

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий цент заочної форми навчання  
(повна назва)

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

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

Розроблення системи автоматизації для підвищення якості фотополімерних  
друкованих виробів на етапі постобробки  
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,  
групи КІТПВзм-24-1

Денис АНІСІФОРОВ

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 174 Автоматизація та комп'ю-  
терно-інтегровані технології та робототехніка  
(код і повна назва спеціальності)

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

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

Керівник проф. Анатолій АНДРУСЕВИЧ  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ

(прізвище, ініціали)

Харків 2025

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

23 грудня 2025 р.

Денис АНІСІФОРОВ

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ННЦ \_\_\_\_\_ заочної форми навчання \_\_\_\_\_  
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_  
Спеціальність 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані та технології  
робототехніка \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)  
Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_ (підпис)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Анісіфорову Денису Олеговичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованого управління температурою при екструзії полімерного матеріалу в процесі тривимірного друку

Затверджена наказом університету від 03.11.2025 р. №192 Стз

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

3. Вихідні дані до роботи: \_\_\_\_\_

3.1 довжина хвилі засвітки від 100 нм до 400 нм;

3.2 напруга живлення 220 В;

3.3 технологія постобробки після DLP друку.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: \_\_\_\_\_

4.1 Вступ;

4.2 Технології фотополімерного 3D друку;

4.3 Технології постобробки деталей;

4.4 Розробка макету для проведення досліджень;

4.5 Експериментальні дослідження;

4.6 Охорона праці;

4.7 Висновки.

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

---

---

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

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		під пис	да Та

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір матеріалів для проведення розробки	12.09.2025	виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	24.09.2025	виконано
3	Розробка розділу «Аналіз предметної області»	5.10.2025	виконано
4	Розробка розділу «Розроблення макету»	15.10.2025	виконано
5	Розробка розділу «Проведення дослідження»	16.11.2025	виконано
6	Оформлення кваліфікаційної роботи	20.12.2025	виконано
7	Подання роботи до нормоконтролю	21.12.2025	виконано
8	Подання роботи на перевірку академічної доброчесності	22.12.2025	виконано
9	Подання у ЕК	24.12.2025	виконано

Дата видачі завдання 27.08.2025 р.

Здобувач

\_\_\_\_\_ (підпис)

Денис АНІСІФОРОВ

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

проф. Анатолій АНДРУСЕВИЧ

(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 78 с., 5 табл., 37 рис., 3 дод., 20 джерел.

### АВТОМАТИЗАЦІЯ ПОСТОБРОБКИ, КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ, УЛЬТРАФІОЛЕТОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ФОТОПОЛІМЕРНА СМОЛА, DLP-ДРУК

Об'єкт дослідження – процес постполімеризації фотополімерних виробів після друку.

Предмет дослідження – методи, режими та технічні засоби постполімеризаційної обробки фотополімерних матеріалів.

Мета роботи – підвищення механічних характеристик виробів, отриманих за технологією DLP-3D-друку, шляхом розроблення та дослідження автоматизованої системи постполімеризаційної обробки.

У роботі розглянуто процес постобробки виробів, надрукованих методом фотополімерного 3D-друку. Проведено аналіз сучасних технологій адитивного виробництва (SLA, DLP, LCD), визначено особливості їх роботи, вимоги до процесів промивання та полімеризації, а також досліджено наявні на ринку УФ-камери та їх конструктивні недоліки.

У другому розділі розроблено механічну конструкцію камери,. Обґрунтовано вибір електронних компонентів. Наведено електричну схему підключення та описано принципи взаємодії між модулями.

У третьому розділі здійснено експериментальні дослідження впливу режимів друку і параметрів засвітки на термічну стійкість фотополімерних виробів. Побудовано план експерименту, виконано аналіз отриманих результатів та встановлено залежності між технологічними параметрами і властивостями моделі.

## РЕФЕРАТ

Explanatory note: 78 p., 5 tabl., 37 fig., 3 app., 20 sources.

DLP PRINTING, PHOTOPOLYMER RESIN, POST-PROCESSING  
AUTOMATION, QUALITY CONTROL, ULTRAVIOLET RADIATION.

The object of the study is the process of post-polymerization of photopolymer products after printing.

The subject of the study is methods, modes and technical means of post-polymerization processing of photopolymer materials.

The purpose of the work is to improve the mechanical characteristics of products obtained using DLP-3D printing technology by developing and researching an automated post-polymerization processing system.

The work considers the process of post-processing of products printed using photopolymer 3D printing. An analysis of modern additive manufacturing technologies (SLA, DLP, LCD) was conducted, the features of their operation, requirements for washing and polymerization processes were determined, and UV cameras available on the market and their design shortcomings were also investigated.

In the second section, the mechanical design of the camera is developed. The choice of electronic components is justified. The electrical connection diagram is given and the principles of interaction between the modules are described.

In the third section, experimental studies of the influence of printing modes and lighting parameters on the thermal stability of photopolymer products are carried out. An experimental plan is built, the results obtained are analyzed and the dependencies between technological parameters and model properties are established.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз предметної області.....	12
1.1 Технології фотополімерного 3D-друку.....	12
1.2 Пост обробка фотополімерних виробів .....	16
1.3 Аналіз аналогів.....	19
1.4 Висновки до першого розділу .....	25
2 Розроблення макету для експериментальних досліджень .....	27
2.1 Розробка макету .....	27
2.2 Обґрунтування вибору електричних компонентів .....	32
2.3 Розробка електричної складової макету .....	39
2.4 Висновки до другого розділу.....	433
3 Проведення дослідження впливу параметрів друку на термічну стійкість виробу .....	45
3.1 Побудова плану експерименту .....	45
3.2 Проведення емпіричних досліджень .....	52
3.3 Побудова регресійно-кореляційної моделі .....	56
3.4 Охорона праці .....	59
3.5 Висновки до третього розділу .....	61
Висновки .....	63
Перелік джерел посилання .....	65
Додаток А Лістинг програми для Arduino.....	68
Додаток Б Результати дослідження.....	74

Додаток В Демонстраційний матеріал.....	76
---	----

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

УФ – ультрафіолет;

DLP – Digital Light Processing;

SLA – Stereolithography Apparatus;

LCD – Liquid Crystal Display.

## ВСТУП

Широке впровадження технологій адитивного виробництва у промисловість, медицину, дизайні та наукових дослідженнях зумовило зростання попиту на високоточні й технологічно відтворювані методи формування полімерних виробів. Одним із найбільш перспективних напрямів у цьому контексті є 3D-друк фотополімерними смолами, зокрема за технологіями SLA, DLP та LCD. Дані технології забезпечують високу роздільну здатність, точність відтворення геометрії та якість поверхні виготовлених моделей, що суттєво розширює можливості їх практичного застосування.

Однак незалежно від конкретної технології друку фотополімерні вироби одразу після вилучення з робочої платформи мають незавершений ступінь полімеризації. У процесі формування моделі кожен шар засвічується протягом відносно короткого проміжку часу (як правило, 2–3 с), чого достатньо для фіксації геометрії, але недостатньо для досягнення необхідних механічних характеристик. Внаслідок цього надруковані вироби потребують додаткової постполімеризаційної обробки, яка полягає у промиванні залишків незатверділої смоли та подальшому УФ-допроміненні.

Якість і коректність виконання постобробки безпосередньо впливають на кінцеву міцність, твердість, термостійкість та стабільність геометричних параметрів виробів. Існуючі промислові та побутові системи постполімеризації, представлені на ринку, орієнтовані на вирішення цих задач, проте часто мають низку недоліків: високу вартість, обмежену функціональність, недостатню можливість налаштування параметрів процесу та відсутність автоматизації. Це ускладнює їх використання для проведення наукових досліджень та оптимізації режимів постобробки.

У зв'язку з цим актуальною є розробка власної автоматизованої системи постобробки виробів фотополімерного 3D-друку, яка дозволить підвищити якість полімеризації, забезпечити повторюваність результатів та дослідити вплив

технологічних параметрів на властивості матеріалу. Особливу увагу у науковій і практичній площині привертають питання автоматизованого контролю режимів УФ-опромінення, рівномірності засвітки внутрішнього об'єму камери та впливу тривалості й температури постполімеризації на кінцеву твердість виробів.

Мета роботи – підвищення механічних характеристик виробів, отриманих за технологією DLP-3D-друку, шляхом розроблення та дослідження автоматизованої системи постполімеризаційної обробки.

Об'єкт дослідження – процес постполімеризації фотополімерних виробів після друку.

Предмет дослідження – методи, режими та технічні засоби постполімеризаційної обробки фотополімерних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- здійснити аналіз технологій фотополімерного 3D-друку та методів постобробки;
- провести огляд існуючих технічних рішень камер УФ-допромінення та визначити їх переваги й недоліки;
- розробити конструкцію та електронну складову макету автоматизованої камери постполімеризації;
- виконати експериментальні дослідження впливу параметрів постобробки на твердість фотополімерних зразків;
- побудувати регресійно-кореляційну модель для визначення оптимальних режимів постполімеризації;
- оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також з методичними вказівками з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка [2].

## 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

### 1.1 Технології фотополімерного 3D-друку

На сучасному етапі розвитку адитивних технологій значне поширення отримали методи виготовлення виробів із фотополімерних матеріалів. Такі технології забезпечують високу точність, деталізацію поверхні та стабільність геометричних параметрів, що робить їх одними з найефективніших для прототипування та дрібносерійного виробництва. Особливо актуальним є використання фотополімерних технологій у галузях медицини, ювелірного виготовлення, машинобудування та виготовлення формоутворювальних елементів.

Загалом фотополімерні 3D-принтери працюють на принципі пошарового затвердіння рідкої смоли під дією оптичного випромінювання [3]. Серед різноманіття методів засвічування фотополімерів виділяють три основні технології, які суттєво різняться за принципом формування зображення, конструкцією обладнання та режимами експлуатації:

- SLA – стереолітографія;
- DLP – цифрова обробка світлом;
- LCD – засвічування через LCD-маску.

На рисунку 1.1 наведено класифікацію основних технологій фотополімерного 3D-друку.

Технологія SLA . Стереолітографія є однією з перших промислових адитивних технологій, що ґрунтується на локальному затвердінні тонкого шару фотополімерної смоли вузьким променем УФ-лазера.

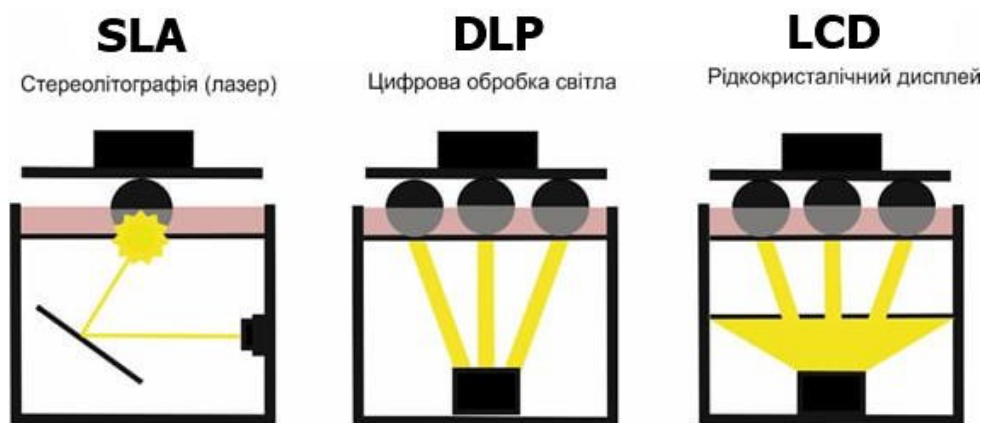


Рисунок 1.1 – Види фотополімерних технологій 3D друку

У робочій камері принтера знаходиться ванна зі смолою та рухома платформа, яка після формування кожного шару опускається на задану товщину (зазвичай 10–150 мкм). Лазерний промінь, керований системою відхилення (галво-сканерами), вибірково полімеризує матеріал, формуючи геометрію шару відповідно до цифрової моделі рисунок 1.2 [4].

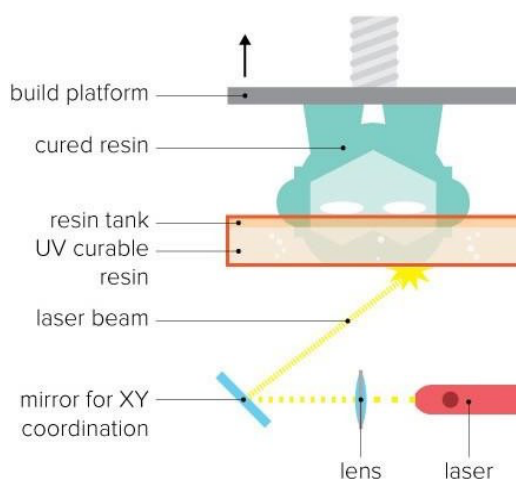


Рисунок 1.2 – Схема роботи SLA принтера

До переваг SLA належать:

- висока точність та деталізація;
- можливість виготовлення виробів складної геометрії;
- низький рівень шуму та висока повторюваність результатів;

- мінімальні втрати матеріалу.

Недоліками є:

- висока вартість обладнання;
- чутливість системи до налаштування оптики та механіки;
- тривалість обслуговування;
- використання дорогих фотополімерних смол.

Лазерний промінь, керований галво-сканерами, дозволяє досягати тонких ліній засвітки та високої деталізації. Товщина шару зазвичай знаходиться в межах 20–150 мкм, що дає змогу відтворювати дрібні геометричні елементи та складні поверхневі структури.

Процес включає послідовність етапів:

- нанесення тонкого шару смоли на поверхню;
- вибіркове затвердіння фотополімеру лазерним променем;
- переміщення платформи вздовж осі Z;
- повторення операції до формування повної моделі.

DLP-принтери працюють на основі цифрових мікродзеркальних матриць (DMD), які складаються з тисяч мікроскопічних дзеркал. Кожне дзеркало відповідає одному пікселю зображення та може відхиляти світловий потік на фотополімер або поза ним. На відміну від SLA, у DLP формується весь шар одночасно, що значно підвищує швидкість друку, рисунок 1.3[5].

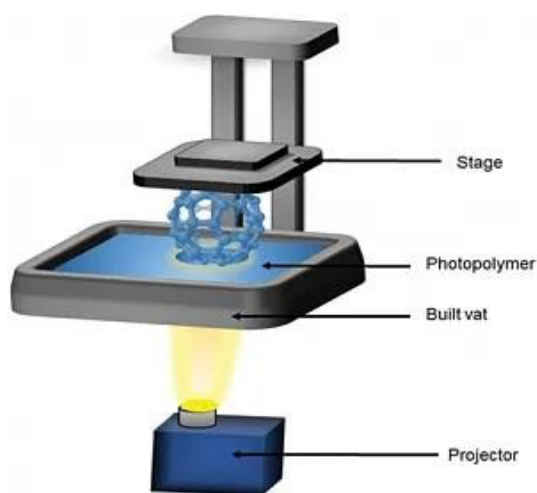
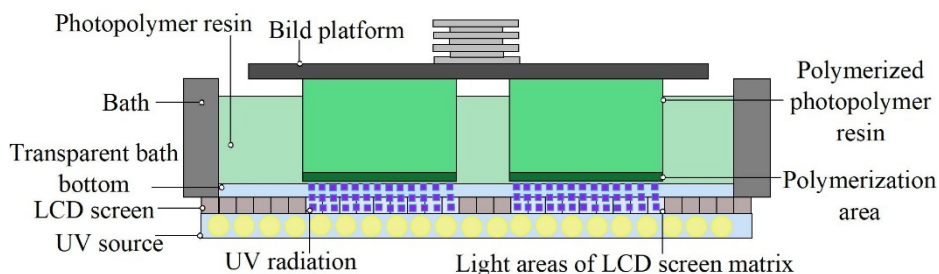


Рисунок 1.3 – Схема роботи DLP принтера

Висока інтенсивність світлового потоку дозволяє швидко затверджувати фотополімер, а фіксована кількість пікселів на матриці забезпечує чіткість і стабільність геометрії. Завдяки цим властивостям DLP-технологія є ефективною для виготовлення моделей, що вимагають одночасно високої точності та швидкості.

Втім, така методика теж має свої недоліки. Якість друку обмежується фізичною роздільною здатністю DMD-матриці: зі збільшенням площі робочої області зростає і розмір пікселя, що може призводити до так званого «ефекту пікселізації». Крім того, проєкційна система має складну оптичну конструкцію та потребує значної відстані між проєктором і ванною, що збільшує габарити обладнання. Вартість якісних мікродзеркальних проєкторів залишається високою, що впливає на загальну економічну доцільність технології[6].

LCD-технологія передбачає використання УФ-світлодіодної матриці як джерела випромінювання та рідкокристалічного дисплея як маски, що пропускає або блокує світло у відповідності до шару моделі? **рисунок 1.4**



**Рисунок 1.4 – Схема роботи LCD принтера**

У цій технології світло від УФ-світлодіодної матриці проходить через LCD-панель, що виконує роль маски. Завдяки цьому формується шар моделі, який твердне одночасно по всій площині. Використання сучасних монохромних екранів високої роздільної здатності дозволяє отримувати деталізацію, співставну з DLP, а інколи навіть вищу для малих моделей. Рівномірність засвітки та простота конструкції роблять LCD-технологію привабливою для прототипування, навчальних цілей та малосерійного виробництва.

Проте LCD-принтери мають низку обмежень, що слід враховувати. Розмір

робочої області безпосередньо залежить від фізичного розміру екрану, і збільшення діагоналі призводить до збільшення розміру пікселя, що знижує роздільну здатність. LCD-панелі мають обмежений ресурс через постійний вплив УФ-випромінювання, а їхня близькість до фотополімерної ванни створює ризик пошкодження у разі протікання. Теплове навантаження також є критичним фактором, оскільки інтенсивна робота світлодіодної матриці потребує якісної системи охолодження.

Аналіз методів фотополімерного друку дозволяє зробити висновок, що всі три технології мають свої особливості та сфери застосування. Найбільший розвиток наразі спостерігається у сегменті LCD-принтерів, що зумовлено їх доступністю, простотою конструкції та можливістю масштабування. Водночас ключовим недоліком усіх технологій залишається незавершеність фотополімеризації моделі після формування, що обумовлює необхідність подальшої постобробки.

## 1.2 Пост обробка фотополімерних виробів

Постобробка є невід'ємною складовою технологічного циклу фотополімерного 3D-друку, оскільки незалежно від способу засвічування смоли – SLA, DLP чи LCD – формування шару під час друку забезпечує лише часткову полімеризацію матеріалу. Засвітка, яка триває декілька секунд, достатня для фіксації геометрії моделі, але не забезпечує завершення хімічного утворення полімерної сітки. Як наслідок, одразу після друку матеріал має підвищену еластичність, дефіцит міцності, підвищену чутливість до механічних навантажень і може містити залишкові рідкі компоненти, зокрема незреаговані мономери. Такий стан не дозволяє виробам бути готовими до експлуатації, тому процес постполімеризації є обов'язковим.

У типовому випадку постобробка включає дві основні стадії: промивання моделі від залишків незатверділої смоли та подальше УФ-допромінення. Перша стадія відіграє критичну роль у забезпеченні рівномірності засвітки під час другої,

оскільки залишки смоли можуть утворювати липкі ділянки, затримувати світло та створювати нерівномірність полімеризації. Для промивання зазвичай застосовують ізопропіловий спирт або спеціальні очисні суміші, які ефективно розчиняють незатверділі компоненти. Якість промивання визначає, наскільки модель буде чистою, а її поверхня – підготовленою до подальшої полімеризації.

Після промивання модель, як правило, залишається у стані часткової полімеризації. На цьому етапі її механічні характеристики залишаються недостатніми для використання у реальних умовах. Матеріал має певну залишкову липкість, а структура приповерхневих та внутрішніх шарів ще не досягла стабільної просторової сітки. Для переходу смоли у повністю затверділий стан необхідно провести додаткову засвітку ультрафіолетовим випромінюванням. Цей процес отримав назву постполімеризації або УФ-допромінення.

Рівномірність УФ-випромінювання є найважливішим параметром, який визначає якість постобробки. Часткова затемненість, тіні, нерівномірність інтенсивності світла або віддаленість джерела випромінювання від моделі можуть спричинити неоднорідність властивостей виробу. У місцях, де світло було недостатньо інтенсивним чи діяло непропорційно, матеріал залишається недополімеризованим, що призводить до зниження міцності, появи внутрішніх напружень і передчасного руйнування моделі. Тому сучасні камери постполімеризації проектуються таким чином, щоб забезпечити максимальну рівномірність засвітки всіх ділянок виробу, незалежно від його геометрії.

Одним з факторів, що впливають на якість постполімеризації, є внутрішні оптичні характеристики камери. Використання дзеркальних або фольгованих поверхонь дозволяє розсіювати та перенаправляти світло таким чином, щоб мінімізувати тіньові ділянки. За рахунок цього інтенсивність випромінювання, яке досягає поверхні моделі, стає рівномірнішою. Наявність таких відбивальних матеріалів особливо важлива у компактних камерах, де відстань між джерелом світла та виробом є невеликою.

Тривалість УФ-допромінення залежить від типу фотополімеру, товщини стінок моделі та спектральної чутливості фотоініціаторів. Більшість сучасних

смола реагують на діапазон від 365 до 405 нм, що визначає конструкцію джерел світла у постполімеризаційних камерах. Недостатня тривалість освітлення призводить до часткової полімеризації, тоді як надмірна – до появи крихкості, зміни кольору, перегріву матеріалу чи деформацій. Це робить вибір часу полімеризації одним із ключових технологічних параметрів, який повинен бути контрольованим та повторюваним.

Ще одним важливим аспектом постобробки є вплив температури[7]. У процесі УФ-допромінення матеріал може нагріватися, що додатково впливає на швидкість реакції полімеризації. Помірне підвищення температури може прискорювати формування полімерної сітки, однак перегрів призводить до нерівномірності затвердіння або появи внутрішніх залишкових напружень. Тому деякі камери додатково обладнуються системами температурного контролю або вентиляції.

Особливості конструкції обладнання для постобробки безпосередньо впливають на якість кінцевого виробу. Для досягнення рівномірності засвітки модель часто розташовують на обертовій платформі, що забезпечує безперервну зміну її просторового положення. Це дозволяє компенсувати нерівномірності світлового потоку та значно підвищує однорідність полімеризації.

Тому можна стверджувати що, ефективність постобробки визначається поєднанням трьох ключових компонентів: якості промивання моделі, інтенсивності та рівномірності УФ-випромінювання та дотримання відповідного температурного режиму. Від цих параметрів залежить твердість, міцність, точність та термостійкість виробів, отриманих на фотополімерних принтерах. Оскільки наявні побутові та бюджетні камери постполімеризації не завжди забезпечують належну рівномірність засвітки, керованість параметрів або можливість проведення експериментальних досліджень, проблема розроблення спеціалізованої автоматизованої установки постає як технологічно важлива та актуальна. Саме таке обладнання дозволяє отримати стабільні результати, оптимізувати режим постобробки та підвищити механічні характеристики готових деталей.

## 1.3 Аналіз аналогів

### 1.3.1 Wanhao Voxman

Існуючі на ринку камери постполімеризації виробів фотополімерного 3D-друку відрізняються за конструкцією, принципом розподілу світлового потоку та рівнем можливостей щодо контролю технологічних параметрів. Попри те, що більшість таких пристроїв мають схожу зовнішню структуру, ефективність їх роботи визначається внутрішньою геометрією, способом розміщення джерел ультрафіолетового випромінювання та якістю відбивальних поверхонь. На рисунку 1.5 наведено один з прикладів камери, яка використовується разом із настільними фотополімерними принтерами.



Рисунок 1.5 – Wanhao Voxman [8]

Технічні характеристики:

- довжина хвилі: 405 нм;
- площа засвітки: 320 мм × 200 мм × 200 мм;
- розмір кулера: 85 мм × 85 мм × 10 мм;
- застосування: для готових надрукованих виробів;
- дисплей: дюймовий сенсорний;
- екран для спостереження: 150 мм × 60 мм;
- гарантія роботи лампи: 2000 годин;
- габарити камери: 430 мм × 300 мм × 360 мм;

- напруга: 24 В;
- потужність: 200 Вт;

Найпоширенішим типом є компактні камери зі стаціонарними УФ-світлодіодами, розташованими вздовж внутрішніх стінок корпусу. Внутрішня поверхня таких камер зазвичай виконана з відбивального матеріалу, який покликаний покращувати рівномірність засвітки за рахунок багаторазового відбиття світла. Однак точність постполімеризації у таких конструкціях значною мірою залежить від форми та положення виробу. Локальні перепади інтенсивності, які виникають через нерівномірність розміщення світлодіодів, можуть спричинити зони недостатнього затвердіння, що негативно позначається на механічних властивостях моделі. Унаслідок цього подібні камери забезпечують прийнятну якість лише для невеликих або простих за геометрією виробів.

### 1.3.2 Anycubic Wash Cure

Поширеним рішенням є камери з обертальною платформою, приклад якої наведено на рисунку 1.6.



Рисунок 1.6 – Anycubic Wash Cure [9]

Обертання моделі дозволяє компенсувати нерівномірності світлового потоку та зменшує вплив тіньових зон, що утворюються у конструкціях зі стаціонарними джерелами. Завдяки плавному повороту зразка відносно джерел

випромінювання покращується загальна рівномірність засвітки, а процес полімеризації стає менш чутливим до орієнтації моделі. Водночас ефективність таких камер усе ще залежить від геометрії внутрішнього простору та характеристик відбивальних поверхонь. Якщо світлодіодні модулі розташовані нерівномірно або мають різну інтенсивність випромінювання, навіть обертання не повністю усуває різницю у ступені затвердіння матеріалу.

Технічні характеристики:

- розміри, мм: 225 мм × 220 мм × 378 мм;
- вага: 6 кг;
- максимальний розмір заготовки для мийки: 115 мм × 65 мм × 165
- максимальний розмір заготовки для засвітки: 140 мм × 165 мм;
- температура у камері: 60 градусів;
- дисплей: Touchscreen;
- довжина хвилі випромінювання: 405 нм.

Пристрій призначений для автоматизованого промивання та подальшого затвердіння зразків, надрукованих на фотополімерних 3D-принтерах. Ці два етапи технологічного циклу є конструктивно розділеними, тому у приладі передбачено окремі режими роботи для промивання та для УФ-допромінення. У результаті постобробки виріб набуває завершених механічних характеристик: стає міцним, стійким до механічних навантажень та, водночас, візуально привабливим. Після затвердіння поверхня виглядає гладкою, рівномірною та естетично обробленою.

У першу чергу пристрій орієнтований на взаємодію з виробами, виготовленими на принтерах серії Anycubic Photon, проте конструкція дозволяє застосовувати його і для моделей, надрукованих на інших фотополімерних 3D-принтерах, що використовують аналогічні смоли. Загальна маса установки становить 6 кг, а габаритні розміри – 225 × 220 × 378 мм. Максимальний розмір виробу, який можна промити у штатній ємності, становить 115 × 65 × 165 мм, а граничний розмір об'єкта для УФ-затвердіння – 140 × 165 мм. Для більшості моделей, що друкуються на побутових принтерах, таких параметрів цілком достатньо, хоча на ринку існують окремі принтери зі збільшеною робочою

областю, для яких обсяг камери може бути обмежувальним.

Тривалість промивання та затвердіння становить 2, 4 або 6 хвилин. Користувач не задає цей параметр вручну – замість цього він обирає один із попередньо визначених режимів. Це важливо з погляду технологічної безпеки, оскільки надмірно тривале перебування моделі у спиртовмісному розчині може спричинити небажаний запах, а також вплинути на поверхневі властивості матеріалу. Під час УФ-затвердіння модель розміщується на обертовій платформі, що забезпечує рівномірний розподіл світла по всіх ділянках поверхні. У процесі полімеризації на зразок діє ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі від 365 нм до 405 нм, що гарантує сумісність приладу з більшістю сучасних фотополімерів.

Для забезпечення безпеки конструкція оснащена механізмом блокування: якщо під час роботи кришка буде відкрита або зміщена, пристрій негайно припинить функціонування, що запобігає випадковому впливу УФ-випромінювання на користувача.

Ємність для промивання є герметичною, що дозволяє зберігати очищувальну рідину без необхідності її постійної заміни. Розчин можна використовувати багаторазово, що робить експлуатацію більш економічною. Під час занурення зразка висоту його розташування можна відрегулювати таким чином, щоб забезпечити повне покриття рідиною. Це особливо корисно для складних моделей або виробів з великою кількістю підтримувальних структур, адже повне занурення дозволяє суттєво покращити якість промивки.

Варто зазначити, що розвиток сучасних слайсерів дає змогу оптимізувати кількість та розташування підпірок, завдяки чому потреба у тривалому промиванні зменшується, хоча цілком не зникає. Особливо це стосується тонких або складних моделей, де сліди підтримувальних елементів є численними.

Конструкція пристрою відрізняється простотою та логічністю. Корпус обладнаний захистом від ультрафіолету, що блокує до 99 % зовнішнього УФ-випромінювання, забезпечуючи безпечну експлуатацію. Кришка містить датчик, який визначає її положення та гарантує, що світло не виходитиме за межі

робочої зони. Стан процесу затвердіння відображається на вбудованій LCD-панелі. На корпусі розташовані панель керування, кнопка увімкнення та роз'єм для під'єднання адаптера живлення. Для запобігання перегріванню передбачено вентилятор охолодження.

Окремим елементом комплекту є підшипник, що забезпечує плавне обертання ємності для промивання. Оскільки з часом ця деталь зношується, її рекомендовано періодично замінювати.

### 1.3.3 Phrozen Cure V2

Ультрафіолетова камера Phrozen Cure V2, зображена на рисунку 1.7, виконана у білому металевому корпусі з напівпрозорим червоним тонованим вікном на фронтальній панелі. Це вікно не лише дозволяє спостерігати за перебігом процесу затвердіння, а й виконує захисну функцію, блокуючи ультрафіолетове випромінювання. Конструкція пристрою оформлена у характерному для продукції Phrozen стриманому, лаконічному дизайні, що надає камері сучасного та технологічного вигляду. За зовнішнім виглядом і якістю виконання корпусу Phrozen Cure V2 часто порівнюють зі станцією Anycubic Wash & Cure, і у багатьох відгуках саме модель від Phrozen відзначається як більш приваблива та акуратна. За габаритами камера дещо менша, ніж принтер Phrozen Sonic Mini, а блок живлення розміщено під основою корпусу та зафіксовано металевим кронштейном.



Рисунок 1.7 – Phrozen Cure V2 [10]

Технічні характеристики пристрою відповідають вимогам до сучасних камер постполімеризації. Габарити Phrozen Cure V2 становлять 200 мм × 215 мм × 300 мм, маса – 4,2 кг. УФ-випромінювання здійснюється на довжині хвилі 405 нм, тоді як робоча зона засвічення має розмір 180 мм × 200 мм × 200 мм, що забезпечує можливість обробки моделей середнього розміру. Пристрій оснащений обертальною платформою та LED-джерелами світла, а живлення від мережі здійснюється при напрузі 240 В і частоті 60 Гц [11].

Платформа всередині камери приводиться в рух компактним мотором, розташованим у центральній частині конструкції. Розміщення світлодіодів уздовж бічних стінок і на верхній панелі формує рівномірне світлове поле, що дозволяє освітлювати модель з усіх напрямків. Така структура внутрішнього простору значною мірою покращує однорідність постполімеризації порівняно з камерами, у яких джерела світла зосереджені лише з одного боку. Передні дверцята камери відкриваються вперед і утримуються магнітом, який водночас виконує функцію датчика безпеки: при будь-якому відкриванні дверцят під час роботи пристрій негайно припиняє засвічення, запобігаючи впливу ультрафіолетового випромінювання на користувача.

У процесі затвердіння модель помітно нагрівається, що зумовлено типовою екзотермічною реакцією, яка відбувається у фотополімерах під час остаточної полімеризації. Робота пристрою контролюється за допомогою п'яти кнопок, розташованих на передній панелі. Користувач може встановлювати тривалість засвічення у секундах або хвилинах за допомогою кнопок «S» та «M». Загальне керування вмиканням, вимиканням та паузою здійснюється фіолетовою кнопкою. Інтерфейс управління є простим та інтуїтивно зрозумілим, хоча деяким користувачам може здатися надмірно гучним звуковий сигнал, що супроводжує перемикання режимів.

Серед конструктивних характеристик Phrozen Cure V2 варто відзначити ефективно поєднання трьох типів УФ-світлодіодів із довжинами хвиль 365 нм, 385 нм і 405 нм, що дозволяє забезпечити глибоке та рівномірне затвердіння як внутрішніх, так і зовнішніх шарів моделі. Ротаційний механізм сприяє

повноцінному 360-градусному освітленню об'єкта, а система блокування дверей гарантує безпечні умови використання. Два вбудовані вентилятори забезпечують ефективне охолодження внутрішнього простору, що стабілізує роботу світлодіодних модулів і зменшує ризик перегріву. Додатковою перевагою є можливість точного встановлення часу затвердіння, тоді як у станції Anycubic Wash & Cure доступні лише три фіксовані інтервали.

Водночас Phrozen Cure V2 не має функції промивання моделей, на відміну від комбінованих станцій типу Anycubic Wash & Cure. Для користувачів, які прагнуть отримати максимально повний комплект для постобробки, це може бути певним обмеженням. Проте слід враховувати, що у Wash & Cure обмежений розмір промивної ємності, тому для моделей із великими габаритами або для обробки значної кількості виробів доцільно використовувати ультразвукову ванну окремо від УФ-камери. З іншого боку, ультразвукове очищення не завжди є безпечним для тонкостінних або крихких моделей [12].

#### 1.4 Висновки до першого розділу

У першому розділі було проведено комплексний аналіз технологічних, експлуатаційних та конструктивних особливостей фотополімерного 3D-друку, а також досліджено питання постобробки виробів і структуру сучасних камер ультрафіолетового затвердіння. Узагальнення отриманих результатів дає змогу сформулювати цілісне уявлення про специфіку виготовлення, обробки та полімеризації моделей, надрукованих методом фотополімерної адитивної технології, а також визначити ключові вимоги до створення власної автоматизованої установки.

У підрозділі 1.1 було встановлено, що фотополімерні технології SLA, LCD та DLP мають спільний принцип утворення виробів – прошаркове затвердіння рідких полімерів під дією світлового випромінювання, однак відрізняються способом формування світлового поля та рівнем точності. SLA-технологія використовує лазерне вибіркоче сканування, що забезпечує високу точність, але

відносно низьку швидкість друку. LCD-системи застосовують матриці рідких кристалів як маску, завдяки чому значно прискорюють процес виготовлення, проте мають залежність від рівномірності підсвітки та роздільної здатності екрану. DLP-технологія, натомість, використовує відбиття світла від мікродзеркальних елементів і здатна відтворювати модель з високою деталізацією та швидкістю, засвічуючи увесь шар одночасно.

У підрозділі 1.2 було розглянуто процес постобробки фотополімерних виробів, який є невід'ємною складовою технологічного циклу. Після завершення друку модель містить залишки смоли на поверхні та має неповністю полімеризовану структуру, що робить її механічно нестабільною.

У підрозділі 1.3 було проведено огляд аналогів та комерційних рішень у сфері камер постполімеризації. Було встановлено, що на ринку присутні як універсальні побутові станції з базовими функціями, так і професійні УФ-камери з розвиненою оптичною системою.

На основі проведеного аналізу предметної області можна дійти висновку, що оптимальна камера постполімеризації має забезпечувати високу рівномірність світлового поля, використання декількох спектральних діапазонів УФ-випромінювання, наявність обертальної платформи, стабільність механічних вузлів та можливість точного регулювання параметрів експозиції. Такі вимоги впливають як із фізичних особливостей фотополімерної полімеризації, так і з недоліків, притаманних комерційним та побутовим установкам. Важливим є також дотримання безпекових норм, зокрема блокування роботи при відкриванні кришки, та створення умов для ефективного тепловідведення. Сукупність цих факторів визначає напрями, яких необхідно дотримуватися під час розроблення власної автоматизованої УФ-камери.

## 2 РОЗРОБЛЕННЯ МАКЕТУ ДЛЯ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Розробка макету

Вихідними даними для розроблення макету камери постполімеризації стали попередньо сформовані вимоги до її функціональності та конструктивних параметрів. На основі аналізу існуючих пристроїв та з урахуванням необхідності забезпечення рівномірної ультрафіолетової засвітки було визначено оптимальні габарити робочої зони, яка має становити 330 мм × 330 мм × 330 мм. Такий розмір дає можливість розміщувати переважну більшість моделей, виготовлених на настільних DLP-принтерах, та забезпечує достатній простір для розташування джерел УФ-випромінювання.

Загальні конструктивні розміри макету визначалися на основі креслень, наведених на рисунках 2.1–2.2. Для створення зовнішньої оболонки було використано каркас із верстатного алюмінієвого профілю типорозміру 20 мм × 20 мм, оскільки він поєднує достатню жорсткість, невелику масу та простоту монтажу. На основі геометрії конструкції загальна довжина використаного профілю становила 7800 мм, що дало змогу сформувати повний просторовий каркас макету. Усі елементи профілю були нарізані відповідно до розмірів, наведених на кресленнях (рисунок 2.1 та рисунок 2.2), після чого їх з'єднано за допомогою 16 алюмінієвих кутових з'єднань, 32 Т-гайок М5 та відповідних кріпильних болтів.

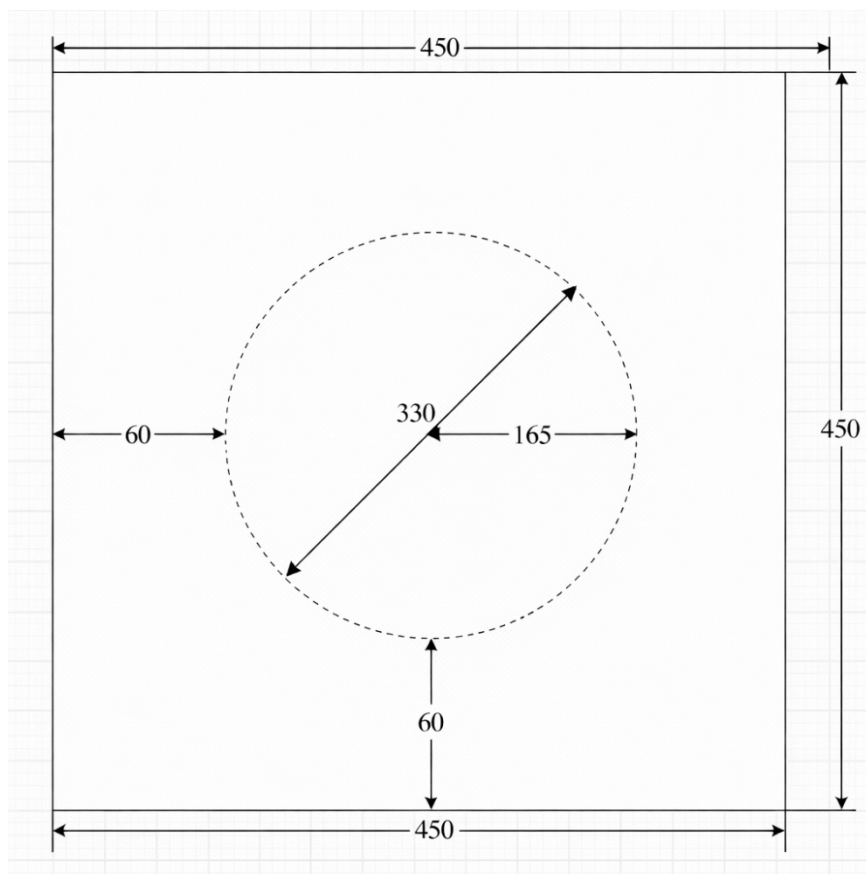


Рисунок 2.1 – Верхня проекція

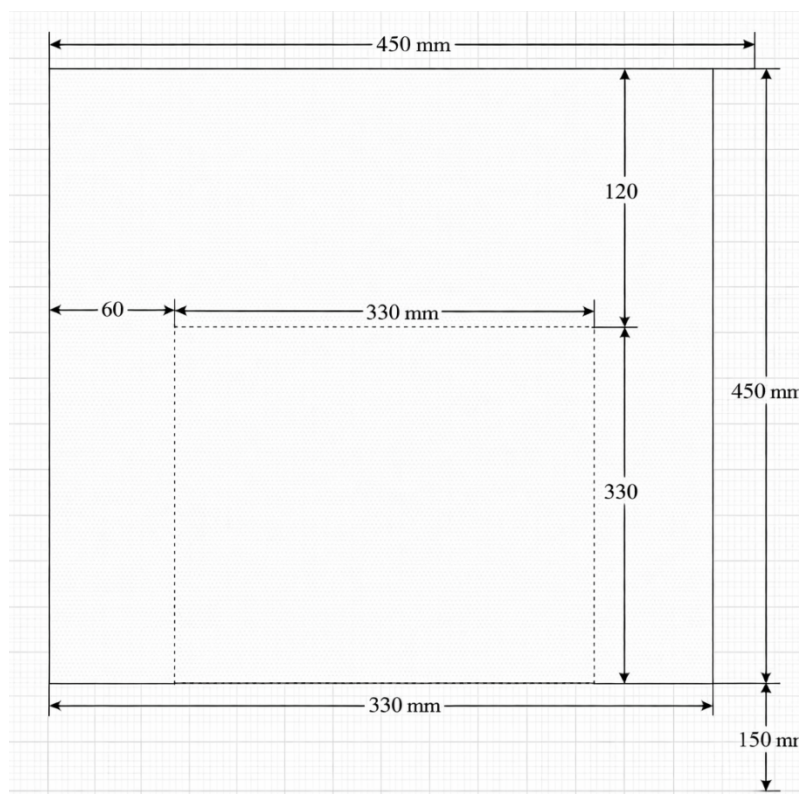


Рисунок 2.2 – Бокова проекція

Згідно з конструктивною схемою, нижня частина макету має технологічний відсік висотою 150 мм, призначений для розміщення блоку живлення та електронних компонентів. Це дозволяє відокремити силову частину від робочої камери, що підвищує безпеку та забезпечує зручність обслуговування. Після збирання просторового каркасу (рисунок. 2.3) було здійснено монтаж зовнішньої та внутрішньої обшивки. Для цього використано фанеру відповідної товщини, яка забезпечує необхідну механічну жорсткість конструкції та є простою в обробці. Листи фанери були попередньо розкроєні згідно з геометрією каркасу та закріплені до алюмінієвих профілів.



Рисунок 2.3 – Зібраний каркас

Внутрішні поверхні робочої камери було обклеєно фольгованим матеріалом (рис. 2.4–2.5), що виконує функцію відбивного шару. Використання фольги з високим коефіцієнтом відбиття дозволяє значно підвищити рівномірність розподілу ультрафіолетового випромінювання, мінімізувати утворення тіньових зон та збільшити ефективність засвітки. Таким чином створюється майже ізотропне світлове поле, що є критично важливим для отримання однорідних механічних властивостей фотополімерних виробів.



Рисунок 2.4 – Фольговані 2 стінки



Рисунок 2.5 – Фольговані 4 стінки

На наступному етапі було сформовано систему розміщення світлодіодів, які виконують роль джерел ультрафіолету. Для забезпечення можливості надійного

кріплення в робочій камері було встановлено алюмінієві монтажні смуги, прикріплені поверх фольгованої внутрішньої обшивки. На ці смуги за допомогою двостороннього скотчу розміщено УФ-світлодіоди, які були встановлені на бічних та верхній стінках робочої камери (рис. 2.6–2.7). Така конфігурація дає змогу створити просторове охоплення внутрішнього об'єму та забезпечити рівномірне опромінення моделі незалежно від її форми та орієнтації.



Рисунок 2.6 – Встановлення світлодіодів на бокові стінки



Рисунок 2.7 – Встановлення світлодіодів на верхню стінку

Отже, на основі креслень та попереднього аналізу компонентів було сформовано макет робочої камери, який поєднує достатню жорсткість конструкції, відбивні властивості внутрішніх поверхонь та рівномірне розміщення джерел ультрафіолетового світла. Цей макет є основою для подальшого встановлення електронних компонентів, розроблення керуючої схеми та проведення експериментальних досліджень.

## 2.2 Обґрунтування вибору електричних компонентів

### 2.2.1 Arduino UNO

Плата Arduino Uno (рисунок. 2.8) є центральним елементом системи керування макету. Вона побудована на мікроконтролері ATmega328P та має достатню кількість цифрових і аналогових входів/виходів для реалізації керування світлодіодами, двигуном і допоміжними модулями. Arduino Uno оснащена USB-інтерфейсом для програмування, роз'ємом живлення, кварцовим генератором на 16 МГц та кнопкою скидання, що робить її зручною у використанні та налаштуванні.

У системі камери плата виконує функції обробки сигналів, керування режимами роботи, формування таймінгів засвітки та взаємодії з додатковими компонентами, такими як реле чи модулі індикації. Вибір Arduino Uno обґрунтований її поширеністю, простотою програмування та сумісністю з широкою номенклатурою периферійних модулів.

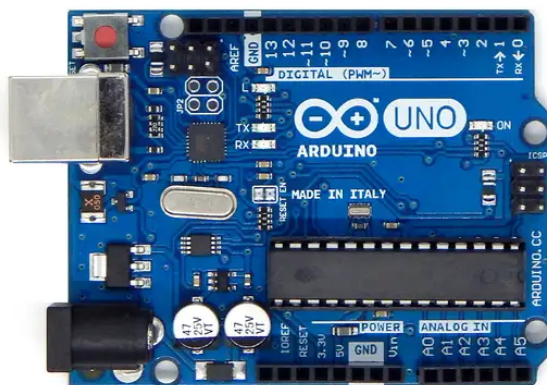


Рисунок 2.8 – Arduino UNO [13]

Характеристики плати Arduino UNO:

- модель: Arduino Uno (ATmega328);
- мікроконтролер: ATmega328P-AU;
- робоча напруга: 5 В;
- рекомендована вхідна напруга: від 7,2 В до 11,1 В;
- гранична вхідна напруга: від 6 В до 20 В;
- цифрові входи-виходи: 14 (6 з яких можуть бути ШІМ-виходами);
- аналогові входи: 8;
- струм на кожен вхід / вихід: 40 мА;
- флеш пам'ять: 32 КБ, 2 з яких використовуються бутлодером;
- SRAM: 2 КБ;
- EEPROM: 1 КБ;
- тактова частота: 20 МГц;
- розміри: 6,9 мм × 5,9 мм.

### 2.2.2 Мотор-редуктор постійного струму

Мотор-редуктор постійного струму (рисунок. 2.9) використовується для приводу обертальної платформи, на якій розміщується модель під час УФ-затвердіння. Його головним завданням є забезпечення стабільного, рівномірного та повільного обертання, що сприяє однорідній засвітці поверхні моделі зі всіх боків.

Вибраний мотор-редуктор працює у діапазоні напруг від 3 В до 6 В, має швидкість обертання 30 об/хв, достатній крутний момент (2,6 кг/см) та компактні розміри, що дозволяє без труднощів інтегрувати його у нижній відсік конструкції. Такі параметри забезпечують плавний рух платформи та мінімізують вібрації, що є важливим для правильної полімеризації.

Технічні характеристики мотор-редуктора:

- робоча напруга: від 3 В до 6 В DC;
- швидкість обертання осі: 30 об. / хв;
- габаритний розмір: 35 мм × 35 мм × 16 мм (без урахування осі);

- діаметр осі: 3 мм;
- довжина осі: 8 мм;
- струм холостого ходу: 100 мА при 6В;
- крутний момент: 2,6 кг / см.



Рисунок 2.9 – Мотор-редуктор [14]

### 2.2.3 I2C

Інтерфейсний модуль I2C на мікросхемі PCF8574T (рисунок. 2.10) використовується як засіб розширення кількості портів введення/виведення плати Arduino Uno. Його застосування є доцільним у випадках, коли кількість доступних пінами Arduino недостатня для підключення всіх необхідних периферійних елементів.

У даному макеті I2C-модуль виконує роль адаптера для сумісності з РК-екраном типу LCD 1602/2004, значно спрощуючи підключення та зменшуючи кількість необхідних проводів. Наявність потенціометра дозволяє регулювати контрастність дисплея.

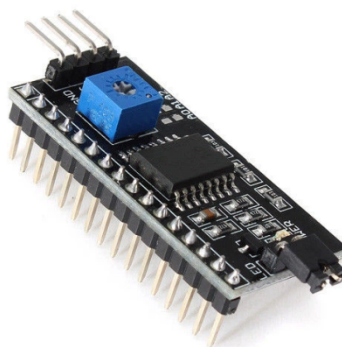


Рисунок 2.10 – Модуль I2C [15]

Технічні характеристики модуля I2C:

- інтерфейсна мікросхема: PCF8574AT / T;
- інтерфейс: I2C;
- діапазон адрес I2C:
- PCF8574T – 0x20-0x27;
- PCF8574AT – 0x38-0x3f;
- максимальна кількість підключених однотипних модулів: 8;
- напруга живлення: 5 В;
- розмір: 5,2 мм × 1,8 мм × 1,4 мм;
- сумісність: РКІ 1602 і 2004.

#### 2.2.4 LCD Keypad Shield

Рідкокристалічний дисплей використовується для відображення режимів роботи системи, часу засвітки, стану увімкнення та інших службових повідомлень. У поєднанні з I2C-адаптером дисплей потребує лише двох проводів для передачі даних, що дозволяє оптимізувати схему та зменшити кількість задіяних портів Arduino.

LCD-дисплей має достатню контрастність, низьке енергоспоживання та забезпечує зручний спосіб взаємодії користувача з пристроєм без використання додаткових компонентів. Саме тому його інтеграція до системи є технічно виправданою. Дисплей представлено на рисунку 2.11.

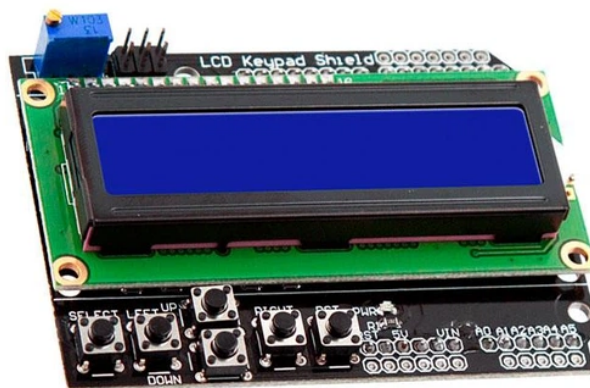


Рисунок 2.11 – LCD Keypad Shield [16]

Технічні характеристики:

- тип дисплея: LCD 1602, символний, 4-х бітний режим;
- дозвіл: 16 мм × 2 мм (два рядки по 16 символів кожна);
- колір дисплея: синій;
- технологія: STN, Transflective, Positive;
- контролер дисплея: HD44780U;
- гранична частота оновлення екрану: 5 Гц;
- живлення дисплея: 5 В;
- кнопки: 6 кнопок (5 кнопок управління і Reset);
- додаткові елементи: регулювання яскравості підсвічування;
- робоча температура екрану: від -20 до 70 градусів ;
- температура зберігання екрану: від -30 до 80 градусів.

#### 2.2.5 Блок живлення

Блок живлення забезпечує стабільну подачу електричної енергії до всіх компонентів системи. Вибір блоку здійснювався з урахуванням споживаної потужності УФ-світлодіодних стрічок, мікроконтролера, двигуна та реле. Згідно з вимогами до макету, пристрій працює від вхідної напруги 220 В, а внутрішнє живлення формується на рівні 12 В, що відповідає технічним характеристикам світлодіодної стрічки та мотор-редуктора.



Рисунок 2.12 – Блок живлення [17]

Блок живлення також має вбудовані засоби захисту від перенавантаження і короткого замикання, що забезпечує надійність і безпечність роботи установки. Саме тому він був обраний як оптимальний варіант для експериментального макету.

Технічні характеристики:

- вхідна напруга: від 100 В до 240В;
- вихідна напруга: 12 В;
- діапазон регулювання напруги: від 0,5 В до 14,6 В;
- вихідний струм: 3,5 А;
- потужність: 42 Вт;
- захист від: короткого замикання, перегріву, перевантаження;
- активне охолодження: немає;
- ККД: не менш 80%;
- роз'єм підключення: клемні колодки;
- тип корпусу: метал перфорований;
- рівень захисту: IP 20;
- робоча температура: до 65 градусів.

#### 2.2.6 Світлодіодна УФ стрічка

Світлодіодна УФ-стрічка (рисунок 2.13) є основним джерелом ультрафіолетового випромінювання для затвердіння фотополімерних моделей. Вибір саме стрічкового типу обумовлений можливістю рівномірного розміщення джерел світла по всіх внутрішніх поверхнях камери.

Стрічка працює на напрузі 12 В, містить 60 світлодіодів на метр та має довжину хвилі від 365 нм до 370 нм, що повністю відповідає вимогам фотополімерних смол. Кут випромінювання 120° сприяє рівномірному розподілу світлового потоку, а ступінь захисту IP65 робить стрічку стійкою до пилу та можливих бризок.

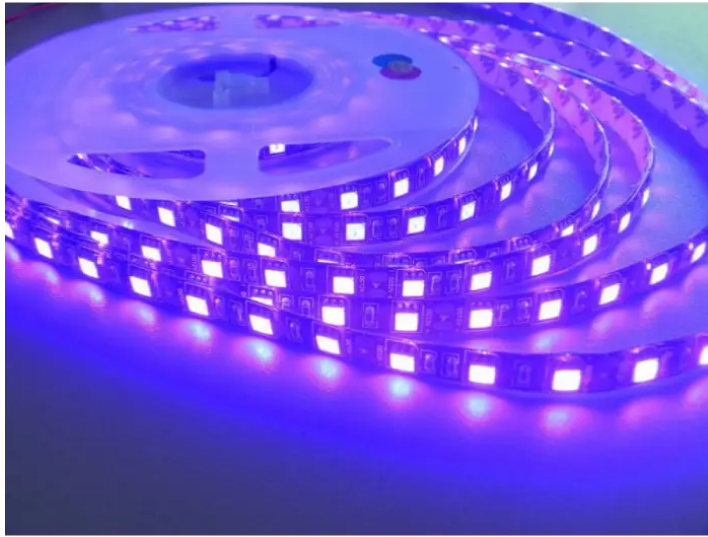


Рисунок 2.13 – Світлодіодна УФ стрічка [18]

Технічні характеристики:

- тип стрічки: монохромна;
- розмір (довжина): 5 м;
- ширина підкладки: 10 мм;
- розмір світлодіода: 5 мм × 5 мм;
- кількість світлодіодів: 60 шт / метр;
- напруга живлення: 12 В;
- потужність: 14,4 Вт / метр;
- кут випромінювання світла: 120 градусів;
- колір світіння: UV 365-370 нм;
- ступінь захисту: IP 65;
- довжина хвилі 250 нм.

### 2.2.7 Реле

Модуль електромеханічного реле SRD-05VDC-SL-C (рис. 2.14) використовується для комутації електричних навантажень, зокрема УФ-світлодіодної стрічки або блоку живлення. Реле дозволяє безпечно перемикати напруги до 250 В AC або 30 В DC, що робить його інтеграцію до системи доцільною.

Реле керується сигналом 5 В від плати Arduino, має один нормально-замкнений та один нормально-розімкнений контакт, що дозволяє реалізувати як логіку вмикання, так і аварійне вимкнення навантаження. Модуль легко інтегрується у схему та забезпечує електричну ізоляцію між силовою та керуючою частинами.



Рисунок 2.14 – Модуль реле [19]

Технічні характеристики:

- керуючий сигнал: від 3,5 В до 12 В;
- максимальний змінний струм і напруга: 10 А, 250 В.

### 2.3 Розробка електричної складової макету

Розроблення електричної складової макету передбачає створення повної схеми підключення всіх електронних елементів, описаних у підрозділі 2.2, та формування взаємозв'язків між ними. Центральним елементом системи є плата Arduino UNO, яка виконує функції керування роботою світлодіодної УФ-стрічки, мотор-редуктора, реле та індикаторних засобів.

Першим етапом є встановлення та підключення I2C-модуля, який слугує інтерфейсом для взаємодії з рідкокристалічним дисплеєм і кнопковим модулем. Як показано на електричній схемі (рисунок. 2.15), модуль під'єднується до плати Arduino за допомогою з'єднувальних кабелів через контакти SDA та SCL, після чого вся система може працювати через I2C-шину. Це дозволяє суттєво зменшити

кількість необхідних проводів порівняно з прямим підключенням дисплея. Додаткове зображення принципу підключення LCD-дисплея через I2C-перехідник наведено на рисунку 2.16, де показано використання чотирьох ліній: живлення 5V, земля GND, та сигнальні лінії SDA і SCL.

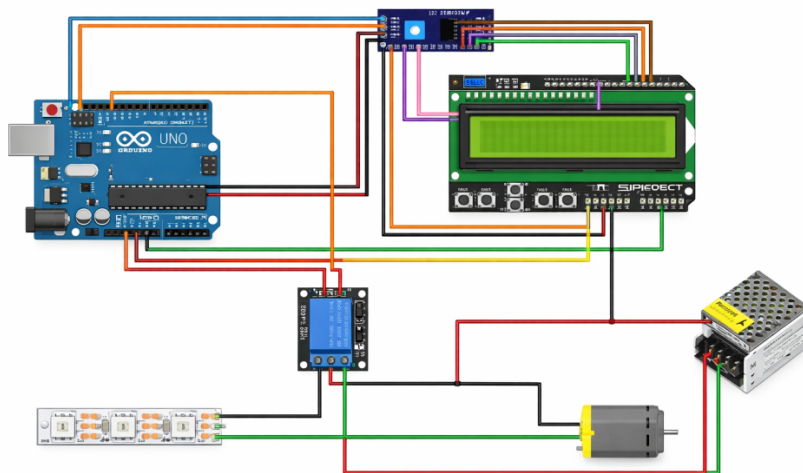


Рисунок 2.15 – Схема підключення електричних компонентів

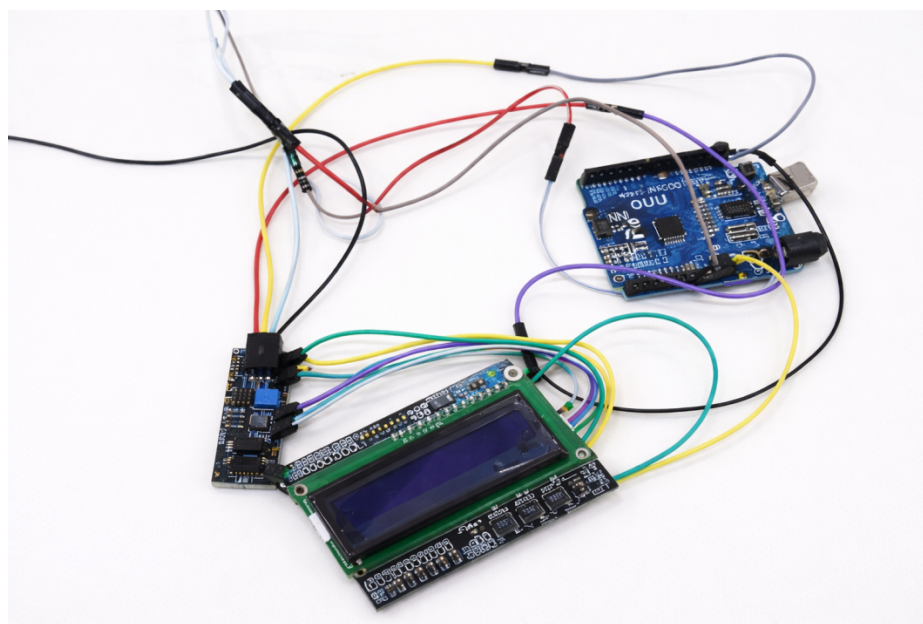


Рисунок 2.16 – Підключення LCD через I2C

Особливістю використання I2C-модуля є те, що частина цифрових пінів плати Arduino резервується під керування кнопками та дисплеєм і не може бути використана для інших елементів. Це необхідно враховувати при проектуванні

схеми. З іншого боку, плата Arduino має додаткові виходи 5V та GND, розташовані біля аналогових входів, що спрощує підключення датчиків і периферійних компонентів, а також підвищує зручність електромонтажних робіт.

Наступним етапом було підключення мотор-редуктора, який забезпечує обертання платформи всередині камери. Обертання платформи необхідне для формування рівномірного УФ-опромінення моделі під час затвердіння фотополімеру. У даному макеті, на відміну від типових рішень на драйверах L293D/L298, використано керування двигуном через двоканальний модуль реле, що дозволяє комутувати ланцюги живлення двигуна іншої напруги, не навантажуючи плату Arduino.

Модуль реле має три основні контакти: NO (нормально розімкнутий), NC (нормально замкнутий) та COM (загальний). Для підключення мотор-редуктора використовується нормально розімкнутий контакт, що дозволяє подавати живлення до двигуна лише в момент активації реле. Як показано на рисунку 2.17, мотор-редуктор під'єднується до виходів реле, після чого від модуля здійснюється з'єднання з блоком живлення. Згідно зі схемою, реле отримує керуючий сигнал від Arduino, комутує силову частину та забезпечує безпечне вмикання двигуна.

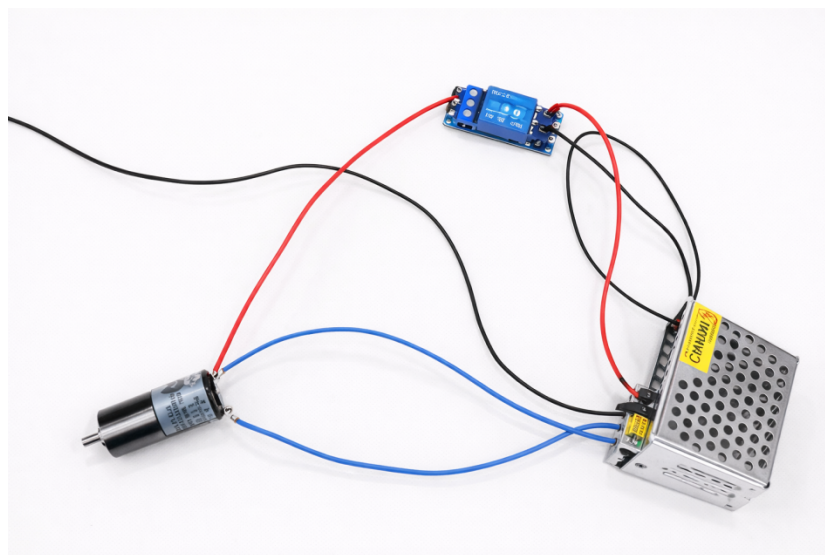


Рисунок 2.17 – Підключення мотор-редуктора

Плата Arduino UNO може керувати не лише електродвигунами, а й світлодіодними УФ-стрічками. Однак струм і напруга, які Arduino здатна подавати безпосередньо на своїх цифрових виходах, є недостатніми для прямого живлення світлодіодної стрічки. З цієї причини між контролером і світлодіодною стрічкою необхідно встановлювати додатковий комутаційний елемент. У даному макеті, як і у випадку з мотор-редуктором, для цього використовується модуль реле.

Спочатку вивід стрічки під'єднується до нормально розімкнутого (NO) контакту реле, після чого здійснюється з'єднання з блоком живлення. Таким чином комутація живлення стрічки здійснюється реле за сигналом від Arduino. Фактично обидва елементи – мотор-редуктор та світлодіодна УФ-стрічка – працюють через один релейний модуль, оскільки мають однакову схему ввімкнення. Принципову схему під'єднання світлодіодної стрічки через реле наведено на рисунку 2.18.

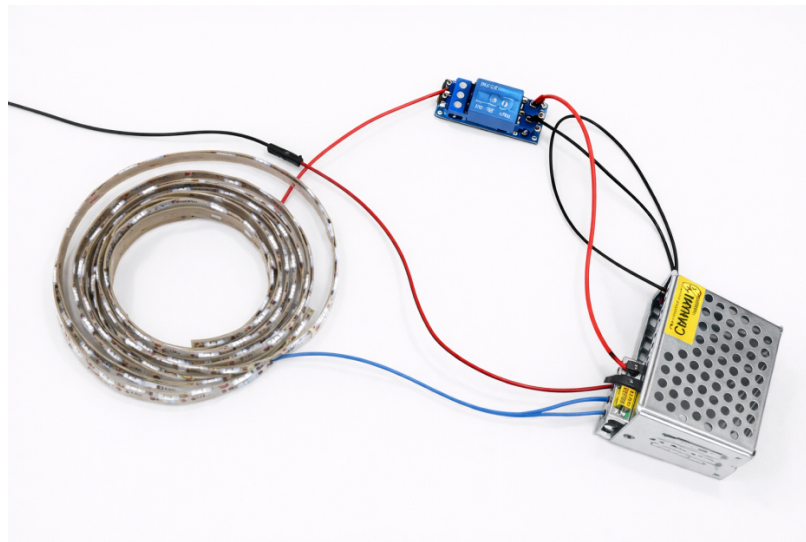


Рисунок 2.18 – Підключення світлодіодної стрічки

Окрему увагу приділено правильному вибору місць розміщення модулів у конструкції макету: I2C-модуль та дисплей розташовуються у верхній передній частині для зручності візуалізації режимів роботи, а реле та мотор-редуктор – у нижньому технічному відсіку, що зменшує вплив вібрацій і забезпечує

компактність компонування. Такий підхід дозволяє сформувати логічну, функціональну та зручну електронну систему.

Загалом електрична складова макету являє собою цілісну систему, у якій елементи керування, комутації та індикації узгоджені між собою й повністю відповідають вимогам до роботи установки. Створена схема забезпечує стабільність живлення, захист керуючої частини від перевантаження та можливість надійної інтеграції всіх силових та керуючих компонентів.

Код розробленої програми представлено у додатку А.

## 2.4 Висновки до другого розділу

У другому розділі було здійснено комплексну розробку макету установки для постобробки фотополімерних виробів, яка включає формування механічної конструкції, підбір електронних компонентів та розроблення електричної частини системи. Результати виконаної роботи дозволяють оцінити взаємозв'язок між конструктивними рішеннями, електронними модулями та вимогами до функціональності пристрою.

На етапі створення механічної частини було побудовано каркас із верстатного алюмінієвого профілю, що забезпечило необхідну жорсткість та модульність конструкції. Оболонка з фанери й внутрішня фольгована поверхня дозволили сформувати відбивне середовище, яке забезпечує рівномірне розподілення ультрафіолетового випромінювання по всьому об'єму робочої камери. Монтаж світлодіодів на бокових і верхній панелях створив оптичну конфігурацію, оптимальну для засвітки виробу зі всіх сторін.

Підбір електричних компонентів був виконаний з урахуванням вимог до продуктивності, сумісності та надійності системи. Плата Arduino UNO, завдяки простоті програмування та достатній кількості портів введення-виведення, стала основою керування. Мотор-редуктор забезпечив плавне обертання робочої платформи, що є важливою умовою однорідної полімеризації. Вибір I2C-модуля та LCD-дисплея дозволив організувати зручний інтерфейс користувача без

перевантаження цифрових портів контролера. Блок живлення, УФ світлодіодна стрічка та релейний модуль сформували надійну силову частину, яка гарантує стабільну роботу освітлення та виконавчих механізмів.

У підрозділі 2.3 було реалізовано електричну інтеграцію всіх компонентів. Схеми підключення, наведена на рисунку 2.15. Підключення модуля I2C забезпечило коректну роботу дисплея та елементів керування, тоді як реле дозволило безпечно комутувати живлення мотор-редуктора та УФ-стрічки. Правильне розміщення модулів у конструкції сприяло зручності обслуговування та мінімізації впливу вібрацій на роботу мікроконтролера й силових елементів.

Таким чином, було створено комплексний макет установки, який поєднує механічну структуру, підібрані електронні компоненти та функціонально завершену електричну схему. Отриманий результат слугує основою для подальших експериментальних досліджень, спрямованих на визначення параметрів ультрафіолетового затвердіння виробів.

### **3 ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ДРУКУ НА ТЕРМІЧНУ СТІЙКІСТЬ ВИРОБУ**

#### **3.1 Побудова плану експерименту**

Виходячи з мети роботи, а саме розроблення системи автоматизації постобробки, що дозволяє оцінювати твердість фотополімерних виробів після друку та прогнозувати вплив параметрів постобробки на кінцеві властивості, необхідно розробити серію дослідів, які дадуть змогу побудувати реальну регресійно-кореляційну модель впливу режимів постобробки на твердість зразків

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні напрацювання, а саме:

- визначити параметри постобробки, які дійсно впливають на твердість виробу, та встановити діапазони їх зміни;
- визначити фотополімерний матеріал (смола), на якому буде проводитися дослідження;
- визначити метод, за допомогою якого буде оцінюватися твердість виробу, та порядок виконання вимірювань;
- розробити геометрію тестового зразка, що буде використовуватися для серійних вимірювань;
- скласти план експерименту та виконати серію дослідів для накопичення статистичних даних;
- побудувати регресійно-кореляційну модель впливу параметрів постобробки на твердість;
- визначити оптимальні режими постобробки для забезпечення заданого рівня твердості та стабільності результатів.

Виходячи з проведеного аналізу предметної області, параметри постобробки, які теоретично та практично можуть найбільш суттєво впливати

на твердість фотополімерного виробу, є наступними:

- час миття виробу в ізопропіловому спирті;
- час УФ-допромінення (постполімеризації);
- температура в камері постполімеризації;
- інтенсивність УФ-випромінювання (потужність/яскравість джерела або відстань до УФ-модуля).

Саме ці параметри визначають ступінь завершеності полімеризації та формування структури матеріалу, що відображається на твердості виробу. Для побудови адекватної моделі обрано діапазони значень, які відповідають реальним режимам постобробки та забезпечують помітну зміну властивостей у межах експерименту. Таким чином, у регресійно-кореляційну модель входять три параметри:

- час УФ-допромінення, хв;
- температура постполімеризації, °С;
- час миття, хв.

Діапазони зміни параметрів пропонується обрати в межах, характерних для лабораторної та виробничої практики постобробки фотополімерних виробів.

Час миття визначається як тривалість контакту виробу з промивною рідиною, що впливає на якість очищення поверхні від незатверділої смоли. Недостатнє миття може спричинити наявність липкого шару та нерівномірну полімеризацію поверхні, тоді як надмірне миття здатне впливати на поверхневий шар та змінювати умови формування твердості після допромінення. Для даного дослідження пропонується використати діапазон від 2 хв до 10 хв, оскільки саме в цих межах найчастіше виконується промивання невеликих зразків. У дослідах використовуються три рівні: 2 хв, 6 хв, 10 хв.

В якості ультразвукової ванни буде використовуватися ванна DADI DA-968 30/50W 0.5L (рис. 3.1а). Технічні характеристики DADI DA-968, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики DADI DA-968

Параметр	Значення
Побутове живлення	220 В, 50 Гц
Режими потужності	30 Вт та 50 Вт
Частота ультразвуку	40 кГц
Об'єм ванни	0,5 л
Матеріал чаші	нержавіюча сталь
Таймер	є
Габарити чаші	165 мм × 85 мм × 45 мм
Вага	0,8 кг

Час УФ-допромінення є ключовим параметром, що визначає ступінь постполімеризації фотополімеру. При малих значеннях часу твердість може бути недостатньою через незавершеність реакції, а при надмірному допромінненні можливе “перезатвердіння” матеріалу (зростання крихкості та внутрішніх напружень). Для дослідження впливу запропоновано діапазон від 5 до 25 хв з трьома рівнями: 5 хв, 15 хв, 25 хв. Для пост полімеризації фотополімерної моделі, буде використовуватися саморобна камера з УФ-діодами (рис. 3.1б). Технічні характеристики, наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики діодної УФ камери

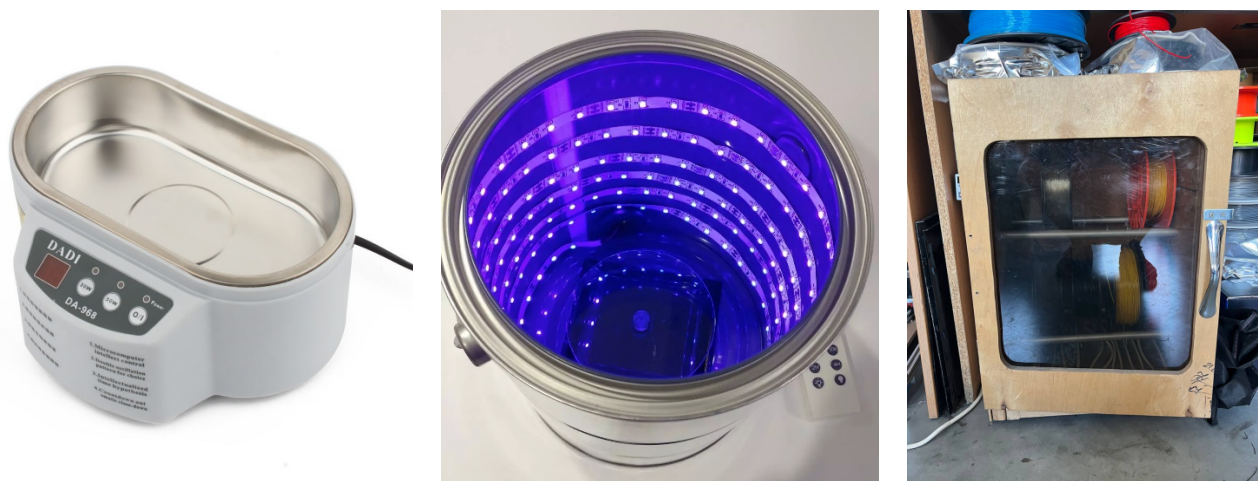
№	Параметр	Значення
1	Довжина хвилі УФ-випромінювання	405 нм
2	Об'єм камери	1 л
3	Тип охолодження	пасивне
4	Тип встановлення виробів	статичне розміщення на дні камери
5	Живлення	220 В, 50 Гц

Температура постполімеризації впливає на швидкість та глибину завершення полімеризаційних процесів, а також на дифузійні явища в матеріалі. При підвищенні температури зазвичай прискорюється реакція зшивання полімерної сітки, що може відобразитися у збільшенні твердості, однак надмірна температура здатна призводити до деформації тонкостінних елементів або росту залишкових напружень. Для даного дослідження пропонується діапазон температур від 25 °С до 60 °С, що є безпечним для більшості стандартних смол, з рівнями: 25 °С, 42,5 °С, 60 °С.

Для фінальної сушки виробу, буде також використовуватися саморобна сушильна шафа для філаменту (рис. 3.1в). Технічні характеристики, наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики сушильної шафи

№	Параметр	Значення
1	Габаритні розміри, мм	360 мм × 643 мм × 390 мм
2	Об'єм відсіку для сушки філаменту, м <sup>3</sup>	0,045
3	Кількість катушок пластику, яку можливо сушити в одному циклі роботи	12
4	Живлення, В	220 від мережі
5	Потужність нагнітаючого елемента, Вт	60
6	Максимальна температура нагріву в середній сушильній камері, °С	120
7	Середні коливання температури в середній камері, °С	±6°С



а)

б)

в)

а – ультразвукова ванна DADI DA-968; б – діодна УФ камера;

в – сушильна шафа

Рисунок 3.1 – Обладнання для постобробки виробу

Отже, факторний простір дослідження формується трьома параметрами, а вихідною величиною є твердість  $Y$ . Для оцінювання твердості фотополімерних виробів у даному дослідженні застосовується метод Роквелла з використанням шкали, рекомендованої для полімерних матеріалів (зокрема HRR або HRL). Вимірювання твердості виконуються відповідно до стандартної методики шляхом прикладання попереднього та основного навантаження з подальшою реєстрацією глибини вдавлювання індентора. Для кожного зразка проводиться не менше 5 вимірювань у різних точках поверхні з подальшим усередненням результатів та оцінюванням розкиду значень.

Для вимірювань твердості виробу після пост-обробки, буде використовуватися динамічний твердомір GOYOJO GHL210 (SL-140), (рис. 3.2)



Рисунок 3.2 – Динамічний твердомір GOYOJO GH210 (SL-140)

В таблиці 3.4 Наведені технічні характеристики твердоміра.

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики твердоміра GOYOJO GH210

№	Параметр	Значення
1	Діапазон вимірювання (HLD)	170 – 960 HLD
2	Похибка вимірювання (HLD)	±6 HLD
3	Повторюваність (HLD)	±10 HLD
4	Шкали конвертації	HRA, HRB, HRC, HL, HS, HV, HB
5	Живлення	2 батареї AA, 1.5 В
6	Габарити	148 мм × 71 мм × 33 мм
7	Маса	165 г

Для друку тестових зразків буде використовуватися фотополімерний LCD принтер Anycubic Photon, (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 –LCD принтер Anycubic Photon для проведення досліджень

Технічні характеристики 3D принтера наведені, в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики 3D принтера

№	Параметр	Значення
1	Область друку	115 мм × 65 мм × 155 мм
2	Тип УФ-екрану	LCD-панель 2К (2560×1440) з товщиною пікселя 47 50 мкм, що формує високу деталізацію шару
3	Джерело світла	LED-матриця 405 нм – стандартна довжина хвилі для більшості смол
4	Ванна смол	акрилова ємність з FEP-плівкою
5	Плата керування	Photon Mainboard V1.3
6	Програмне забезпечення	Chitubox / Photon Workshop
7	Тип файлів	.photon, .cbddlp

Для зручності вимірювань була обрана тестова модель куба з розмірами 20×20×20 мм, яка буде в себе включати різні контрольні елементи: отвори, пази та додаткові геометричні фігури рис. 3.4. Для дослідження використовувався фотополімерний 3D-принтер за технологією LCD Anycubic Photon Mono та тестові зразки.



Рисунок 3.4 – Модель тестового зразка

### 3.2 Проведення емпіричних досліджень

Виходячи з побудованого плану експерименту, була проведена серія емпіричних досліджень з метою визначення впливу параметрів постобробки на твердість фотополімерних виробів. Для виконання експерименту було виготовлено 27 тестових зразків, де кожен із трьох керованих параметрів змінювався на трьох рівнях.

У якості матеріалу для дослідження використовувалася фотополімерна смола Elegoo Standard Resin, надрукована за технологією LCD 3D-друку, (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 – Фотополімерна смола для проведення дослідження Elegoo Standard Resin

Усі тестові зразки виготовлялися з використанням однакових параметрів друку (висота шару, час експонування, інтенсивність випромінювання, орієнтація моделі та геометрія зразка), що дозволило мінімізувати вплив процесу друку на результати дослідження та зосередитися виключно на впливі етапу постобробки.

Після завершення друку всі зразки піддавалися постобробці, яка включала миття у промивній рідині та ультрафіолетову постполімеризацію. У межах експерименту змінювалися наступні технологічні параметри постобробки:

- час УФ-допромінення, хв: 5; 15; 25;
- температура постполімеризації, °C: 25; 42,5; 60;
- час миття, хв: 2; 6; 10.

Таким чином, кожна комбінація параметрів постобробки реалізовувалася один раз, що забезпечило отримання 27 унікальних режимів постобробки. Інші параметри, зокрема інтенсивність УФ-випромінювання та довжина хвилі світла (405 нм), залишалися сталими протягом усього експерименту, (рис.3.6).



Рисунок 3.6 – Перевернені тестові зразки для дослідження

Твердість фотополімерних виробів після постобробки визначається ступенем завершеності полімеризації матеріалу та формуванням просторової полімерної сітки. Збільшення часу УФ-допромінення та температури

постполімеризації сприяє інтенсифікації процесів зшивання, тоді як режим миття впливає на стан поверхневого шару та умови подальшої полімеризації.

Вимірювання твердості тестових зразків проводилися за допомогою динамічного твердоміра GOYOJO GHL210 (SL-140), що працює за принципом визначення динамічної твердості за відскоком ударного імпактора. В якості вихідної величини використовувалося значення динамічної твердості HLD, яке безпосередньо реєструється приладом та є зручним для подальшої статистичної обробки.

Для кожного тестового зразка виконувалося не менше п'яти вимірювань у різних точках поверхні. Отримані значення усереднювалися, а також визначалося стандартне відхилення, що дозволяло оцінити розкид результатів і відтворюваність вимірювань. Вимірювання проводилися на рівній поверхні зразків з дотриманням однакових умов контакту імпактора з матеріалом.

Результати вимірювань твердості, разом із відповідними параметрами постобробки, заносилися до Додатку Б та використовувалися для подальшого кореляційного аналізу і побудови регресійної моделі, що описує залежність твердості фотополімерних виробів від режимів постобробки.

На рис. 3.7 наведено залежність середнього значення твердості фотополімерних зразків від часу УФ-допромінення.

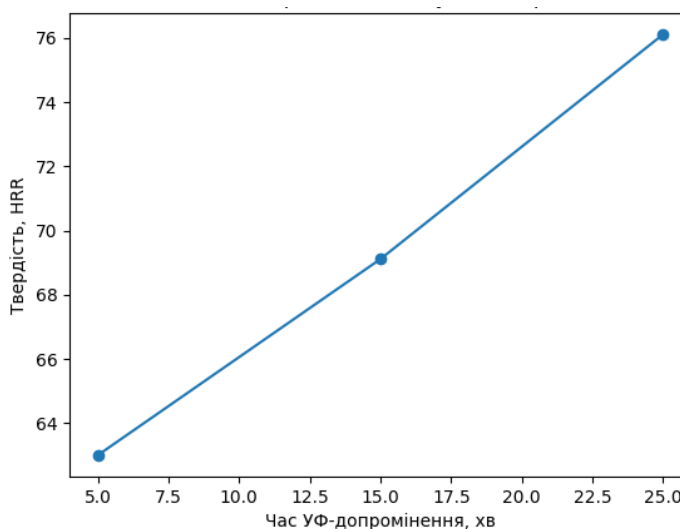


Рисунок 3.8 – Залежність твердості від часу УФ-допромінення

Аналіз графіка показує, що зі збільшенням часу УФ-допромінення від 5 до 25 хв спостерігається майже лінійне зростання твердості зразків. Це свідчить про поступове підвищення ступеня завершеності полімеризації матеріалу внаслідок збільшення сумарної дози ультрафіолетового випромінювання. Незначні відхилення значень пояснюються нерівномірністю структури поверхневого шару та локальними особливостями постполімеризації.

На рис. 3.8 представлено залежність твердості фотополімерних виробів від температури постполімеризації.

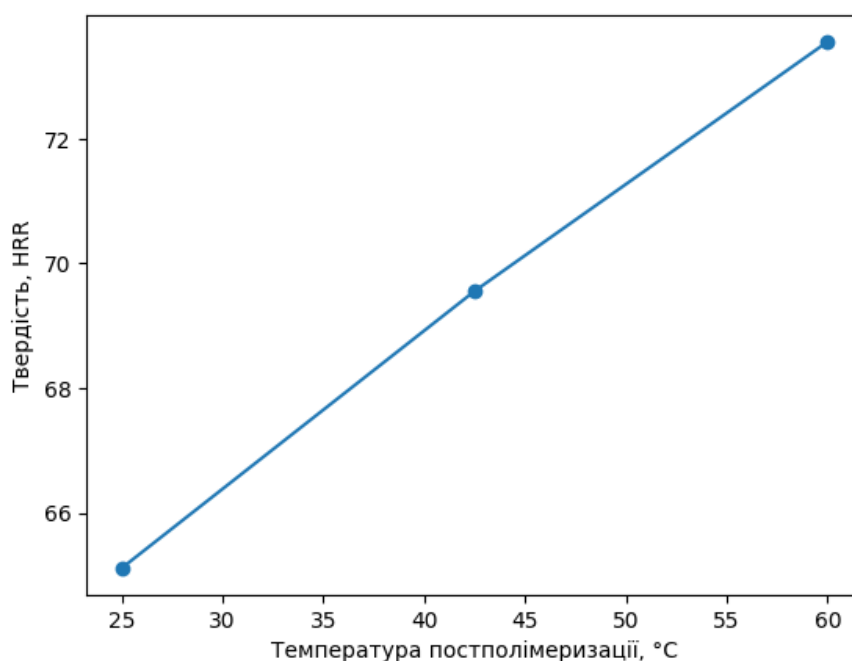


Рисунок 3.8 – Залежність твердості від температури постполімеризації

Зі зростанням температури з 25 °C до 60 °C твердість зразків стабільно збільшується, що пов'язано з інтенсифікацією полімеризаційних процесів та формуванням більш щільної просторової полімерної сітки. Отримана залежність має переважно лінійний характер, що підтверджує доцільність використання температури як одного з основних керованих факторів у регресійній моделі.

На рис. 3.9 показано залежність твердості від часу миття фотополімерних зразків.

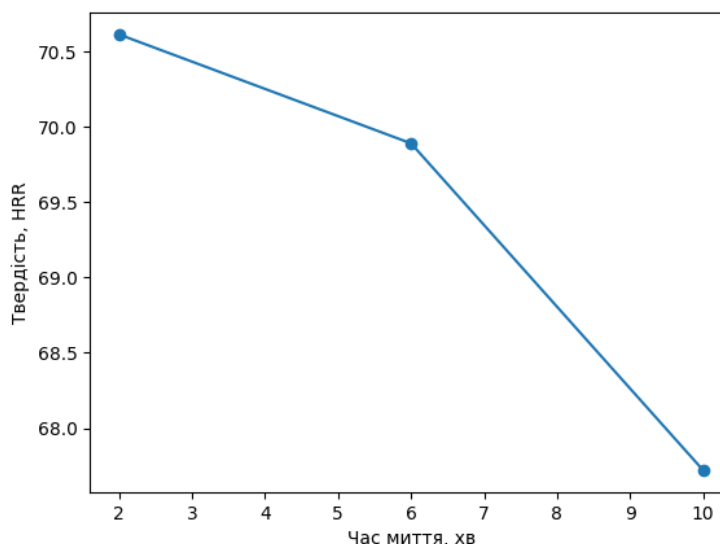


Рисунок 3.9 – Залежність твердості від часу миття

На відміну від попередніх факторів, вплив часу миття має нелінійний характер. Зі збільшенням тривалості миття спостерігається поступове зниження середнього значення твердості. Це може бути пов'язано з частковим вимиванням незатверділих компонентів з поверхневого шару матеріалу, що впливає на умови подальшої УФ-постполімеризації. Отримані результати свідчать про наявність оптимального діапазону часу миття.

Узагальнюючи результати аналізу, можна зробити висновок, що час УФ-допромінення та температура постполімеризації мають домінуючий і майже лінійний вплив на твердість фотополімерних виробів, тоді як час миття виступає коригувальним фактором, вплив якого проявляється у зміні поверхневих властивостей матеріалу. Отримані залежності є експериментальним підґрунтям для побудови регресійно-кореляційної моделі в наступному розділі.

### 3.3 Побудова регресійно-кореляційної моделі

Для обробки даних їх вводять у програмне забезпечення IBM SPSS Statistics, де проводиться базовий лінійний регресійний аналіз параметрів пост обробки фотополімерної моделі 3D-моделі [27]. За результатами обчислень у модулі Model

Summary визначається значення коефіцієнта детермінації R для кожного типу філаменту, рис. 3.8.

Model Summary									
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	Change Statistics			Sig. F Change
						F Change	df1	df2	
1	,966 <sup>a</sup>	,932	,924	1,8884	,932	105,814	3	23	,000

a. Predictors: (Constant), Washing\_time\_min, Post\_polymerization\_temperature\_C, UV\_irradiation\_time\_min

Рисунок 3.9 – Зведення для моделі (Model Summary)

Показник R (0,966) показує, наскільки добре корелюють фактичні значення залежної змінної з прогнозами моделі, відображаючи, наскільки точно лінія регресії відповідає експериментальним даним. Коефіцієнт множинної детермінації  $R^2$  (0,932) вказує на те, яку частку впливу мають параметри, що входять до моделі, на кінцевий результат. Для даної фотополімерної смоли цей показник становить 93,2%.

Середнє скориговане значення коефіцієнта  $R^2$  для всіх досліджуваних філаментів дорівнює 92,4%, а середня стандартна похибка оцінки – 0,5, що перевищує порогове значення 0,5. Аналіз даних за всіма осями підтверджує, що  $R^2$  більше 0,5.

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

ANOVA <sup>a</sup>						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1132,000	3	377,333	105,814	,000 <sup>b</sup>
	Residual	82,019	23	3,566		
	Total	1214,019	26			

a. Dependent Variable: Hardness\_HRR

b. Predictors: (Constant), Washing\_time\_min, Post\_polymerization\_temperature\_C, UV\_irradiation\_time\_min

Рисунок 3.10 – Результати розрахунків значимості «ANOVA»

У всіх випадках рівень значущості Sig. виявився меншим за 0,05, що підтверджує статистичну достовірність отриманих результатів. Щоб визначити внесок кожної змінної, використовуються стандартизовані коефіцієнти Beta, які показують, як змінюється значення параметра при збільшенні одного з факторів на одиницю, рис. 3.11.

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	51,487	1,481		34,775	,000			
	UV_irradiation_time_min	,656	,045	,798	14,728	,000	,798	,951	,798
	Post_polymerization_temperature_C	,241	,025	,514	9,486	,000	,514	,892	,514
	Washing_time_min	-,361	,111	-,176	-3,245	,004	-,176	-,560	-,176

a. Dependent Variable: Hardness\_HRR

Рисунок 3.11 – Значення «Standardized Coefficients Beta»

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

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

де  $Y$  – фактор міцності виробу;

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

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

На рис. 3.12, наведені результати кореляції Пірсона.

		Correlations			
		Hardness_HRR	UV_irradiation_time_min	Post_polymerization_temperature_C	Washing_time_min
Pearson Correlation	Hardness_HRR	1,000	,798	,514	-,176
	UV_irradiation_time_min	,798	1,000	,000	,000
	Post_polymerization_temperature_C	,514	,000	1,000	,000
	Washing_time_min	-,176	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Hardness_HRR	.	,000	,003	,190
	UV_irradiation_time_min	,000	.	,500	,500
	Post_polymerization_temperature_C	,003	,500	.	,500
	Washing_time_min	,190	,500	,500	.
N	Hardness_HRR	27	27	27	27
	UV_irradiation_time_min	27	27	27	27
	Post_polymerization_temperature_C	27	27	27	27
	Washing_time_min	27	27	27	27

Рисунок 3.12 – Кореляція Пірсона

Для остаточної побудови рівняння регресії будемо використовувати загальні коефіцієнти з спільної кореляції, формула (3.2):

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2=0,01369+(0,798 \times x_1)+(0,514 \times x_2)+((-0,172) \times x_3). \quad (3.2)$$

Таким чином отримуємо, що рівняння регресії для фотополімерних моделей з урахуванням параметрів пост-обробки.

### 3.4 Охорона праці

Під час експлуатації установки для ультрафіолетового затвердіння фотополімерних виробів можливий вплив низки небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що потребують врахування на етапі конструювання та використання. До основних факторів належать:

- УФ-випромінювання;
- електрична безпека;
- хімічний вплив фотополімерів;
- механічні фактори;
- термічні фактори.

Однією з найбільших небезпек є ультрафіолетове випромінювання діапазону від 365 нм до 405 нм. Допустимі рівні УФ- випромінювання визначені у "Державні санітарні норми і правила роботи з джерелами ультрафіолетового випромінювання", згідно з якими прямий контакт користувача з УФ-випромінюванням має бути повністю виключений. Саме тому камера повинна мати закритий корпус зі світлонепроникного матеріалу та систему автоматичного відключення джерел випромінювання при відкриванні дверцят. Ці вимоги відповідають також положенням "Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин", які вимагають недопущення відкритого та відбитого УФ-випромінювання в робочу зону оператора [20].

З хімічної точки зору фотополімерні смоли та ізопропіловий спирт належать до речовин, що можуть викликати подразнення шкіри та дихальних шляхів. Робоче приміщення повинно мати ефективну припливно-витяжну вентиляцію, а роботи виконуються у нітрилових рукавичках та захисному одязі. Зберігання спиртовмісних розчинів здійснюється лише у герметичних металевих ємностях згідно з ДБН В.1.1-7:2016 "Пожежна безпека".

Особливу увагу слід приділити електробезпеці, адже установка містить вузли, що працюють при напрузі до 220 В. Вимоги щодо захисту від ураження електричним струмом визначені у НПАОП 40.1-1.21-98 "Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів". Усі елементи установки повинні мати надійну ізоляцію, а корпус – бути заземленим. Блок живлення повинен мати заводський захист від короткого замикання та перевантаження. Обслуговування можливе лише після повного знеструмлення обладнання.

Організація робочого місця має відповідати ДБН В.2.5-28:2018 "Природне і штучне освітлення", що передбачає освітлення робочої зони не менше ніж 300 лк. Робоча поверхня повинна бути негорючою, міцною та стійкою до хімічних впливів. Забороняється розміщувати легкозаймисті матеріали біля установки, що відповідає вимогам пожежної безпеки. Також у приміщенні має бути доступний порошковий вогнегасник, придатний для гасіння електроустановок.

Під час обслуговування пристрою можуть виникати механічні та термічні небезпеки, пов'язані з рухомими частинами та нагріванням світлодіодних модулів. Відповідно до НПАОП 0.00-1.31-99 “Правила безпечної роботи з інструментами та пристроями”, доступ до обертових частин повинен бути обмежений, а корпус – щільно закритий. Тимчасове технічне обслуговування здійснюється лише при повністю знеструмленій системі.

У разі розливу фотополімера необхідно ізолювати місце розливу, зібрати матеріал абсорбентом і провітрити приміщення. При займаннях необхідно негайно вимкнути живлення обладнання, застосувати порошковий вогнегасник та виключити використання води через наявність електричних компонентів. У випадку потрапляння УФ-випромінювання або смоли на шкіру потрібно звернутися за медичною допомогою.

Таким чином, безпечна експлуатація установки для постполімеризації фотополімерних виробів забезпечується комплексом технічних та організаційних заходів, що спираються на чинні норми з охорони праці, електробезпеки, пожежної безпеки та санітарних вимог. Дотримання цих вимог гарантує мінімізацію виробничих ризиків і створення безпечних умов праці в процесі досліджень та експлуатації обладнання.

### 3.5 Висновки до третього розділу

У третьому розділі розроблено та реалізовано експериментальну методику дослідження впливу параметрів постобробки на твердість фотополімерних виробів, виготовлених за технологією LCD 3D-друку. Факторний простір дослідження сформовано з трьох керованих параметрів: часу УФ-допромінення, температури постполімеризації та часу миття виробів. На основі повного факторного плану експерименту було проведено серію з 27 дослідів, що забезпечило отримання репрезентативного масиву експериментальних даних. Визначення твердості здійснювалося за допомогою динамічного твердоміра

GOYOJO GH210 (SL-140), а результати оброблялися шляхом усереднення значень та аналізу їх розкиду.

Кількісний аналіз результатів показав, що час УФ-допромінення має найбільший вплив на твердість фотополімерних виробів. Зі збільшенням часу УФ-допромінення з 5 до 25 хв середнє значення твердості зростає приблизно з 63 HRR до 76 HRR, тобто на 13 HRR, що відповідає середньому приросту близько 0,65 HRR на хвилину у досліджуваному діапазоні.

Підвищення температури постполімеризації з 25 °C до 60 °C також суттєво впливає на твердість виробів. У цьому діапазоні середнє значення твердості зростає приблизно з 65 HRR до 73 HRR, що становить приріст близько 8 HRR або в середньому 0,23 HRR на 1 °C. Отримана залежність має переважно лінійний характер, що свідчить про стабільний вплив температури на завершеність процесів полімеризації.

Вплив часу миття є менш вираженим порівняно з іншими параметрами. Зі збільшенням часу миття з 2 до 10 хв середнє значення твердості зменшується приблизно з 70,5 HRR до 67,7 HRR, тобто на 2,8 HRR. Це підтверджує, що час миття виконує коригувальну роль і впливає переважно на стан поверхневого шару матеріалу, не визначаючи загальний рівень твердості. Порівняльна оцінка впливу параметрів дозволяє встановити їх відносну значущість у формуванні твердості фотополімерних виробів:

- час УФ-допромінення, домінуючий фактор від 45 % до 50 % сумарного впливу;
- температура постполімеризації, другорядний, але суттєвий фактор від 30 % до 35 %;
- час миття, коригувальний фактор від 10 % до 15 %.

Отримані кількісні оцінки підтверджують доцільність використання саме цих параметрів у регресійно-кореляційній моделі та створюють надійну експериментальну основу для подальшого прогнозування твердості й розроблення системи автоматизованого керування процесом постобробки фотополімерних виробів.

## ВИСНОВКИ

У ході кваліфікаційної роботи було проведено комплексне дослідження процесів постобробки виробів, виготовлених методом фотополімерного 3D-друку, а також розроблено макет установки для експериментального визначення впливу параметрів засвітки на якість та властивості надрукованих моделей. Поставлені в роботі завдання були повністю виконані, що дозволило отримати цілісне уявлення про особливості технологічного процесу та сформувані науково обґрунтовані результати.

У першому розділі було проведено аналіз предметної області, зокрема розглянуто принципи роботи технологій SLA, DLP та LCD, що дало можливість визначити їх переваги та обмеження в контексті подальшої постобробки. Окрему увагу приділено процесам промивання та ультрафіолетового затвердіння, які є ключовими для формування остаточних механічних та експлуатаційних властивостей виробів. Проведений аналіз комерційних аналогів дозволив визначити недоліки існуючих рішень, серед яких нерівномірність засвітки, обмеженість робочого об'єму та нестача функціональної гнучкості. Це підтвердило актуальність створення дослідницького макету установки з можливістю варіювання параметрів УФ-випромінювання.

У другому розділі було розроблено механічну, електронну та електричну частини макету. Побудовано каркас збільшеної робочої камери, застосовано фольговані поверхні для формування рівномірного світлового середовища та змонтовано УФ-світлодіоди у конфігурації, що забезпечує просторове охоплення моделі. Обґрунтовано вибір плати керування Arduino UNO, мотор-редуктора, релейного модуля, блоку живлення та допоміжних електронних компонентів. Створена електрична схема об'єднує всі модулі в єдину систему, здатну забезпечити керування режимами роботи, рівномірність засвітки та функціональну безпеку установки. Таким чином, було створено повністю

працездатний макет, придатний для проведення подальших експериментальних досліджень.

У третьому розділі проведено експериментальні дослідження впливу режимів друку та параметрів постобробки на термічну стійкість виробів. Побудовано план експерименту, зібрано емпіричні дані, виконано статистичне моделювання та визначено залежності між технологічними параметрами й показниками якості виробів. Отримані результати дозволили підтвердити ефективність запропонованої конструкції камери та її придатність для дослідницьких задач у галузі фотополімерного 3D-друку.

Узагальнюючи результати роботи, можна стверджувати, що створена експериментальна установка забезпечує необхідні умови для варіювання параметрів ультрафіолетового затвердіння і дає змогу комплексно вивчати вплив технологічних режимів на властивості фотополімерних виробів. Отримані висновки можуть бути використані як для вдосконалення процесу постобробки, так і для подальшої модернізації конструкції камер засвітки, що сприятиме розвитку технологій адитивного виробництва загалом.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

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

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2024. 57 с

3. 17 Цілей сталого розвитку | Global Compact.  
URL: <https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku> (дата звернення: 12.10.2025).

4. 3D Вох [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://3d-box.com.ua/kamera-dlya-polimerizacii-wanhao-boxman-1-komplektuyuschie-dlya-3d-printera> – 12.11.25 – Загл. з екрану.

5. 3DTool [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://3dtool.ru/product/ustroystvo\\_dlya\\_ochistki\\_i\\_dopolnitelnogo\\_otverzhdeniy\\_a\\_modeley\\_anycubic\\_wash\\_cure\\_/](https://3dtool.ru/product/ustroystvo_dlya_ochistki_i_dopolnitelnogo_otverzhdeniy_a_modeley_anycubic_wash_cure_/) – 16.08.21 – Загл. з екрану

6. Svetmir3D [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://cvetmir3d.ru/blog/3d-obzory/obzor-uf-kamery-phrozen-cure-v2/> – 17.08.25 – Загл. з екрану.

7. 3DToday [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://3dtoday.ru/blogs/cvetmir3d/pervaya-postavka-uf-kamer-phrozen-cure-v2-i-cure-x1> – 18.08.25 – Загл. з екрану.

8. Top3Dshop [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://top3dshop.ru/blog/obzor-kamery-polimerizatsii-xyzprinting.html> – 19.11.25– Загл. з екрану.

9. Arduinomaster [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arduinomaster.ru/platy-arduino/plata-arduino-uno/> – 20.11.25 – Загл. з экрана.

10. Prom [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://prom.ua/p887883787-16ga-030-30rpm.html?&primelead=MC43NQ> – 21.08.25 – Загл. з экрана.

11. Arduinoua [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arduino.ua/prod1790-iici2cinterfeis-lcd1602-2004> – 22.11.25 – Загл. з экрана.

12. Arduinomaster [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arduinomaster.ru/platy-arduino/arduino-lcd-keypad-shield/> – 23.11.25 – Загл. з экрана.

13. Arduino Uno Rev3 : official hardware documentation [Электронный ресурс]. – Arduino AG, 2023. – Режим доступа: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3> (дата звернення: 27.11.2025).

14. Micro Metal Gearmotor 30 RPM : technical specifications [Электронный ресурс]. – Pololu Robotics & Electronics, 2023. – Режим доступа: <https://www.pololu.com> (дата звернення: 27.11.2025).

15. PCF8574 I<sup>2</sup>C I/O Expander for Remote 8-bit I/O : datasheet [Электронный ресурс]. – NXP Semiconductors, 2015. – Режим доступа: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCF8574.pdf> (дата звернення: 28.11.2025).

16. LCD1602 Keypad Shield for Arduino : technical description [Электронный ресурс]. – Waveshare Electronics, 2022. – Режим доступа: [https://www.waveshare.com/wiki/LCD1602\\_Keypad\\_Shield](https://www.waveshare.com/wiki/LCD1602_Keypad_Shield) (дата звернення: 15.12.2025).

17. Mean Well 12V Power Supply : product specifications [Электронный ресурс]. – Mean Well Enterprises Co., Ltd., 2023. – Режим доступа: <https://www.meanwell.com> (дата звернення: 16.12.2025).

18. UV LED Strip 365–370 nm : product datasheet [Электронный ресурс]. – Shenzhen LED Manufacturer, 2023. – Режим доступа: <https://www.aliexpress.com> (дата звернення: 16.12.2025).

19. Songle SRD-05VDC-SL-C Relay Module : datasheet [Электронный ресурс]. – Songle Relay Co., 2016. – Режим доступа:

<https://datasheetspdf.com/pdf/1120047/Songle/SRD-05VDC-SL-C/1> (дата звернення: 18.12.2025).

20. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Організація керування умовами праці" підготовки першого (бакалаврського) рівня усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стищенко, Г. В. Пронюк, О. В. Мамонтов. – Харків, 2024. – 164 с.