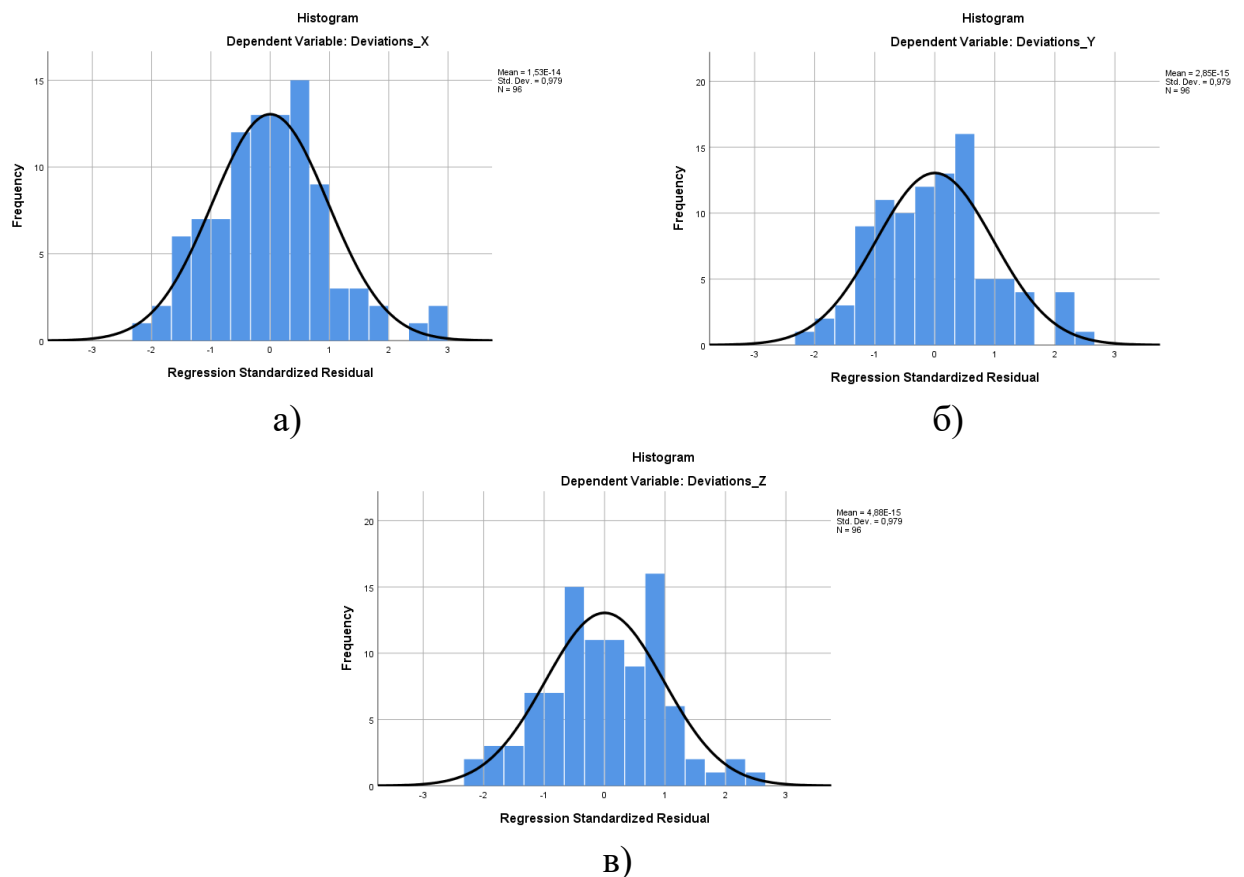


Рисунок 3.15 – Побудова графіку розподілу залишків

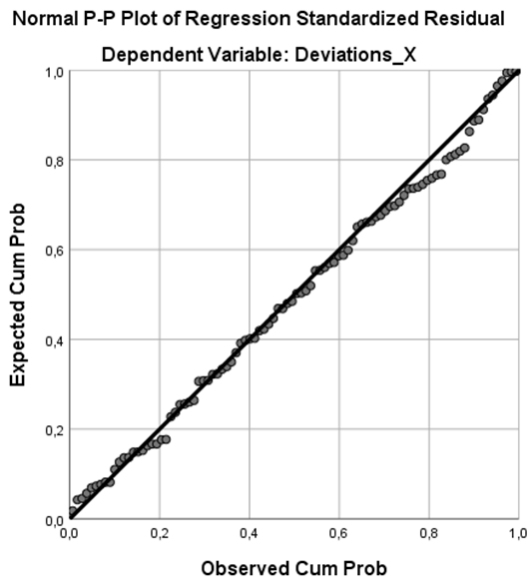
В результаті отримуємо гістограму. За допомогою гістограми можливо побачити, наскільки сильно відхиляться розподіл від теоретичної апроксимованої лінії Гаусса, рисунок 3.16.



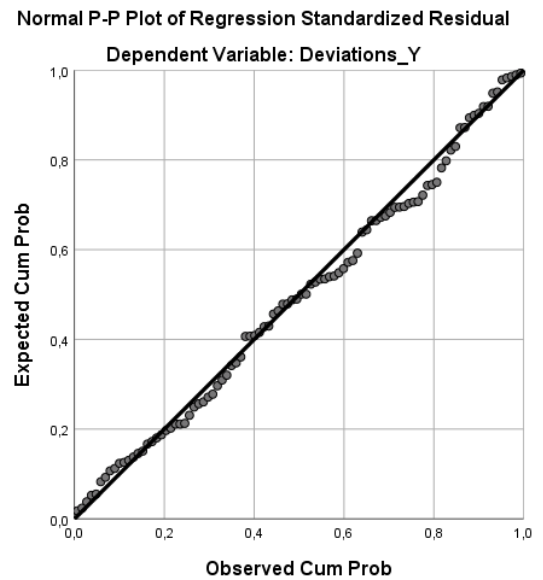
а – гістограма відхилення розподілу по осі X; б – гістограма відхилення розподілу по осі Y; в – гістограма відхилення розподілу по осі Z

Рисунок 3.16 – Гістограма відхилення розподілу

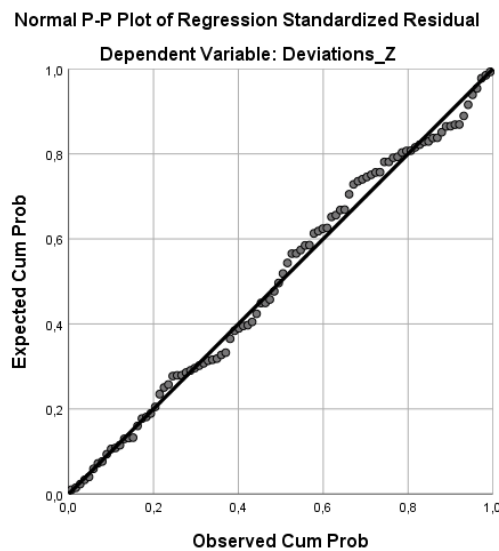
На графіку накоплених ймовірностей, можливо побачити чи відхиляюся спостереження від теоретичної прямої діагоналі, рисунок 3.17.



а)



б)



в)

а – спостереження по осі X; б – спостереження по осі Y;

в – спостереження по осі Z

Рисунок 3.17 – Графік спостережень

Для того щоб оцінити відхилення даних за нормальним розподілом (рисунок 3.16) та відхилення спостережень (рисунок 3.17), необхідно аналітично розглянути ці графіки та оцінити розподіл залишків.

В даних графіках необхідно оцінити стандартизований залишок, для цього окремо побудувати ці величини. Переходимо (Analyze) → (Regression) → (Linear) в кладці (Save) обираємо зберегти стандартизований залишок (Residuals) → (Standardized) та не стандартизований залишок (Residuals) → (Unstandardized).

В результаті чого в (Data View) отримуємо додаткові значення RES_1 та ZRE_2, за допомогою цих значень можливо перевірити нормальність, як звичайні змінні.

Переходимо в аналіз описові статистики (Descriptive Statistics) початковий аналіз (Explore) та перенесемо отримані змінні. В кладці (Plots) обираємо графік для критерію нормальності (Normality plots with tests), рисунок 3.18.

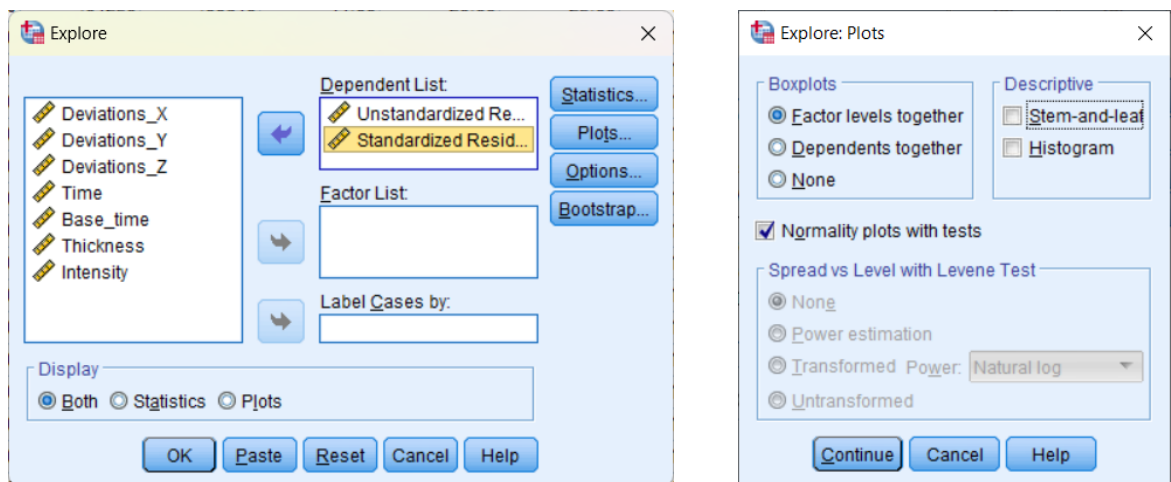


Рисунок 3.18 – Налаштування перевірки нормальності

В таблиці критерію нормального розподілу (Tests of Normality), в показниках значимості (Kolmogorov-Smirnov^a) та (Shapiro-Wilk), значимість (Sig.) повинна бути більше ніж 0,05, це дає підтвердження правила про нормальності розподілу залишків, рисунок 3.19.

Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Unstandardized Residual	,060	96	,200 [*]	,980	96	,143
Standardized Residual	,060	96	,200 [*]	,980	96	,143

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

a)

Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Unstandardized Residual	,060	96	,200 [*]	,986	96	,375
Standardized Residual	,060	96	,200 [*]	,986	96	,375

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

б)

Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Unstandardized Residual	,066	96	,200 [*]	,991	96	,737
Standardized Residual	,066	96	,200 [*]	,991	96	,737

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

в)

а – розподіл по осі X; б – розподіл по осі Y; в – розподіл по осі Z

Рисунок 3.19 – Таблиці критерію нормального розподілу (Tests of Normality)

В даному випадку значимість стандартизованих (Standardized Residuals) і не стандартизований залишок (Unstandardized Residuals) за (Kolmogorov-Smirnov^a) складає 0,2, а (Shapiro-Wilk) складає:

- по осі X – 0,143;
- по осі Y – 0,375;
- по осі Z – 0,737.

Що підтримує нормальний розподіл залишків в моделі.

3.4 Побудова регресійно-кореляційної моделі впливу фотополімерних смол та параметрів друку на збереження геометричних розмірів моделі

Після перевірки отриманих значень відхилень геометричних розмірів тестових моделей, можливо побудувати регресійно-кореляційну модель. Для цього водимо отримані дані в програму IBM SPSS Statistics для проведення базового лінійного регресійного аналізу параметрів експонування 3D моделі.

С початку розрахунки будемо робити окремо, для кожної смоли. Тобто будемо створювати дві моделі по 48 вимірювань.

Для цього заходимо (Analyze) → (Regression) → (Linear), вказуємо зміні моделі. В вкладці (Statistics) вказуємо: зміну R-квадрат (R squared change), описові статистики (Descriptives), частині та особові кореляції (Part and partial correlations), рисунок 3.20. Метод залишаємо (Enter).

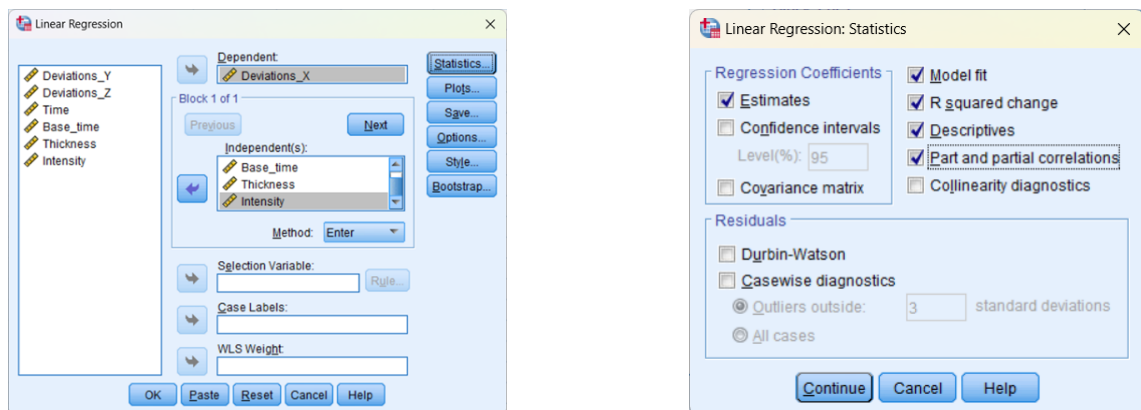


Рисунок 3.20 – Налаштування лінійної регресії

Використовуючи розрахунки зведення для моделі (Model Summary), отримує значення коефіцієнта детермінації (R), рисунок 3.21.

Для фотополімерної смоли Plexiwire Resin Basic: (R) для відхилень по осі X – 0,959; (R) для відхилень по осі Y – 0,959; (R) для відхилень по осі Z – 0,937.

Для фотополімерної смоли MonoFilament Basic: (R) для відхилень по осі X – 0,955; (R) для відхилень по осі Y – 0,947; (R) для відхилень по осі Z – 0,968.

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	,959 ^a	,920	,912	,00025336	,920	123,119	4	43	,000

a. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Base_time, Time

а)

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	Change Statistics			Sig. F Change
						F Change	df1	df2	
1	,959 ^a	,920	,913	,00024461	,920	124,465	4	43	,000

a. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Base_time, Time

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	,937 ^a	,878	,867	,00016244	,878	77,603	4	43	,000

a. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Base_time, Time

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	,955 ^a	,912	,904	,00029839	,912	111,070	4	43	,000

a. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Base_time, Time

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	,947 ^a	,897	,887	,00032738	,897	93,418	4	43	,000

a. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Base_time, Time

д)

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	,968 ^a	,937	,931	,00012313	,937	158,686	4	43	,000

a. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Base_time, Time

е)

а – Plexiwire Resin по (X); б – Plexiwire Resin по (Y);

в – Plexiwire Resin по (Z); г – MonoFilament по (X);

д – MonoFilament по (Y); е – MonoFilament по (Z)

Рисунок 3.21 – Зведення для моделі (Model Summary)

Показник (R) – це кореляція між отриманими значеннями залежною змінною та передбаченим значенням, через котрі проходить лінія регресії.

Це показник відповідності розрахованих моделлю значень (лінійної регресії) та отриманих експериментальних результатів.

Коефіцієнт множинної детермінації (R^2), в різних випадках дорівнює:

– для фотополімерної смоли Plexiwire Resin Basic: (R^2) для відхилень по осі X – 0,92, (R^2) для відхилень по осі Y – 0,92, (R^2) для відхилень по осі Z – 0,878;

– для фотополімерної смоли MonoFilament Basic: (R^2) для відхилень по осі X – 0,912, (R^2) для відхилень по осі Y – 0,897, (R^2) для відхилень по осі Z – 0,937.

Це означає наприклад, що включені в систему параметри відхилень для смоли Plexiwire Resin Basic по осях X та Y впливають на результат на 92,0%. Скоригований коефіцієнт (R^2) дорівнює 0,912 або 91,2%. Стандартна помилка оцінки 0,00025336. Цей показник повинен бути більше 0,5. Виходячи з результатів розрахунків по всіх осях, значення (R^2) більше 0,5. В таблиці 3.3 наведені основні показники таблиці (Model Summary).

Таблиця 3.3 – Загальний опис таблиці Model Summary

Plexiwire Resin Basic			
Показники	X	Y	Z
«R»	0,959	0,959	0,937
« R^2 »	0,920	0,920	0,878
Скоригований коефіцієнт « R^2 »	0,912	0,913	0,867
Стандартна помилка оцінки	0,00025336	0,00024461	0,00016244
MonoFilament Basic			
Показники	X	Y	Z
«R»	0,955	0,947	0,968
« R^2 »	0,912	0,897	0,937
Скоригований коефіцієнт « R^2 »	0,904	0,887	0,931
Стандартна помилка оцінки	0,00029839	0,00032738	0,000123113

Середні значення (R^2):

– для фотополімерної смоли Plexiwire Resin Basic по осях (XYZ);

– для фотополімерної смоли MonoFilament Basic по осях (XYZ).

По таблиці ANOVA перевіряємо гіпотезу про рівність $(R^2) = 0$. Так як рівень значимість (Sig.), повинна бути менше 0,05, що підтверджується вірність попередніх результатів, рисунок 3.22.

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	,000	4	,000	123,119	,000 ^b
	Residual	,000	43	,000		
	Total	,000	47			

a. Dependent Variable: Deviations_X

b. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Base_time, Time

а)

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	,000	4	,000	77,603	,000 ^b
	Residual	,000	43	,000		
	Total	,000	47			

a. Dependent Variable: Deviations_Z

b. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Base_time, Time

в)

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	,000	4	,000	93,418	,000 ^b
	Residual	,000	43	,000		
	Total	,000	47			

a. Dependent Variable: Deviations_Y

b. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Base_time, Time

д)

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	,000	4	,000	124,465	,000 ^b
	Residual	,000	43	,000		
	Total	,000	47			

a. Dependent Variable: Deviations_X

b. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Base_time, Time

б)

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	,000	4	,000	111,070	,000 ^b
	Residual	,000	43	,000		
	Total	,000	47			

a. Dependent Variable: Deviations_Z

b. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Base_time, Time

г)

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	,000	4	,000	158,686	,000 ^b
	Residual	,000	43	,000		
	Total	,000	47			

a. Dependent Variable: Deviations_X

b. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Base_time, Time

е)

а – смола Plexiwire Resin по (X); б – смола Plexiwire Resin по (Y);

в – смола Plexiwire Resin по (Z); г – смола MonoFilament по (X);

д – смола MonoFilament по (Y); е – смола MonoFilament по (Z)

Рисунок 3.22 – Результати розрахунків значимості (ANOVA)

Во всіх випадках значимість (Sig.) менше 0,05, що доводить про вірність попередніх результатів.

Для визначення ваги кожної змінної скористаємося стандартизованими Beta-коефіцієнтом (Standardized Coefficients Beta), які показують на скільки змінюється значення параметра від збільшення на одиницю одного з факторів, рисунок 3.23.

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	,003	,001		3,952	,000			
	Time	,000	,000	,904	20,915	,000	,904	,954	,904
	Base_time	4,167E-5	,000	,123	2,848	,007	,123	,398	,123
	Thickness	3,500E-5	,000	,207	4,785	,000	,207	,589	,207
	Intensity	1,792E-6	,000	,212	4,899	,000	,212	,599	,212

a. Dependent Variable: Deviations_X

a)

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	,003	,001		4,017	,000			
	Time	,000	,000	,900	20,920	,000	,900	,954	,900
	Base_time	4,917E-5	,000	,150	3,481	,001	,150	,469	,150
	Thickness	3,625E-5	,000	,221	5,134	,000	,221	,616	,221
	Intensity	1,646E-6	,000	,200	4,661	,000	,200	,579	,200

a. Dependent Variable: Deviations_Y

б)

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	,001	,000		2,623	,012			
	Time	,000	,000	,891	16,758	,000	,891	,931	,891
	Base_time	2,500E-5	,000	,142	2,666	,011	,142	,377	,142
	Thickness	1,067E-5	,000	,121	2,275	,028	,121	,328	,121
	Intensity	9,750E-7	,000	,221	4,158	,000	,221	,536	,221

a. Dependent Variable: Deviations_Z

в)

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	,001	,001		1,603	,116			
	Time	,000	,000	,889	19,614	,000	,889	,948	,889
	Base_time	4,250E-5	,000	,112	2,467	,018	,112	,352	,112
	Thickness	3,542E-5	,000	,186	4,112	,000	,186	,531	,186
	Intensity	2,604E-6	,000	,274	6,047	,000	,274	,678	,274

a. Dependent Variable: Deviations_X

г)

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	,002	,001		2,446	,019			
	Time	,001	,000	,892	18,213	,000	,892	,941	,892
	Base_time	1,583E-5	,000	,041	838	,407	,041	,127	,041
	Thickness	4,208E-5	,000	,218	4,453	,000	,218	,562	,218
	Intensity	2,188E-6	,000	,227	4,629	,000	,227	,577	,227

a. Dependent Variable: Deviations_Y

д)

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	,001	,000		2,972	,005			
	Time	,000	,000	,909	23,664	,000	,909	,964	,909
	Base_time	1,508E-5	,000	,082	2,122	,040	,082	,308	,082
	Thickness	1,929E-5	,000	,208	5,428	,000	,208	,638	,208
	Intensity	1,135E-6	,000	,245	6,389	,000	,245	,698	,245

a. Dependent Variable: Deviations_Z

е)

а – Plexiwire Resin по (X); б – Plexiwire Resin по (Y);
 в – Plexiwire Resin по (Z); г – MonoFilament по (X);
 д – MonoFilament по (Y); е – MonoFilament по (Z)
 Рисунок 3.23 – 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, формула (3.1).

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+\dots+b_nx_n, \quad (3.1)$$

де Y – фактор відхилення геометричних розмірів топології ДП;

$b_0, b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ – коефіцієнти лінійної регресії впливу параметрів на фактор;

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – параметри впливу на фактор.

Для більшої зручності побудуємо три рівня регресії. Два для кожної марки фотополімерної смоли та одне загальне рівняння. Значення коефіцієнтів відхилень по осях будемо брате середні. В таблиці 3.4 наведені загальні коефіцієнти кореляцій для кожної смоли [34].

Таблиця 3.4 – Загальні коефіцієнти кореляцій

Plexiwire Resin Basic					
№	Параметр	X	Y	Z	Середнє значення коефіцієнта
b_0	Constant	0,003	0,000,03	0,001	0,0023
b_1	Time	0,904	0,9	0,891	0,8983
b_2	Base time	0,123	0,15	0,142	0,1383
b_3	Thickness	0,207	0,221	0,121	0,183
b_4	Intensity	0,212	0,2	0,221	0,211
MonoFilament Basic					
№	Параметр	X	Y	Z	Середнє значення коефіцієнта
b_0	Constant	0,001	0,002	0,001	0,0013
b_1	Time	0,889	0,892	0,909	0,8967
b_2	Base time	0,112	0,041	0,082	0,0783
b_3	Thickness	0,186	0,218	0,208	0,204
b_4	Intensity	0,274	0,227	0,245	0,2486
Загальні коефіцієнти для фотополімерних смол					
№	Параметр	Plexiwire Resin Basic	MonoFilament Basic	Середнє значення коефіцієнта	
b_0	Constant	0,0023	0,0013	0,0018	
b_1	Time	0,8983	0,8967	0,08975	
b_2	Base time	0,1383	0,0783	0,1083	
b_3	Thickness	0,183	0,204	0,1935	
b_4	Intensity	0,211	0,2486	0,2298	

Таким чином отримуємо, що рівняння регресії для фотополімерної смоли марки Plexiwire Resin Basic, буде:

$$Y_{(PB)}=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_4x_4=0,0023+(0,8983 \cdot x_1)+(0,1383 \cdot x_2)+ \\ +(0,183 \times x_3)+(0,211 \times x_4).$$

Рівняння регресії для фотополімерної смоли марки MonoFilament Basic, буде:

$$Y_{(MF)}=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_4x_4=0,0013+(0,8967 \cdot x_1)+(0,0783 \cdot x_2)+ \\ +(0,204 \times x_3)+(0,2486 \times x_4).$$

Загальне рівняння регресії для фотополімерних смоли марок Plexiwire Resin Basic та MonoFilament Basic, буде:

$$Y_{(Загальне)}=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_4x_4=0,0018+(0,8975 \cdot x_1)+(0,1083 \cdot x_2)+ \\ +(0,1935 \times x_3)+(0,2298 \times x_4).$$

3.5 Висновки до розділу 3

В даному розділі були проведені експериментальні дослідження впливу параметрів експонування при 3D-друці на збереження геометричних розмірів моделі. Також було розглянуто вплив цих параметрів при використанні різних марок фотополімерних смол.

Був проведений факторний аналіз фотополімерних смол, з метою обрати найкращі дві марки за їх властивостями. По результатам ці марки смол Plexiwire Resin Basic та MonoFilament Basic.

Розроблено план проведення досліджень за яким була обрана тестова модель для друку та проведена серія дослідів, яка складається з 96 вимірювань по 48 вимірювань на марку смоли.

Отримані результати відхилень розмірів по осях (XYZ), були перевірені на:

- зміні вимірювань в шкалах інтервалу та відносин і мінімальна кількість вимірювань на кожний незалежну;
- відсутність викидів у вимірюваннях;
- нормальний розподіл залишків.

За результатними перевірки можливо сказати, що на основі отриманої вибірки можна проводити подальший регресійний аналіз.

Була побудована та перевірена регресійно-кореляційна модель. Були отримані коефіцієнти кореляцій та рівняння лінійної регресії для кожної з марок фотополімерної смоли та загальне рівняння, за середніми значеннями.

На основі отриманих значень відхилень в процесі проектування моделі внесено зміни до її геометричних розмірів. Це призвело до зниження геометричних відхилень друкованої моделі на 0,0097 мм. Під час експонування фотополімерної смоли Plexiwire Resin Basic та MonoFilament Basic при різних параметрах було зафіксовано загальне зменшення відхилень по осях X, Y і Z. Для Plexiwire Resin Basic відхилення складають відповідно 0,012313 мм (X), 0,012069 мм (Y) та 0,006013 мм (Z). Для MonoFilament Basic відхилення становлять 0,01259 мм (X), 0,012544 мм (Y) та 0,006293 мм (Z).

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці в лабораторії

Розміри приміщення, в якому буде розроблюватися система, складає [35]. Робоче місце складається зі столу, стільця та персонального комп'ютера. В приміщенні працюють 6 чоловік. Площа приміщення складає $42,7 \text{ м}^2$, об'єм – $128,1 \text{ м}^3$. Відповідно до ДСанПіН 3.3.2.007-98, площа на одне робоче місце повинна складати не менше 6 м^2 , об'єм – 20 м^3 . Для даного приміщення робоча площа та об'єм на одну людину відповідає нормам, так як площа на одне робоче місце складає $7,11 \text{ м}^2$, а об'єм – $21,35 \text{ м}^3$. Схема приміщення вказана на рисунку. 4.1.

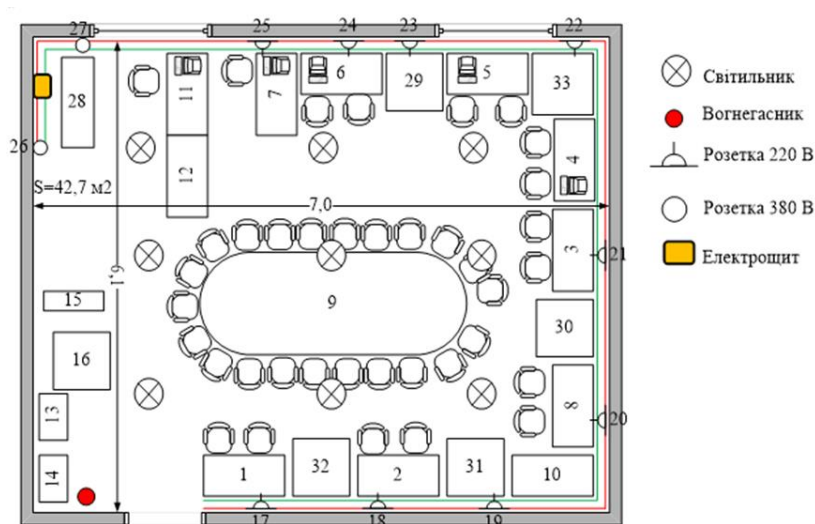


Рисунок 4.1– Схема приміщення

Для розрахунку природного освітлення необхідно визначити площу вікон, що буде забезпечувати нормоване значення КЕО. Далі необхідно зрівняти розраховану площину з реальною [34]. Приміщення має два вікна, які мають розміри $2 \text{ м} \times 1,5 \text{ м}$. Умови праці вважаються нормальними, якщо:

$$S_{\text{вік}} \leq S_{\text{реал}}, \quad (4.1)$$

де $S_{\text{вік}}$ —площа вікон, що розраховується по формулі (4.2);

$S_{\text{реал}}$ —реальне значення площини вікон в приміщенні що становить $6,4 \text{ м}^3$;

$$S_0 = \frac{e_n \eta_0 K_{зд} K_3 S_n}{100 \tau_0 r_1}, \quad (4.2)$$

де S_0 —площа світлових отворів, що забезпечує нормовані значення КЕО в приміщенні;

S_n — площа підлоги приміщення;

$e_{\text{норм}}$ — нормоване значення КЕО для 3-го поясу світового клімату, $e= 0,9$;

η_0 — світлова характеристика вікна;

$K_{\text{буд}}$ — коефіцієнт, що враховує затінення вікон протилежними будівлями, $K=1$;

K_3 —коефіцієнт запасу(залежить від концентрації пилу в приміщенні та від періодичності очищення скла), $K_3= 1,4$;

τ_0 — загальний коефіцієнт світлопропускання, що визначається в залежності від коефіцієнта пропускання скла, втрат світла в оправах вікна, шару забруднення, наявності сонцезахисних конструкцій , $\tau_0 = 0,94$;

r_1 — коефіцієнт, що враховує підвищення КЕО за рахунок відображення.

$$S_0 = \frac{0,9 \cdot 15 \cdot 1 \cdot 1,4 \cdot 42,7}{100 \cdot 0,94 \cdot 1,1} = 7,8 \text{ м}^2. \quad (4.3)$$

Так як $S_{\text{вік}} > S_{\text{реал}}$, то для покращення цього фактора необхідно використовувати штучне освітлення в денний час.

4.2 Промислова безпека в лабораторії

За ступенем небезпеки ураження електричним струмом згідно з НПАОП

40.1-1.21-98, приміщення лабораторія відноситься до класу приміщень без підвищеної небезпеки в яких відсутні умови, що створюють підвищену або особливу небезпеку. Електроживлення здійснюється від трифазної чотирьохдротового змінного струму з напругою 220/380 В, частотою 50 Гц, з глухо заземленої нейтраллю.

Відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.32-01 для електроустановок змінного струму напругою живлення до 1000 В з глухо заземленої нейтраллю застосовується занулення, яке необхідно для забезпечення захисту від ураження електричним струмом у разі непрямого дотику за рахунок зниження напруги корпусу щодо землі і швидкого відключення електроустановки від мережі.

4.3 Виробнича безпека в лабораторії

Згідно ДСН 3.3.6-042-99 робота в лабораторії з ПК по категорії робіт відноситься до легких (категорія Іа – легкі фізичні роботи з енерговитратами до 139 Вт або 120 ккал/ч). Робота ведеться сидячи, не вимагає систематичного фізичного напруження і переміщення важких предметів.

У робочій зоні приміщення згідно з ДСН 3.3.6.042-99 повинні бути встановлені оптимальні значення параметрів мікроклімату. Для категорії робіт Іа в приміщенні повинні підтримуватися наступні параметри мікроклімату:

- температура повітря від 22 °С до 24 °С в теплий період, від 23 °С до 25 °С в холодний період;
- відносна вологість повинна бути в межах від 40% до 60%;
- швидкість руху повітря не повинна перевищувати 0,1 м/с. Для підтримки потрібної температури повітря в лабораторії рекомендується встановити кондиціонер;
- перепад температури повітря по висоті робочої зони при забезпеченні допустимих умов мікроклімату не повинен бути більше 3°С для всіх категорій робіт, а по горизонталі робочої зони та протягом робочої зміни – виходити за межі допустимих температур для даної категорії роботи, вказаних в табл. 4.1.

Згідно ДБН В.2.5-28-2006 в лабораторії застосовується суміщений тип освітлення, рекомендована освітленість від загального рівномірного штучного освітлення при роботі з монітором становить від 300 лк до 500 лк при використанні газорозрядних ламп білого кольору. Коефіцієнт природного освітлення – 1,5 %. Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності за формулою:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (4.4)$$

де W – питома потужність Вт/м²;

S – площа приміщення, $S = 47,2$ м².

Таблиця 4.1 – Допустимі величини температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень

Період року	Категорія робіт	Температура, °С				Відносна вологість (%) на робочих місцях- постійних і непостійних	Швидкість руху (м/сек.) на робочих місцях- постійних і непостійних
		Верхня межа		Нижня межа			
		На постійних робочих місцях	На непостійних робочих місцях	На постійних робочих місцях	На непостійних робочих місцях		
Холодний період року	Легка 1а	25	26	21	18	75	не більше 0,1
	Легка 1б	24	25	20	17	75	не більше 0,2
	Середньої важкості 2а	23	24	17	15	75	не більше 0,3
	Середньої важкості 2б	21	23	15	13	75	не більше 0,4
	Важка 3	19	20	13	12	75	не більше 0,5
Теплий період року	Легка 1а	28	30	22	20	55 – при 28°С	0,2 – 0,1
	Легка 1б	28	30	21	19	60 – при 27°С	0,3 – 0,1
	Середньої важкості 2а	27	29	18	17	65 – при 26°С	0,4 – 0,2
	Середньої важкості 2б	27	29	15	15	70 – при 25°С	0,5 – 0,2
	Важка 3	26	28	15	13	55 – при 24°С і нижче	0,6 – 0,5

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

$$W_{\Sigma} = W_{\text{св}} \cdot \eta_{\text{св}}, \quad (4.5)$$

де $W_{\text{св}}$ – потужність одного світильника, $W_{\text{св}}=72$ Вт;
 $\eta_{\text{св}}$ – кількість світильників в приміщенні, $\eta_{\text{св}}=9$.

$$W_{\Sigma} = 72 \cdot 9 = 648 \text{ Вт.}$$

Розрахунок питомої потужності:

$$W = \frac{648}{47,2} = 13,7 \text{ Вт/м}^2.$$

Питомої потужність $13,7 \text{ Вт/м}^2$ відповідає освітленість більше 300 лк, що задовольняє вимогам ДБН В.2.5.-28-2006.

Згідно ДСН 3.36.037-99 необхідно забезпечити рівень шуму в лабораторії не більше 50 дБ. Забезпечення необхідного рівня шуму досягається акустичної обробкою поверхонь лабораторії.

4.4 Висновки до четвертого розділу

Було проведено аналіз умов праці проводиться для приміщення лабораторії. Побудовано схематичне представлення лабораторного приміщення, що дозволяє проаналізувати вплив шкідливих чинників на організм людини. Було виявлено ступінь ураження електричним струмом. Були встановлені оптимальні параметри мікроклімату в приміщенні. Було розраховано суміщений тип освітлювання.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі були проаналізовані сфери застосування фотополімерного 3D-друку, розглянуті технології SLA, DLP та LCD, їх переваги та недоліки. Зокрема були розглянуті види фотополімерних смол та їх особовості.

За результатами аналізу можливо виділити наступне, що збереження геометричних розмірів моделі при друці на сам перед залежить не тільки від обраної технології друку, а значною мірою від матеріалу для друку (фотополімер).

Основними характеристиками фотополімеру, які впливають на точність виготовлення деталі при 3D-друці є:

- час експонування шару (час дії УФ-випромінювання на фотополімер), с;
- товщина шару, мкм;
- довжина хвилі полімеризації, нм;
- інтенсивність випромінювання, Лм;
- коефіцієнт усадки фотополімеру, %.

Був обраний макет для проведення досліджень Anycubic Photon Mono 4K. Розглянуті його характеристика та особливості. Була описана кінематика та принцип дії даного верстата з ЧПУ (числове програмне управління).

Особлива увага була приділена до його електронній складовій, бо в залежності від роздільної здатності LCD матриці, кількості пікселів та типу джерела УФ-випромінювання, можуть безпосередньо вплив на відхилення геометричних розмірів моделі при друці.

Проведені експериментальні дослідження впливу параметрів експонування при 3D-друці на збереження геометричних розмірів моделі. Також було розглянуто вплив цих параметрів при використанні різних марок фотополімерних смол.

Був проведений факторний аналіз фотополімерних смол, з метою обрати

найкращі дві марки за їх властивостями. По результатам ці марки смол Plexiwire Resin Basic та MonoFilament Basic.

Розроблено план проведення досліджень за яким була обрана тестова модель для друку та проведена серія дослідів, яка складається з 96 вимірювань по 48 вимірювань на марку смоли.

Отримані результати відхилень розмірів по осях (XYZ), були перевірені на:

- зміні вимірювань в шкалах інтервалу та відносин і мінімальна кількість вимірювань на кожний незалежну;
- відсутність викидів у вимірюваннях;
- нормальний розподіл залишків.

За результатними перевірки можливо сказати, що на основі отриманої вибірки можна проводити подальший регресійний аналіз.

Була побудована та перевірена регресійно-кореляційна модель. Були отримані коефіцієнти кореляцій та рівняння лінійної регресії для кожної з марок фотополімерної смоли та загальне рівняння, за середніми значеннями.

По результатам досліджень та отриманої регресійної моделі можливо сказати, що найбільшим параметром який впливає на відхилення геометричних розмірів моделі є час експонування, для кожної осі:

- 0,8983 для смоли Plexiwire Resin Basic;
- 0,8967 для смоли MonoFilament Basic;
- 0,8975 для смоли середній коефіцієнт.

Це свідчить про те що, чим менший час експонування шару тим менше паразитне засвічення та менше відхилення розмірів моделі. Наступними змінними які сильно впливають на відхилення, є: інтенсивність випромінювання, висота шару. Найменш впливовим фактором виявився час експонування базових шарів.

Різниця між коефіцієнтами кореляцій при різних змінних по осях XY та осі Z, пояснюється впливом механічної частини макету, а саме точністю та кроком ходового гвинта і гайки для переміщення платформи.

За рахунок отриманих значень відхилень, на етапі проектування моделі були

внесені зміни до її геометричних розмірів з урахуванням відхилень по кожній осі X, Y, Z що дозволило зменшити геометричні відхилення друкованої моделі на 0,0097 мм (для тестового зразка при часі експонування 10 секунд, висоті шара 0,25 мкм, інтенсивності випромінювання 1600 Лм і часу експонування базових шарів 25 секунд). Загальне зменшення відхилень при різних параметрах експонування фотополімерної смоли Plexiwire Resin Basic:

- по осі X – 0,012313 мм;
- по осі Y – 0,012069 мм;
- по осі Z – 0,006013 мм.

Загальне зменшення відхилень при різних параметрах експонування фотополімерної смоли MonoFilament Basic:

- по осі X – 0,01259 мм;
- по осі Y – 0,012544 мм;
- по осі Z – 0,006293 мм.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Невлюдов І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипченко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ. 2019. 366 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. Филипченко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.

3. I.Sh. Nevliudov, V.M. Borshchov, I.T. Tymchuk, M.A. Protsenko, N.P. Demska / Novitni konstruktyvno-tekhnologichni rishennia nadlehkykh detektornykh moduliv dlia fizychnykh eksperymentiv // Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2018. No. 5 (3). – S. 67-78

4. Alfred Jacobsen, Trond Jorgensen, Øyvind 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

5. 3D printing. A Practical Guide / Redwood Ben, Garrat Brian, Chauffeur Philemon. - М. : DMK-Press, 2020 .-- 220 p.

6. Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucke (2015) Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer New York Heidelberg Dordrecht London. ISBN 978-1-4939-2112-6 ISBN 978-1-4939-2113-3 (eBook). DOI 10.1007/978-1-4939-2113-3.

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

8. DLP (Digital Light Processing) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.jetcom-3d.ua/technology/digital-light-processing/> - 02.12.2023 г. – Загол. з экрана.

9. 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.

10. Modern photopolymer printers 3D printers: laser, DLP, LCD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dtoday.ua/blogs/pl32/modern-photopolymer-3d-printersprinters-laser-dlp-lcd> - 02.12.2023 г. – Загол. з экрана.

11. Anycubic 405nm UV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dreams.com.ua/product/фотополимерная-смола-anycubic-405nm-uv-resin/> - 02.12.2023 г. – Загол. з экрана.

12. Plexiwire Resin Basic Orange Transparen LCD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://shop.plexiwire.com.ua/ru/basic-resin/resin-orange-transparent-500/> - 02.12.2023 г. – Загол. з экрана.

13. MonoFilament Basic [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://monofilament.com.ua/ua/products/fotopolimernie-smoli-dlya-3d-printera/resin-basic/> - 02.12.2023 г. – Загол. з экрана.

14. FunToDo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.funtodo.net> - 02.12.2023 г. – Загол. з экрана.

15. Wanhao Castable [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wanhao.store/products/wanhao-castable-resin-for-jewelry-green-color-1000ml-bottle> - 02.12.2023 г. – Загол. з экрана.

16. BlueCast CR3A [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.uvelirmag.com/3d-printery-i-polimery/bluecast-cr3a-for-lcddlp-3dp/> - 02.12.2023 г. – Загол. з экрана.

17. Elegoo 3D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elegoo.com/collections/resin> - 02.12.2023 г. – Загол. з экрана.

18. Weistek [Электронный ресурс]. – Режим

доступу:<https://www.amazon.com/Standard-UV-Curing-Precision-Photopolymer-Printing/dp/B08L6P5PNK> - 02.12.2023 р – Загол. з екрана.

19. Tevo [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3ddevice.com.ua/product/smola-dlia-3d-printera-nextdent-base/> - 02.12.2023 р – Загол. з екрана.

20. FunToDo CB [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dprinter.ua/shop/funtodo-cb-resin-dlp/> - 02.12.2023 р – Загол. з екрана.

21. MakerJuice WaxCast [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3ddevice.com.ua/product/fotopolimer-makerjuice-waxcast/> - 02.12.2023 р – Загол. з екрана.

22. Anycubic Dental (Skin) Non - Castable [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://prom.ua/p1439969120-stomatologicheskaya-zuboproteznaaya-modelnaya>. 02.12.2023 р – Загол. з екрана.

23. Anycubic 405nm UV resin, ECO [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dreams.com.ua/product/-anycubic-uv-resin/> - 02.12.2023 р – Загол. з екрана.

24. Anycubic Photon Mono 4K [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.anycubic.com/products/photon-mono-4k> - 02.12.2023 р – Загол. з екрана.

25. Різбовий вал Т8*2мм [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uareprap.store/T8-2mm?_route_=T8-2mm - 02.12.2023 р – Загол. з екрана.

26. Лінійна рельсова напрямна MGN12 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3ddevice.com.ua/product/lineinaya-npravliayushaia-mgn12/> - 02.12.2023 р – Загол. з екрана.

27. Кроковий двигун 17HS3430 1.2 А 0.28 N. М [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cnc.prom.ua/ua/p442128379-shagovuj-dvigatel-17hs3430.html> - 02.12.2023 р – Загол. з екрана.

28. Материнская плата Anycubic Photon Mono V0.05 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dreams.com.ua/product/-anycubic-photon-mono/> - 02.12.2023 р – Загол. з екрана.

29. LCD матриця Anycubic Photon Mono 4K [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://violadent.com/cifrovaya-stomatologiya/zapchasti-i-aksessuary-dlya-3d-printerov/623-dyujma-4k-lcd-dlya-photon-mono-4k/> - 02.12.2023 р – Загол. з екрана.
30. Світлодіодна матриця ParaLED [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pro3d.com.ua/p1005708062-svitlodiodna-matritsya-dlya.html> - 02.12.2023 р – Загол. з екрана.
31. Сенсорний дисплей MKS TFT24 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dprinter.ua/shop/sensornyj-displej-mks-tft24/> - 02.12.2023 р – Загол. з екрана.
32. SPSS Statis for Dumlmies, 4th Edition /by Jesus Salcedo and Keith McCormick.[Book]. Published by: John&Sons.Inc. 2020. P. 444.
33. Statistical Methods in Psychiatry Research and SPSS. 2nd Edition./ ByM. Venkataswamy Reddy. [Book]. Apple Academic Press. 2019. P.442. <https://doi.org/10.1201/9780429023309>
34. E.V. Korotun, D.O. Nikitin. Factor analysis of photopolymer resins for 3D printing // Collection of Students' Scientific Paper «Automation and Development Of Electronic Devices» ADED-2023 Part 1 (Key infrastructure 2023) – Kharkiv / The Editorial.: Nevlyudov I.Sh. (head), that all. Kharkiv: Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics [electronic edition], 2023. – 336 p.
35. Дзюндзюк Б. В. Охорона праці. Збірник задач: навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2006. – 236 с.