

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ВИДАВНИЧО-ПОЛІГРАФІЧНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра технології поліграфічного виробництва

«На правах рукопису»
УДК 655

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Тетяна КИРИЧОК

«__» _____ 2022 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою

«Технології друкованих і електронних видань»

зі спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія»

на тему: «Поліграфічне підприємство з виготовлення сувенірної продукції з дослідженням якості 3D друку та лазерного гравіювання»

Виконала:

студентка II курсу, групи СТ-311мп

Володько Марина Юріївна _____

Науковий керівник:

доцент кафедри ТПВ, к.т.н., доцент

Клименко Тетяна Євгеніївна _____

Консультант з:

розроблення стартап-проєкту

доцент кафедри ТПВ, к.т.н., доцент

Золотухіна Катерина Ігорівна _____

Рецензент:

доцент кафедри репрографії, к.т.н., доцент

Розум Тетяна Володимирівна _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2022 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Навчально-науковий видавничо-поліграфічний інститут

Кафедра технології поліграфічного виробництва

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 186 «Видавництво та поліграфія»

Освітньо-професійна програма «Технології друкованих і електронних видань»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Тетяна КИРИЧОК

«__» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студентці

Володько Марини Юріївни

1. Тема дисертації **«Поліграфічне підприємство з виготовлення сувенірної продукції з дослідженням якості 3D друку та лазерного гравіювання»**, науковий керівник дисертації Клименко Тетяна Євгенівна, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «07» листопада 2022 р. № 4073-С.

2. Термін подання студентом дисертації «10» грудня 2022 р.

3. Об'єкт дослідження – адитивні технології виготовлення рекламно-сувенірної продукції.

Предмет дослідження – параметри технологічного процесу друку індивідуальної рекламно-сувенірної продукції із дослідженням показників якості

4. Вихідні дані: характеристики обладнання та витратних матеріалів для здійснення друку із застосуванням адитивних технологій

5. Перелік завдань, які потрібно розробити. аналітичний огляд сучасного стану та аналіз технологій створення 3D-виробів; проведення патентного пошуку на тему «3D printing»; здійснення класифікації адитивних технологій виготовлення 3D-сувенірів; вибір обладнання для здійснення виробничих процесів щодо виготовлення 3D-виробів; розроблення ескізних креслень і 3D-моделей сувенірної продукції; розробка рекомендацій по підготовці 3D-моделей в середовищі програмного пакету для створення тривимірної комп'ютерної графіки Blender; аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту; розроблення маркетингової програми стартап проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Класифікація методів застосування адитивних технологій, класифікація витратних матеріалів, 3D-моделі, графіки залежностей.

7. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення Стартап-проєкту	Золотухіна К. І., доцент кафедри ТПВ		

9. Дата видачі завдання 05 вересня 2022 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
	Вступ	до 15.09.2022 р.	
1	Теоретична частина	до 01.10.2022 р.	
2	Експериментальна частина	до 15.10.2022 р.	
3	Проектна частина	до 01.11.2022 р.	
4	Розроблення стартап-проекту	до 15.11.2022 р.	
	Висновки та список використаних джерел	до 01.12.2022 р.	
	Оформлення магістерської дисертації і графічного матеріалу	до 10.12.2022 р.	
	Здавання дисертації на кафедру для рецензування	до 10.12.2022 р.	

Студентка

Марина ВОЛОДЬКО

Науковий керівник

Тетяна КЛИМЕНКО

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської дисертації на тему «Видавництво та поліграфія» на тему: «Поліграфічне підприємство з виготовлення сувенірної продукції з дослідженням якості 3D друку та лазерного гравіювання», містить 142 сторінки, 70 рисунків, 11 таблиць, 29 формул та 62 літературних джерела.

Метою магістерської дисертації визначено: дослідження технології виготовлення сувенірної продукції на поліграфічному підприємстві, надання рекомендацій щодо оптимальних робочих режимів обладнання адитивного друку, оптимізації технологічного процесу виробництва та затрат часу, вибору витратних матеріалів, оцінки та підвищення якості отриманих сувенірних 3D-виробів, зменшити амортизації витрат.

Об'єктом дослідження є адитивні технології виготовлення рекламно-сувенірної продукції.

Предметом дослідження є параметри технологічного процесу друку індивідуальної рекламно–сувенірної продукції із дослідженням параметрів якості.

Методи дослідження: визначення параметрів якості поверхневого шару деталей 3D-сувенірів; метод контролю розмірних параметрів 3D-сувенірів, що виготовлені адитивним способом друку; метод обробки результатів експериментальних досліджень; визначення режимів 3D-друку на геометричні параметри, шорсткість поверхонь 3D-сувенірів; розрахунки оптимальних показників для застосування адитивних технологій, методи визначення показників якості 3D-виробів.

Запроектовано поліграфічне підприємство із виготовлення сувенірної продукції із дослідженням якості 3D-друку.

Було досліджено відбитки, отримані із застосуванням адитивних технологій друку та обрано методологію планування для аналізу експериментів.

Було розроблено технологічний процес виготовлення поліграфічної продукції та оформлено результати у вигляді блок-схем та таблиць.

Описано та наочно проілюстровано етапи проведення експериментів.

Проведено розрахунки отриманих результатів проведення експерименту, проаналізовано зміну параметрів шорсткості та точності відносно зміни технологічних параметрів.

Розроблено стартап-проект, де описана ідея та зміст проекту, проаналізовано сильні та слабкі сторони, можливості виходу на ринок та конкурентоспроможність проекту.

Ключові слова: адитивне виробництво, рекламно-сувенірна продукція, технологічний процес, блок-схема, графік, технології 3D-друку, 3D-обладнання, точність, шорсткість, сувенірні брелки, персонажі відео персонажів, логотипи, випадкові сувеніри.

ABSTRACT

The explanatory note to the master's thesis on the topic «Printing enterprise for the production of souvenir products with research into the quality of 3D printing and laser engraving», contains 142 pages, 70 pictures, 11 tables, 62 literary sources.

The purpose of the master's thesis is defined as: researching the technology of manufacturing souvenir products at a printing company, providing recommendations on optimal operating modes of additive printing equipment, optimization of the technological process of production and time spent, selection of consumables, evaluation and improvement of the quality of received souvenirs 3D-produced, reduce amortization costs.

The object of research is additive manufacturing technologies of advertising and souvenirs products

The subject of the research is parameters of the technological process of printing individual advertising and souvenir products with quality research and production design.

Research methods: determination of quality parameters of the surface layer of parts 3D-souvenirs; method of controlling dimensional parameters 3D-souvenirs made by the additive printing method; the method of processing the results of experimental studies; definition 3D printing modes for geometric parameters, surface roughness of 3D souvenirs; optimal calculations indicators for the application of additive technologies, methods of determining quality indicators 3D-products

A polygraphic enterprise for the production of souvenir products with a study of the quality of 3D printing has been designed.

Prints obtained using additive printing technologies were investigated and a planning methodology was chosen for the analysis of experiments.

The technological process of production of printing products was developed and the results were presented in the form of block diagrams and tables.

The stages of conducting experiments are described and clearly illustrated.

The calculations of the obtained results of the experiment were carried out, the change in the parameters of roughness and accuracy relative to the change in the technological parameters was analyzed.

A start-up project has been developed, where the idea and content of the project are described, the strengths and weaknesses, opportunities to enter the market and the competitiveness of the project are analyzed.

Key words: additive manufacturing, promotional and souvenir products, technological process, flow chart, graph, 3D printing technology, 3D equipment, precision, roughness, souvenir keychains, video character characters, logos, random souvenirs.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AB – адитивне виробництво. AT – адитивні технології.

FDM – Fused Deposition Modeling (моделювання методом наплавлення).

SLA – Stereo-lithography (стерео-літографія).

SLM – Selective Laser Melting (вибіркове (селективне) лазерне спікання).

SLS – Selective Laser Sintering (вибіркове (селективне) лазерне сплавлення).

DMT – Laser-aided Direct Metal Tooling (автоматизоване нанесення металів за допомогою лазера).

DLP – Digital Light Processing (цифрова обробка світлом).

RP – Rapid Prototyping (швидке прототипування).

RM – Rapid Modeling (швидке моделювання).

RT – Rapid Tooling (виробництво у швидкі терміни).

RPM – Rapid Prototyping & Manufacturing (швидке прототипування та виробництво).

ПЗ – програмне забезпечення.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА	15
1.1 Нинішній стан адитивного виробництва та сутність адитивних технологій	15
1.2 Синтез технологій адитивного виробництва	17
1.3 Основне обладнання адитивного виробництва	23
1.4 Програмне забезпечення макетування 3D-виробів із застосуванням адитивних технологій.....	29
1.5 Аналіз актуальності застосування адитивних технологій шляхом здійснення патентного пошуку	33
1.6 Витратні матеріали адитивного друку	36
1.6.1 Витратні матеріали технології друку FDM.....	37
1.6.2 Витратні матеріали технології друку SLA.....	40
1.6.3 Витратні матеріали технології друку SLS	41
1.7 Аналіз критеріїв оцінювання якості поліграфічної продукції	42
Висновки до першого розділу	44
2 ПРОМИСЛОВЕ ЗАВДАННЯ	46
2.1 Розгорнуте промислове завдання.....	46
2.2 Автоматизоване програмне забезпечення технологічних розрахунків 3D-продукції. 54	
Висновки до другого розділу.....	57
3 МЕТОДИКА ВИГОТОВЛЕННЯ 3D-ВИРОБІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	59
3.1 Особливості застосування адитивних технологій.....	59
3.2 Систематизація помилок точності отриманих поверхонь 3D-виробів та їх моделей ..	59
3.3 Процеси створення тривимірної моделі	63
Висновки до третього розділу	67
4 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ 3D-ВИРОБІВ	68
4.1. Параметри якості 3D-виробів, виготовлених із застосуванням адитивних технологій.....	68
4.2 Методика визначення параметрів якості поверхневого шару 3D-виробів.....	70
4.3 Контроль параметрів 3D-виробів, що виготовлені із застосуванням адитивних технологій.....	75
4.4 Методика обробки результатів експериментальних досліджень	77

Висновок до четвертого розділу.....	80
5. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ 3D-ВИРОБІВ ОТРИМАНИХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДРУКУ	81
5.1. Вплив режимів друку за адитивними технологіями на геометричні параметри 3D-виробів.....	81
5.2 Вплив режимів друку на шорсткість поверхонь 3D-виробів, що отримані із застосуванням адитивних технологій	93
4.3 Визначення оптимальних параметрів друку 3D-виробів за АТ	96
4.4 Розробка практичних рекомендацій з раціонального використання друку 3D-виробів за адитивними технологіями.....	99
Висновки до п'ятого розділу	99
6 ТЕХНОЛОГІЯ ЛАЗЕРНОГО ГРАВІЮВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ 3D-ОБЛАДНАННЯ	101
6.1 Загальна характеристика технології лазерного гравіювання	101
6.2 Лазерне гравіювання як спосіб сучасного маркування в поліграфії	103
6.3 Лазерне кольорове гравіювання	105
6.4 Вплив режимів лазерного гравіювання на якість отриманих оптичних показників ..	106
Висновок до шостого розділу	109
7 РОЗРОБКА СТАРТАП–ПРОЄКТУ «ЯКІСТЬ 3D-СУВЕНІРІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ АДИТИВНИМ СПОСОБОМ ДРУКУ»	110
7.1 Опис ідеї проекту	110
7.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	114
7.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	124
7.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	127
Висновки до сьомого розділу	130
ВИСНОВКИ	131
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	133

ВСТУП

В наш час адитивні технології стають невід'ємною частиною усіх галузей сучасного виробництва. Адже, технології 3D-друку дозволяють спроектувати полімерні вироби практично будь-якої складності і конфігурації та матеріалізувати її вже через кілька годин.

Хоча ці технології замають досить невеликий відсоток на масштабних виробництвах, проте часто використовуються для створення унікальної або індивідуальної продукції. Тут набули широкого застосування технології швидкого прототипування - Rapid Prototyping (RP), Rapid Modeling(RM), Rapid Tooling (RT), Rapid Prototyping & Manufacturing (RPM), тобто сформувалася ціла індустрія технологій адитивного виробництва, що складається з великої кількості методів виготовлення.

До списку сфер застосування адитивних технологій можна включати як архітектуру та інженерію, прототипування та робототехніку, мистецтво та дизайн, так і автотранспорт та харчову промисловість, рекламну та сувенірну галузь.

Тривимірна графіка вже щільно вступила у сучасне повсякденне життя. Прикладом цього може бути як вулична реклама, так і кадри гостросюжетного серіалу, що заздалегідь продумані та відтворені фахівцями 3D-графіки.

Враховуючи особливості зразків 3D-продукції, що в подальшому можуть застосовуватись у вищезазначених галузях, важливо обирати оптимальні режими друку, щоб покращити їх якість і скоротити час на пост обробку.

Вітчизняні та іноземні здобутки у сфері 3D-друку за останні роки дають змогу суттєво розширити номенклатуру матеріалів, що використовуються в 3D друці.

Таким чином на ринку 3D-друку представлено три основні види обладнання, що друкують: пластиками, фотополімерами, металами.

Найефективнішим видом друку для сфери рекламно-сувенірного напрямку сьогодні визначено друк пластиком та різними видами фотополімерів.

Сувеніри сучасності можуть мати найрізноманітнішу форму справжніх предметів, антикваріатів, брелків, мініатюрних копій визначних пам'яток, логотипів,

персонажів, прикрас та іншого, адже реклама служить потужним інструментом у процесі маркетингу.

Нажаль, отримати ідеальні поверхні та розміри деталі відразу після 3D-друку не можливо. Якість 3D-виробів залежить від багато факторів, починаючи від налаштувань та режимів друку, закінчуючи особливостями матеріалів та впливом зовнішнього середовища.

Актуальність теми магістерської дисертації пов'язана з тим, що на сьогоднішній день виробництво сувенірної продукції, із застосування адитивних технологій, з кожним роком стає все більш затребуваним в області рекламного ринку, зростає і конкуренція на ринку серед підприємств, які виробляють сувенірну продукцію цього типу, що підвищує вимоги до якості товарів даного виду. Разом з тим, дослідження щодо підвищення якості 3D-виробів рекламно-сувенірної галузі є також затребуваним напрямком роботи.

Метою дослідження визначено розробку рекомендацій щодо створення 3D-виробів рекламно-сувенірної галузі; встановлення відповідних налаштувань обладнання для здійснення якісного адитивного друку, вибору оптимальних режимів та матеріалів 3D- друку.

Відповідно до мети окреслено основні завдання щодо підвищення точності виготовлення 3D-виробів рекламно-сувенірної галузі за теоретичними та експериментальними дослідженнями:

- аналітичний огляд сучасного стану та аналіз технологій створення 3D-виробів; проведення патентного пошуку на тему «3D printing»; здійснення класифікації адитивних технологій виготовлення 3D-сувенірів; вибір обладнання для здійснення виробничих процесів щодо виготовлення 3D-виробів; розроблення ескізних креслень і 3D-моделей сувенірної продукції, розробка рекомендацій по підготовці 3D-моделей в середовищі програмного пакету для створення тривимірної комп'ютерної графіки Blender; аналіз ринкових можливостей запуску стартап проєкту; розроблення маркетингової програми стартап проєкту.

Об'єктом дослідження є адитивні технології виготовлення рекламно-сувенірної продукції.

Предметом дослідження є параметри технологічного процесу друку індивідуальної рекламно-сувенірної продукції із дослідженням показників якості.

Дослідження якості технологічного процесу по виготовленню 3D-сувенірів відбувалось методом визначення шорсткості поверхні та її якості за допомогою профілометра MarSurf PS1 та інструментального мікроскопу БМІ-1.

Мікрометр МК1 0-25 було використано для визначення розмірів досліджуваних зразків.

Засоби програмного пакету тривимірної комп'ютерної графіки Blender використано для створення тривимірної моделі експериментальних зразків; для друку на 3D-принтері XYZprinting Da Vinci 1.0 PRO (3F1AWXEU00B) використано універсальний програмний продукт XYZ maker Suite, до складу якого входить повний спектр інструментів для підготовки тривимірних моделей та друку; для аналізу залежності показників шорсткості від технологічних параметрів процесу виробництва використано набір ПЗ MathCad через можливість імпортування вхідні данні практично з будь-яких джерел (Excell, баз даних текстових файлів, тощо) та простоти налаштування при побудові графіків.

В процесі виконання магістерської дисертації використовуються методи статистичного та регресійного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Здійснено розробку теоретичної залежності режимів роботи 3D-принтера на точність 3D-сувенірів, що здійснюють вплив в процесі адитивного друку.

2. Досліджено технологічні параметри, що здійснюють вплив в процесі адитивного друку на точність геометричних розмірів 3D-сувенірів, виготовлених за допомогою адитивних технологій.

3. Проаналізовано закономірності щодо виникнення шорсткості поверхневого шару 3D-сувенірів, що залежать від технологічних параметрів процесу адитивних друку.

4. Визначено існуючі зв'язки щодо утворення поверхневого шару 3D-сувенірів, що залежать від режимів друку 3D-обладнання.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Поліпшено параметри технології друку на 3D-обладнанні із застосуванням FDM методу.

2. Розроблено послідовність операцій, необхідних для вимірювання шорсткості поверхневого шару у відповідності до зміни режимів друку на 3D-обладнанні.

3. Одержано технологічні рекомендації для щодо утворення поверхневого шару 3D- виробів із полімерних матеріалів.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень заплановано до оприлюднення на онлайн-хабові «Сучасні технології цифровізації суспільства», січень, 2023

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1 Нинішній стан адитивного виробництва та сутність адитивних технологій

В Україні галузь поліграфічного виробництва за останні роки досить розширила асортимент продукції, що виготовляється, але разом з тим підвищення ефективності виробничих потужностей потребує нових підходів, врахування додаткових факторів при виборі обладнання та технологій [9].

Перед підприємствами поліграфічної сфери рекламно-сувенірного спрямування поставало питання щодо спрощення і зниження вартості виготовлення поліграфічних виробів, або їх складових частин й водночас покращення їх якісних показників та конструктивних характеристик.

Окрім звичайних показників продуктивності та якості необхідно врахувати додаткові вимоги до оптимізації виробництва. Впровадження адитивних технологій, за рахунок пошуку нових рішень, дає можливість втілення принципів оптимізації.

Основними оптимізаційними рішеннями являються: раціональний вибір методу обробки 3D-виробів (застосування сучасних методів, котрі знижують собівартість обробки), раціональні рішення щодо технологічного процесу виготовлення 3D-виробів (зменшення кількості операцій, або заміна робочих місць на автоматизовані, що дозволяє економити на кваліфікації працівників), оптимізація додрукарських процесів по роботі із 3D-виробами.

Саме ці методи дозволяють задовольнити вимоги сучасних виробництв із застосуванням адитивних технологій у зменшенні витрат часу та собівартості 3D-виробів, а також підвищенні строку їх експлуатації.

Використання адитивних технологій є одним з найкращих прикладів того, як нові розробки і пристрої можуть значно покращити традиційні методи виробництва деталей та моделей і задати стрімкий розвиток сучасних галузям виробництва.

Сутність адитивного виробництва передбачає повний технологічний процес по створенню тривимірних об'єктів різної групи складності та довільної геометричної форми, що опирається на цифрову 3D-модель [17,18,19].

В свою чергу технологія 3D-моделювання базується на концепції побудови об'єкта шляхом послідовного нанесення шарів матеріалу, які повторюють контур моделі. У порівнянні із лазерним гравіюванням 3D-друк є протилежним методом отримання виробів, адже при гравіюванні формування деталі відбувається за рахунок видалення зайвого матеріалу [1,2,3].

На рисунку 1.1 подано узагальнену схему основних методів адитивного виробництва, що застосовуються у поліграфічній сфері.

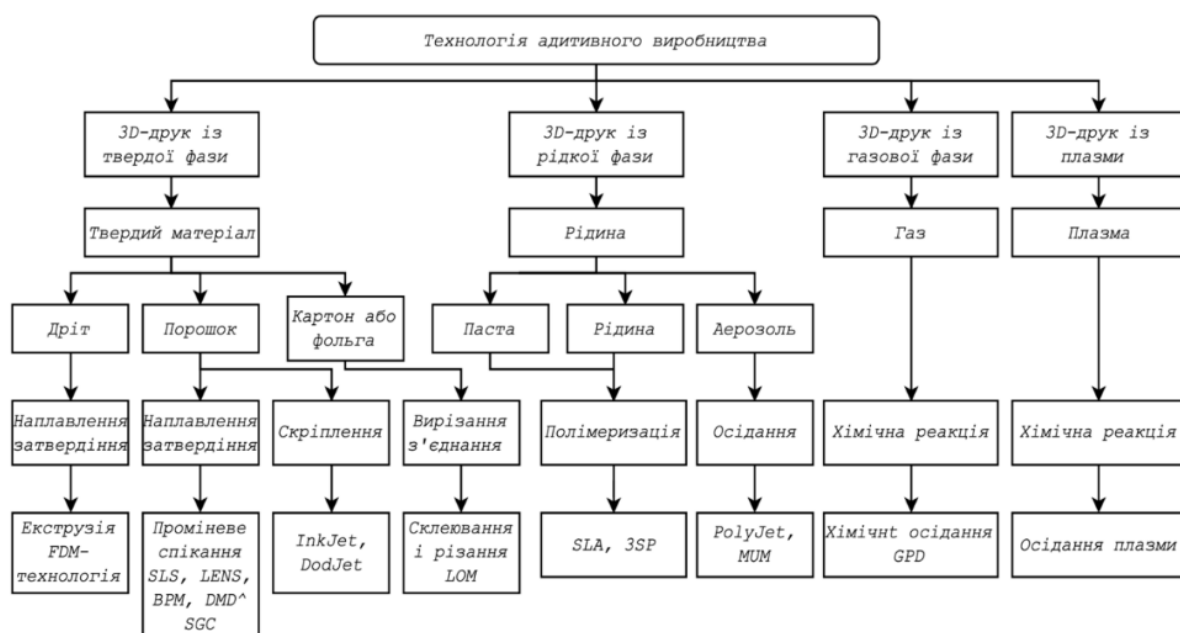


Рисунок 1.1 — Узагальнена класифікація основних методів адитивного виробництва

Одним з ефективних напрямків розвитку адитивних технологій в рекламно-сувенірній промисловості є методи виготовлення поліграфічних виробів на 3D-принтерах. При цьому точність та якість виготовлення 3D-моделей та 3D-сувенірів залежить від виду рекламно-сувенірної продукції, вибору методу друку і витратних матеріалів матеріалу.

1.2 Синтез технологій адитивного виробництва

Серед новітніх методів, що найбільш затребувані у галузі рекламного-поліграфічного виробництва можна виділити наступні [14, 20]:

- Друк способом спікання і плавлення матеріалів (FDM).
- Фотополімеризація — затвердіння полімеру ультрафіолетовим або лазерним випромінюванням (SLA або STL).
- Ламінування — склеювання шарів матеріалу з подальшим вирізанням
- Екструдкування — вичавлювання розплавленого матеріалу.

Сувенірні вироби, що можна надрукувати за допомогою сучасних 3D-принтерів (рис 1.2):

Мініатюрні фігурки людей. Це може бути як герой того чи іншого твору, комп'ютерної гри, так і реально існуюча людина. Таким чином отримується оригінальний сувенірний продукт.

Предмети для декорування інтер'єру. Це може бути як класична ваза, так і складна, унікальна скульптура, яка може стати справжнім арт-об'єктом в будинку або квартирі.

Акcesуари для телефону. Надрукувати можна різні підставки та чохли. Такі сувеніри зазвичай цінуються завдяки практичності та необмеженому терміну придатності.

Посуд. По своїй функціональності виготовлений посуд не буде відрізнятися від звичайних аналогів, але застосування 3D-принтеру дає можливість експериментувати з розмірами, формою, кольорами та іншими параметрами, що дозволяє створити індивідуальну річ.

Прикраси. Це може бути унікальна біжутерія або чоловічі надруковані запонки.



Рисунок рис 1.2 — Рекламно-сувенірна продукції із застосуванням АТ

Fused Deposition Modeling (FDM) або в перекладі – моделювання методом наплавлення – являється найбільш розповсюдженою технологією 3D-друку.

FDM технологія у поліграфії набула великого розповсюдження з декількох причин. Перш за все, це одна з найперших запатентованих технологій пов'язаних з адитивним рекламно-сувенірним виробництвом і 3D друком в цілому. Також за принципом друку вона є найпростішою, тому не вимагає великих капіталовкладень при впровадженні на поліграфічних підприємствах. Перевагою є і те, що на сьогодні існують готові комерційні рішення для практично в будь-якій ціновій категорії.

Додрукарські операції, наприклад макетування поліграфічного виробу, не вимагають від спеціалістів видавничо-поліграфічної галузі особливих знань, так як програми 3D-моделювання працюють аналогічно до програмного забезпечення щодо роботи із графічними файлами.

Широке застосування у оперативній поліграфії також викликано і тим, що на ринку витратних матеріалів представлено широкий вибір марок пластиків для 3D-друку, що дозволяє обрати матеріал, який найкраще підходить вимогам до готової моделі.

Принцип друку методом спікання і плавлення матеріалів (FDM) подано на рисунку 1.3.

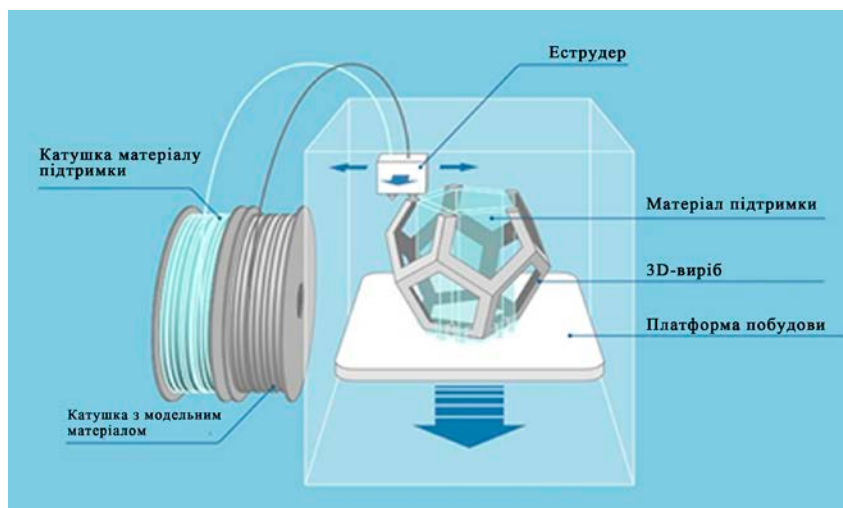


Рисунок 1.3 — Принцип друку методом спікання і плавлення матеріалів (FDM) [54]

Технологію друку поліграфічного виробу за методом спікання можна описати наступним чином: витратний матеріал подається з катушок в екструдер, де розігрівається до температури плавлення, далі за допомогою сопла з точним отвором малого діаметру пластик екструдується на платформу-столик при цьому сопло робить переміщення по площині виконуючи команди керуючої програми, після закінчення нанесення першого шару, екструдер піднімається вгору на величину товщини шару і процес повторюється [26].

Зазначимо, що FDM технології дозволяють друкувати практично будь-яким пластиком.

Наприклад, на початку становлення цієї технології ентузіасти використовували пластик для мото-косарок, адже на той момент це був практично єдиний матеріал, що можна було придбати у вигляді гнучкого прутка з підходящим для використання у 3D-принтері діаметром.

Зважаючи на вищесказане, варто узагальнити переваги та вказати на недоліки FDM технології при виготовленні поліграфічних виробів (рис 1.4):

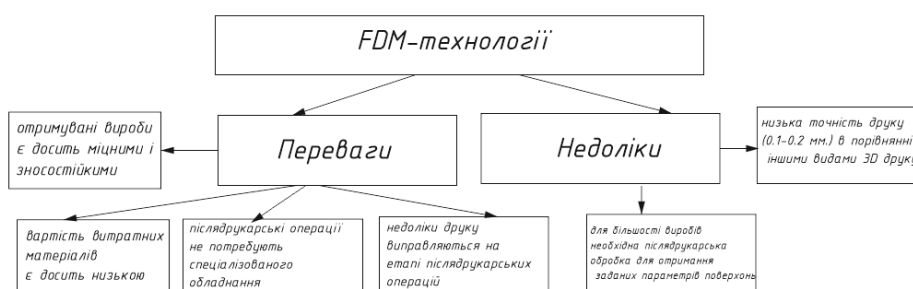


Рисунок 1.4 — Узагальнена схема переваг та недоліків FDM технології [54]

Для друку сувенірної продукції найбільш розповсюдженими є наступні види пластиків (рис.1.5):

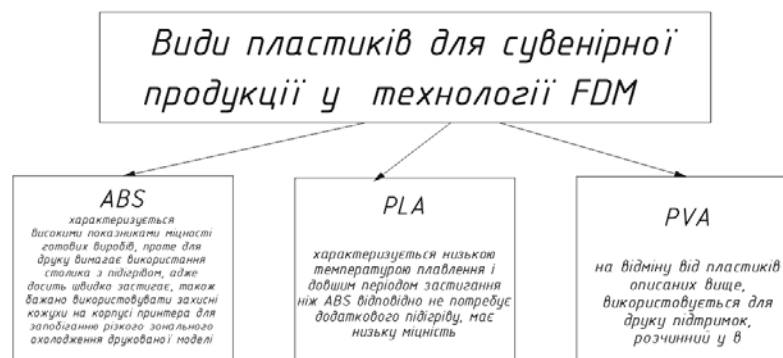


Рисунок 1.5 — Схема витратних матеріалів для виготовлення сувенірних виробів FDM технології [43]

Зважаючи на вищезазначені переваги та враховуючи висвітлені недоліки FDM технології для виготовлення рекламно-сувенірної продукції із застосуванням адитивних технологій, було використано пластик типу PLA.

Більш дорожчою для виготовлення рекламно-сувенірних виробів та для впровадження у діяльність поліграфічних підприємств вважається технологія — Stereo-lithography (SLA або STL) в перекладі українською стерео-літографія.

В процесі друкарських операцій використовується рідкий фото-полімер, який застигає під дією лазерного випромінювання. Витратні матеріали, як саме друкарське обладнання, що дає можливість використовувати SLA технологією набагато дорожчі у порівнянні із FDM друком. Використання лазерних систем вимагає набагато вищих навичок оператора друкарського обладнання, підвищує небезпеку використання.

За технологією SLA друкарські операції здійснює за схемою, що подано рисунку 1.6.

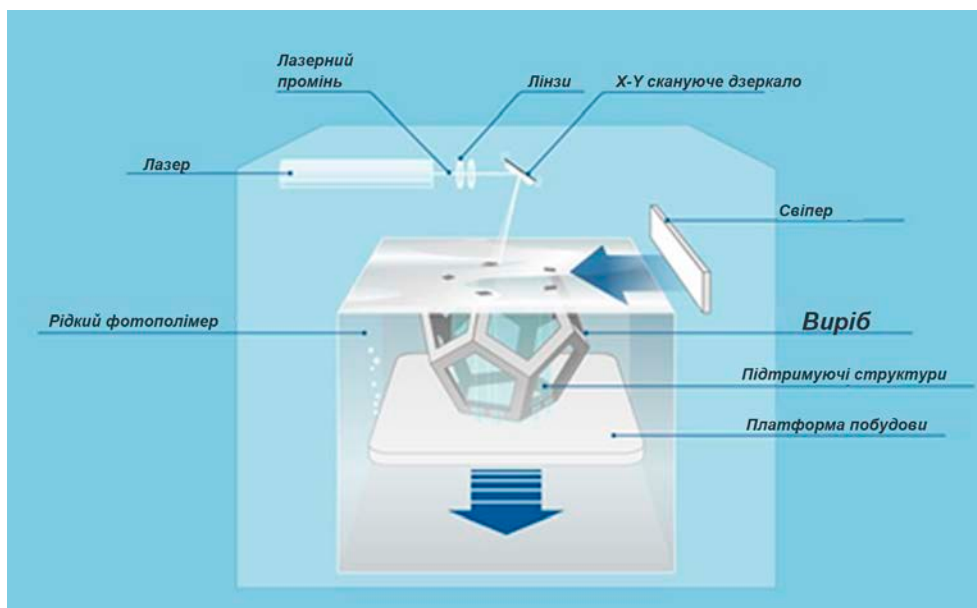


Рисунок 1.6 — Принцип виготовлення сувенірів за технологією SLA [10]

Суть операцій полягає в наступному: у ванну з рідким полімером вміщується платформа і занурюється на певну глибину, таким чином, щоб відстань від поверхні цієї платформи до поверхні рідкого полімеру становила задану товщину шару матеріалу. Далі лазер за допомогою системи наведення, що керована спеціалізованим ПЗ, взаємодіє із полімером викликаючи тим самим його затвердіння в заданих точках поверхні. Після цього платформа опускається на відстань одного шару вниз, свіпер розрізняє поверхню фото полімеру, прибираючи при цьому зайвий шлак, процес повторюється до тих пір поки модель не буде повністю виготовлена. Основні переваги та недоліки вищезазначеного методу наведено на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 — Узагальнена схема переваг та недоліків SLA технології [10]

Для виготовлення поліграфічних сувенірних виробів, таких як медалі, металеві прикраси, статуетки використовуються адитивні технології – Selective Laser Sintering (SLS), що в перекладі – вибіркоче лазерне спікання та Selective Laser Melting (SLM) – вибіркоче лазерне сплавлення. За принципом роботи технології дуже схожа на SLA проте тут замість фотополімеру використовують низько дисперсні порошкові (зазвичай металеві або металовмісні) матеріали.

Отримувані таким методом рекламно-сувенірні вироби є досить міцними. SLM технологія дозволяє використовувати порошкові метали і сплави включаючи нержавіючу сталь, інструментальні сталі, кобальт- хромові сплави, титанові сплави, титан, алюміній, золото, платину.

На рисунку 1.8 подано принцип здійснення друкарських операцій методами SLS та SLM.

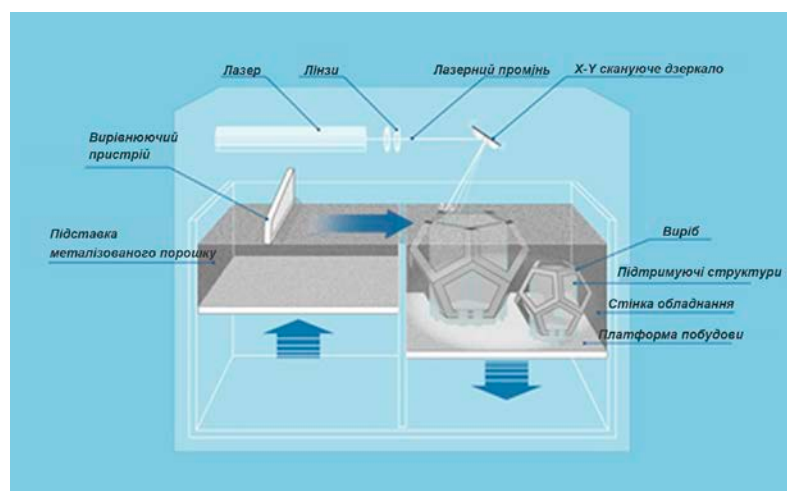


Рисунок 1.8 — Принцип виготовлення сувенірів за технологіями SLS та SLM [11]

До переваг застосування цього методу у поліграфічному виробництві відносять:

- можливість виготовлення складних за формою деталей без виготовлення дорогої оснастки;
- виготовлення виробів з внутрішніми пустотами;
- скорочення витрат матеріалу привиробництві.

Узагальнена схема принципів виготовлення сувенірів за технологіями SLA, SLS, FDM наведено на рисунку 1.9, а, б, в.

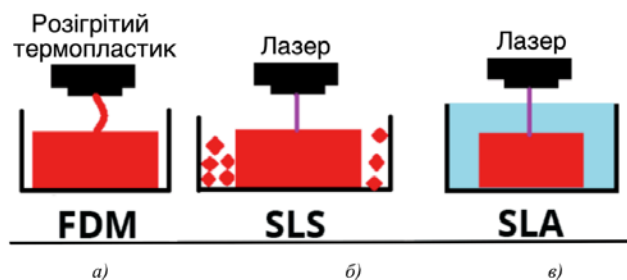


Рисунок 1.9 — Виготовлення сувенірів за технологіями:

а – SLA, *б* – SLS, *в* – FDM

1.3 Основне обладнання адитивного виробництва

Основним обладнанням для забезпечення технологій адитивного виробництва є 3D-принтери, що класифікують за наступними ознаками (рис 1.10):

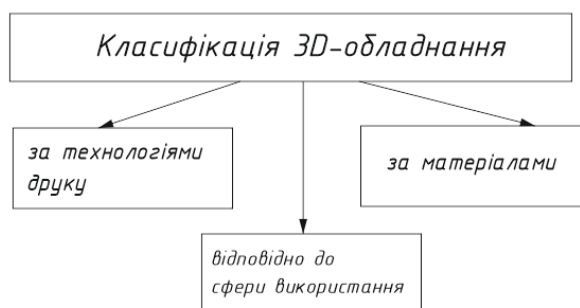


Рисунок 1.10 — Класифікація 3D-обладнання [14]

Класифікація 3D-обладнання щодо технологій друку детально розглянута у пункті 1.2.

Однак, 3D-принтери, ще можна класифікувати виходячи з функціональних можливостей та відповідно до сфери їх використання. На ринку такого обладнання представлена велика кількість різноманітних моделей, що відрізняються один від одного як за ТТХ так і за видами кінематики, що використовується. Таким чином 3D-принтери можна розділити на 3 групи (рис.1.11).

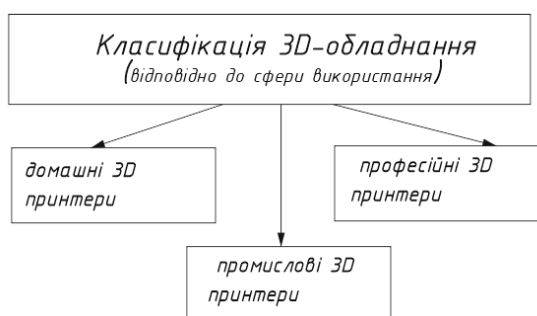


Рисунок 1.11 — Класифікація 3D-обладнання відповідно до сфери використання [14]:

3D-обладнання у вигляді узагальненої таблиці класифікації відповідно до сфери використання наведено в таблиця 1.1.

Таблиця 1.1 — Класифікація 3D-обладнання відповідно до сфери використання [18]

Група 3D-обладнання	Метод друку	Технологія друку	Витратні матеріали
Домашні 3D-принтери	Екструзійний	Моделювання методом пошарового наплавлення (FDM або FFF)	Термопластики (такі як полілактид (PLA), акрилонітрилбутадієнстирол (ABS) та ін.)
	Ламінування	Виготовлення об'єктів методом ламінування	Папір, металева фольга, пластикова плівка
	Струменевий	Струменевий тривимірний друк (3DP)	Гіпс, пластики, металеві порошки, піщані суміші
Професійні 3D-принтери	Дротовий	Виробництво довільних форм електронно променевим плавленням (EBF)	Майже будь-які металеві сплави
	Полімеризація	Стереолітографія (SLA)	Фотополімери
		Цифрова світлодіодна проекція (DLP)	Фотополімери
Промислові 3D-принтери	Порошковий	Пряме лазерне спікання металів (DMLS)	Майже будь-які металеві сплави
		Електронно-променеве плавлення (EBM)	Титанові сплави
		Вибіркове лазерне плавлення (SLM)	Титанові сплави, кобальт хромові сплави, нержавіюча сталь, алюміній
		Вибіркове теплове спікання (SHS)	Порошкові-термопластики
		Вибіркове лазерне спікання (SLS)	Термопластики, металеві порошки, керамічні порошки

Перша група класифікації 3D принтерів – це моделі, що адаптовані для домашнього (офісного) використання, мають невеликі габарити монтажного столу для друку та максимальної висоти друку.

При порівнянні цих моделей з іншими із вищезазначеної класифікації можна виділити наступні характеристики [19]:

- низька точність друку;
- необхідність постійного калібрування;
- низька потужність, якої вистачає лише для друку малогабаритних виробів;
- максимально простий інтерфейс взаємодії з користувачем.

Витратними матеріалами для принтерів такого типу є термопластмаси типу ABS та PLA, рідше SLA з використанням найбільш розповсюджених фотополімерних смол. Технологія здійснення друкарських операцій – FDM.

3D-обладнання із складними та дорогавартістними технологіями адитивного виробництва, наприклад друк металами, не використовується в домашніх умовах.

Одним із найбільш затребуваних представників даного типу можна вважати 3D-принтер моделі «Wanhao Duplicator i3 PLUS».

До основних переваг використання моделі «Wanhao Duplicator i3 PLUS» можна віднести:

- автоматичне налаштування рівня друку,
- продовження друку після збою електроживлення;
- металеві запчастини для роботи з більшою температурою.

Український ринок споживачів за співвідношенням ціна-якість надав цій моделі одну із позицій топів продажу.

Модельний ряд 3D-принтерів «Wanhao Duplicator i3 PLUS» має наступні технічні характеристики [54]:

- робоча площа 200x200 x180 мм;
- діаметр сопла 0,4 мм;
- діаметр використовуваного пластика 1.75мм;
- кількість екструдерів один;
- платформа з підігрівом, робоча температура 60-100°C;

- максимальна висота деталі що друкується 180мм;
- максимальна швидкість переміщення сопла в площині XY 150 мм/с
- швидкість екструзії 100 мм/с;
- діапазон робочих температур екструдера від 190°C до 260°C.

Представником цієї ж категорії є і 3D-принтер від виробника «XYZ» модельного ряду «da Vinci 1.0 Pro 3-1», що був використаний для друку сувенірів на базі переддипломної практики. Це мобільна робоча станція, що підтримує G-коди та має можливість друкувати по бездротовій мережі, що є зручним для оперативної поліграфії.

Модель 3D-обладнання «da Vinci 1.0 Pro 3-1» має наступні технічні характеристики [52]:

- робоча площа 200x200 x190 мм;
- діаметр сопла 0,2 – 0,4 мм;
- діаметр використовуваного пластика 1, 75мм;
- кількість екструдерів – один;
- платформа з підігрівом, робоча температура 40 -90°C;
- максимальна висота деталі що друкується 190 мм;
- максимальна швидкість переміщення сопла в площині XY 150 мм/с
- швидкість екструзії 100 мм/с;
- роздільна здатність – 2140 пікселів/кв.см (13900 пікселів /кв.дюйм);
- діапазон робочих температур екструдера від 180°C до 240°C;
- точність позиціонування XY – X/Y 12,5 мкм;
- точність позиціонування Z – 0,0004 мм;
- додаткове обладнання – лазерний гравер;
- адитивна технологія – тріангуляція за допомогою лазерного перерізу;
- кількість лазерних голівок для гравіювання – одна;
- область гравіювання 200 x 200 мм;
- потужність гравіювання – 350 мВт ± 10%;
- довжина хвилі лазера – 406 нм + 8 нм;
- формати підтримуваних файлів для гравіювання: .jpg / .png / .gif / .bmp;

– формати підтримуваних файлів для друку: .stl, .3mf, .obj, .igs, .stp, .ply, .amf, формат XYZ (.3w), .nkg (.stl, .3w), G-код

Наступна група принтерів за класифікацією 3D-обладнання це – професійні 3D принтери. Вони можуть бути використані в домашніх умовах, але, зазвичай, сферами використання є невеликі поліграфічні підприємства або ювелірні майстерні. Це установки більш високого класу, їх можна використовувати як для швидкого прототипування, так і для виготовлення сувенірної продукції високої точності.

Конструктивно моделі даної групи оснащені кількома соплами, що дозволяють друкувати кількома різними матеріалами одночасно.

Серед таких 3D-принтерів заслужену популярність має CreatBot DX, це обладнання має збільшену область друку по осі Z і призначене для створення великогабаритних сувенірних виробів.

Модель 3D-обладнання модельного ряду «CreatBot DX» має наступні технічні характеристики [51]:

- робоча площа – 300x250мм;
- діаметр сопла – 0,4 мм з можливою заміною на інші розміри;
- діаметр нитки пластика – 3.00 мм (з можливістю використання нитки – 1.75 мм);
- кількість екструдерів – два, з можливістю встановлення третього;
- платформа з підігрівом, робоча температура – 60-100°C;
- максимальна висота деталі, що друкується – 520 мм;
- максимальна швидкість переміщення сопла в площині XY – 200 мм/с;
- швидкість екструзії – 120 мм/с;
- діапазон робочих температур екструдера від 190°C до 350°C.

Останні у класифікації зазначено промислове 3D-обладнання. Конструктивно таке обладнання може бути виконано у вигляді маніпулятора. Саме цей вид принтерів застосовують для друку металами. Вони не лише потребують ширшого бюджету для впровадження, а й вимагають спеціалізованих умов використання, висококваліфікованих спеціалістів при виконанні друкарських операцій та

габаритних окремих приміщень для розташування. Разом з тим, у порівнянні із іншими видами 3D-обладнання, мають найвищу точність друку.

Серед таких 3D-принтерів особливої уваги має Galaxy 500, це обладнання забезпечує швидку роботу з допомогою невеликих сопел (від 0,15 до 0,8 мм) і дозволяє використовувати будь-який тип пластику.

Модель 3D-обладнання модельного ряду «Galaxy 500» має наступні технічні характеристики [53]:

- робоча площа – 400x400 мм;
- конструкція закритої камери з підігрівом до 45°C;
- діаметр сопла – 0,15-0,8 мм;
- діаметр завантажуваного пластику – 1.75мм;
- кількість екструдерів – два;
- платформа – з підігрівом;
- робоча температура платформи – 60-140°C,
- матеріал платформи – гранітна плита;
- максимальна висота деталі, що друкується – 500мм;
- максимальна швидкість переміщення сопла в площині XY – 200 мм/с;
- швидкість екструзії – 150 мм/с (залежить від діаметра сопла);
- діапазон робочих температур екструдера до 295°C.

Під час вибору оптимальної моделі 3D-принтера, необхідно також враховувати його кінематичні особливості. Адже це суттєво впливає, як на кінцевий результат так і на точність друку. Безперечно, що для кожного виду виготовлення сувенірної продукції під терміном «якість друку» можна розглядати досить широкий діапазон значення – для одних поліграфічних виробів якісний виріб це тоді, коли дотримані всі її розміри і шорсткості поверхонь в межах допусків, для інших – за умови достатньої жорсткості або монолітності конструкції.

Звісно не всі кінематичні моделі дають гарні показники щодо якості друку, проте вони розширюють можливості 3D друку і дозволяють створювати конструкції, які з використанням інших кінематичних моделей отримати складно або дуже затратно.

Таким чином на сьогоднішній день найбільш масово використовують наступні чотири види кінематики (рис 1.12).

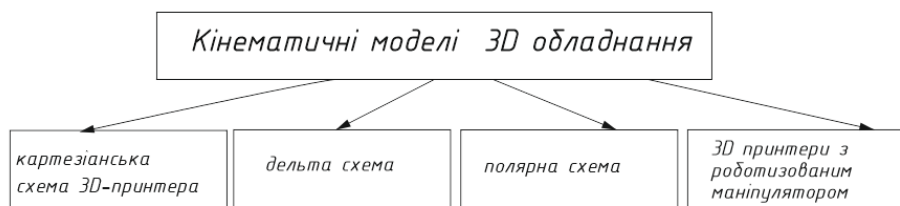


Рисунок 1.12 – Класифікація кінематичних моделей 3D-обладнання

Для забезпечення отримання якісного сувенірного виробу не менш важливим є і питання додрукарських операцій, а саме застосування систем 3D-моделювання.

Детальніше переваги та недоліки застосування програмного забезпечення для створення 3D-моделі розглянуто у пункті 1.4.

1.4 Програмне забезпечення макетування 3D-виробів із застосуванням адитивних технологій

Зважаючи на тенденції розвитку комп'ютерних графічних технологій, розуміння процесу створення тривимірного контенту в спеціалізованих системах є важливим компонентом повноцінного професійного надання поліграфічних послуг.

Програмне забезпечення (ПЗ), що використовується для 3D-друку можна поділити на чотири види (1.13)



Рисунок 1.13 – Класифікація програмного забезпечення для 3D-друку [24]

До першого виду програмного забезпечення щодо виготовлення або проектування 3D моделей, відносять конструкторські програми або програмні модулі, де проєктований об'єкт може створюється або з «нуля», або на сканері. Для отримання об'єкту скануванням обладнання має зовнішні датчики, що допомагають отримати 3D модель вже існуючого об'єкта.

Аналізуючи сучасне спеціалізоване програмне забезпечення, відзначимо достатньо велику кількість програм для створення і редагування 3D графіки. Серед найбільш поширених пакетів для роботи з тривимірними моделями необхідно назвати продукти компанії AUTODESK (3DS MAX, Maya, Mudbox, AutoCAD). Схожі за своєю суттю, проте відмінні за структурою інтерфейсу та можливостями є програми CINEMA 4D, MODO, LightWave.

Програма Blender 3D є потужним інструментом, який дозволяє поліграфічним підприємствам здійснювати якісне моделювання тривимірних комп'ютерних моделей у вигляді 3D-сувенірів із розкриттям текстуровання та анімуванням. Таким чином на додрукарському етапі по роботі із 3D-об'єктами втрати якості майбутніх 3D-сувенірів максимально виключено.

Ще одним видом програмного забезпечення, що забезпечує етап додрукарських операцій є програми-слайсери. Саме завдяки цьому ПЗ відбувається перетворення високо дискретного, полігонального 3D-сувеніру на набір 2D шарів, у вигляді команд G-code, зрозумілих для 3D принтера.

Порівняльна характеристика вищезазначеного програмного забезпечення (рис 1.13) за застосованою операційною системою, системними вимогами, кваліфікацією користувачів, доступністю користування подано у таблицях 1.2- 1.3.

Таблиця 1.2 — Порівняльна характеристика 3D-слайсерів [44]

Назва	ОС	Кваліфікація користувача	Доступність до використання
Cura	Windows, Mac, Linux	Новачки та просунуті користувачі	Безкоштовно
Slic3r	Windows, Mac, Linux	Просунуті користувачі та професіонали	Безкоштовно

Закінчення таблиці 1.3

Назва	ОС	Кваліфікація користувача	Доступність до використання
KISSlicer	Windows, Mac, Linux, Raspberry Pie	Новачки та просунуті користувачі	Умовно-безкоштовно
XYZmaker Suite	Windows, Mac	Новачки	Безкоштовно

Таблиця 1.3 — Порівняльна характеристика 3D-слайсерів за системними вимогами [44]

Назва	Процесор	Роздільна здатність дисплея	Об'єм затребуваного місця на жорсткому дискові, МБ	Об'єм необхідної оперативної пам'яті, ГБ	Графічна карта, сумісна з OpenGL 4.1 для 3D-шару
Cura	Intel Core i3	1920 x 1080	600	8	+
Slic3r	AMD Athlon 64	1480 x 720	700	4	+
KISSlicer	Intel Core i5	1920 x 1080	680	8	+
XYZmaker Suite	Intel Core i3	1280 x 720	600	4	+

Отже, програмне забезпечення XYZmaker Suite є потужним інструментарієм при роботі на поліграфічних підприємствах-початківців, що мають на меті здійснюють якісне виготовлення тривимірних комп'ютерних моделей у вигляді 3D-сувенірів. Таким чином на додрукарському етапі для роботи по поділу на відповідну кількість шарів за допомогою 3D-слайсеру обрано ПЗ – XYZmaker Suite (рис.1.6).

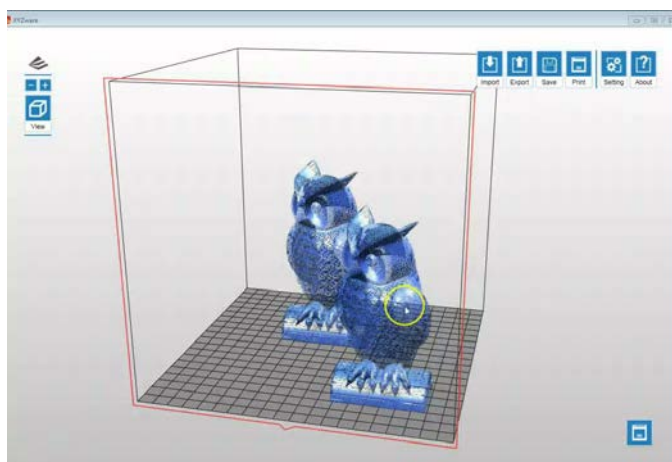


Рисунок 1.7 — Робоча зона 3D-слайсеру «XYZmaker Suite»

До третього виду ПЗ відноситься безпосередньо набір програмних компонентів, що керують друком: задають параметри температури, передають попередньо згенерований G-code на 3D-принтер, проводить калібровку принтера, тощо. Приклади такого програмного забезпечення наведено на рисунку 1.13.

При здійсненні друкарських операцій дослідних зразків 3D-сувенірів було використано ПЗ XYZmaker Suite, що містить інструменти, необхідні для встановлення температури (рис.1.8), передачі згенерованого G-code (рис.1.14) та проведення калібрування принтера (рис.1.15).

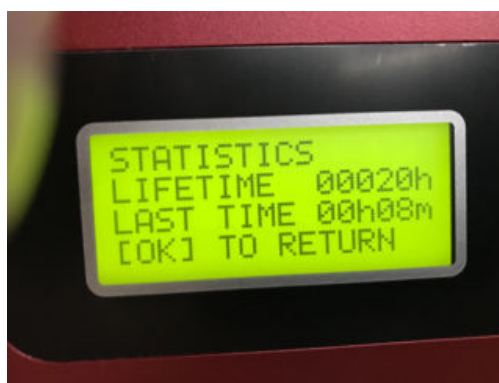


Рисунок 1.14 — Відображення параметрів часового проміжку виконання друку

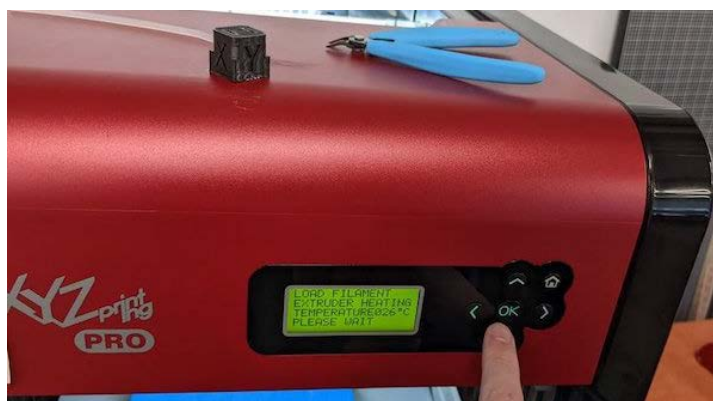


Рисунок 1.15 — Налаштування параметрів температурного режиму платформи



Рисунок 1.16 — Налаштування параметрів калібрування принтера

Останнім, четвертим видом є набір ПЗ для мікроконтроллера, що безпосередньо отримує команди від слайсера і керує механізмами принтера. Перетворюючи G-code в сигнали, що посилаються на двигуни, екструдери, та приводи подачі матеріалу. Додатковою задачею такого ПЗ є виставлення екструдера в «нулі» і його калібровка відносно столу [44].

Програмне забезпечення XYZmaker Suite включає до свого складу і четвертий вид комплекту програм, що керують механізмами принтера.

1.5 Аналіз актуальності застосування адитивних технологій шляхом здійснення патентного пошуку

Аналітичний огляд стану технологій 3D друку полягає в розробці регламенту пошуку, який відображає предмет і зміст пошуку, глибину (країни, класи МПК, роки) огляду, мету, джерела інформації [4,5,6].

В регламенті були розглянуті теми пошуку: 3D printing, device for 3D printing, multifunctional 3D printing device, 3D printing support structure and desing metod. Дані досліджень представлені в таблицях 1.4 – 1.7 відповідно.

Таблиця 1.4 – Регламент патентного пошуку за запитом «3D printing» [4]

Предмет пошуку	Мета пошуку	Держава пошуку	Класифікаційні індекси	Ретроспективність пошуку та джерела інформації
3D printing	Визначення актуальності застосування 3D друку	US, AU, GB, DE, FR, CA	B29C67/00; B33Y10/00; B29C41/32; B33Y30/00; B41F17/00;	2011-2022 Espacenet – search results

Таблиця 1.5 – Регламент патентного пошуку за запитом «Device for 3D printing» [5]

Предмет пошуку	Мета пошуку	Держава пошуку	Класифікаційні індекси	Ретроспективність пошуку та джерела інформації
Device for 3D printing	Визначення актуальності застосування пристроїв для здійснення 3D друку	US, AU, GB, DE, FR, CA	B29C64/112; B29C64/236; B29C64/241; B29C64/245; B29C64/321; B29C64/393; B33Y40/00;	2011-2022 Espacenet – search results

Таблиця 1.6 – Регламент патентного пошуку за запитом «Multifunctional 3D printing device»

Предмет пошуку	Мета пошуку	Держава пошуку	Класифікаційні індекси	Ретроспективність пошуку та джерела інформації
Multifunctional 3D printing device	Визначення актуальності застосування багатофункціональних пристроїв для здійснення 3D друку	US, AU, GB, DE, FR, CA	G07F17/26; B29C64/171; B29C64/20; B33Y10/00; B33Y30/00;	2011-2022 Espacenet – search results

Таблиця 1.7 – Регламент ПП за запитом «3D printing support structure and desing metod» [6]

Предмет пошуку	Мета пошуку	Держава пошуку	Класифікаційні індекси	Ретроспективність пошуку та джерела інформації
3D printing support structure and desing metod	Визначення актуальності застосування багатофункціональних пристроїв для здійснення 3D друку	US, AU, GB, DE, FR, CA	B29C64/40; B29C67/00; B33Y10/00; B33Y80/00;	2011-2022 Espacenet – search results

Аналізуючи дані мережі патентного пошуку «Espacenet» за кількістю тематичних запитів, можна зробити висновок, що кількість запитів за темою: «3D printing» в період з 2011 по 2022 роки складає 422 697, за темою «device for 3D printing» - 332 047, за темою «Multifunctional 3D printing device» - 10 445, за темою «3D printing support structure and desing metod» - 210 830.

Засобами програмного забезпечення по роботі із табличними даними здійснено графічну візуалізацію динаміки публікації патентів за ретроспективністю в 11 років. Результати подано на рисунка 1.17 -1.20 у вигляді діаграм .

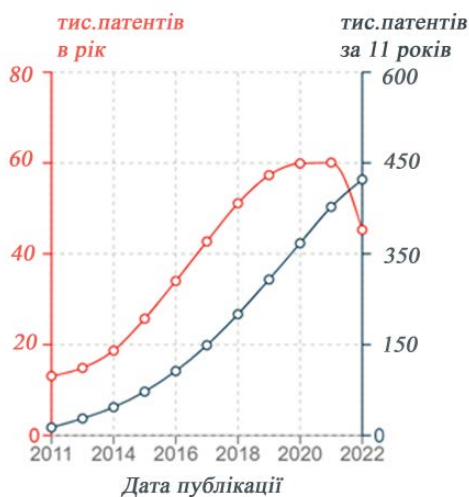


Рисунок 1.17 –Діаграма подання патентів за темою «3D printing» в період з 2011 по 2022 роки [4]

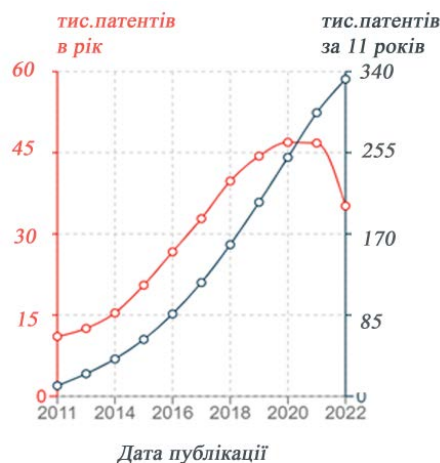


Рисунок 1.18 –Діаграма подання патентів за темою «Device for 3D printing» в період з 2011 по 2022 роки [5]

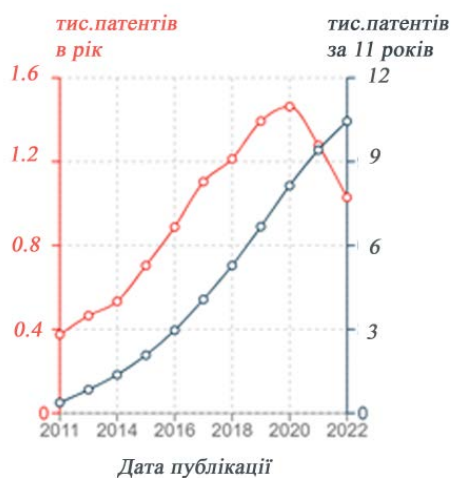


Рисунок 1.19 – Діаграма подання патентів за темою «Multifunctional 3D printing device» в період з 2011 по 2022 роки [6]

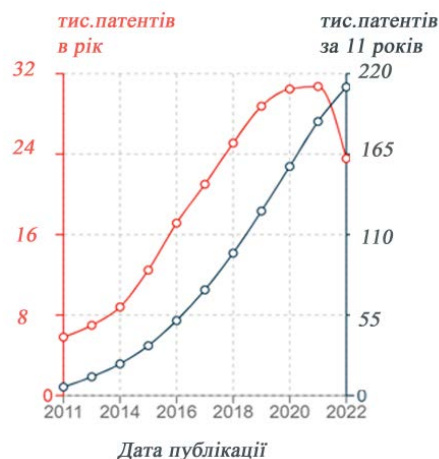


Рисунок 1.20 – Діаграма подання патентів за темою «3D printing support structure and desing metod» в період з 2011 по 2022 роки [6]

Відповідно до результатів побудованих діаграм слідує те, що кількість патентів по запитам: «3D printing», «Device for 3D printing», «Multifunctional 3D printing device» та «3D printing support structure and desing metod» в період з 2011 по 2020 стрімко зростав, а у 2021 році стабілізувався, що може вказувати на переважну більшість сформованих та стабільно дієвих технологій адаптивного друку. У 2022 році відбувся спад, який в першу чергу, пов'язаний із загальною світовою економічною кризою та широкомасштабним вторгненням на територію України, які зараз активно використовуються.

1.6 Витратні матеріали адитивного друку

Витратні матеріали для здійснення адитивного друку прийнято класифікувати за трьома категоріями (рис.1.21).

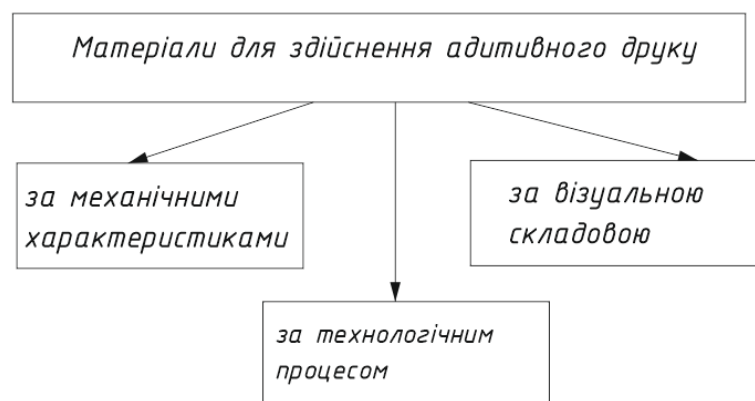


Рисунок 1.21 – Класифікація матеріалів адитивного друку [13]

Технологія FDM 3D-друку є найбільше розповсюдженою, тому вибір матеріалів саме для таких 3D-принтерів найширший. У світі сформувалась єдина класифікація матеріалів, якої дотримується більшість виробників.

Залежно від спеціалізації друку, витратні матеріали для FDM друку поділяються на декілька груп, кожна з яких призначена для визначеного типу виробів (рис 1.22).

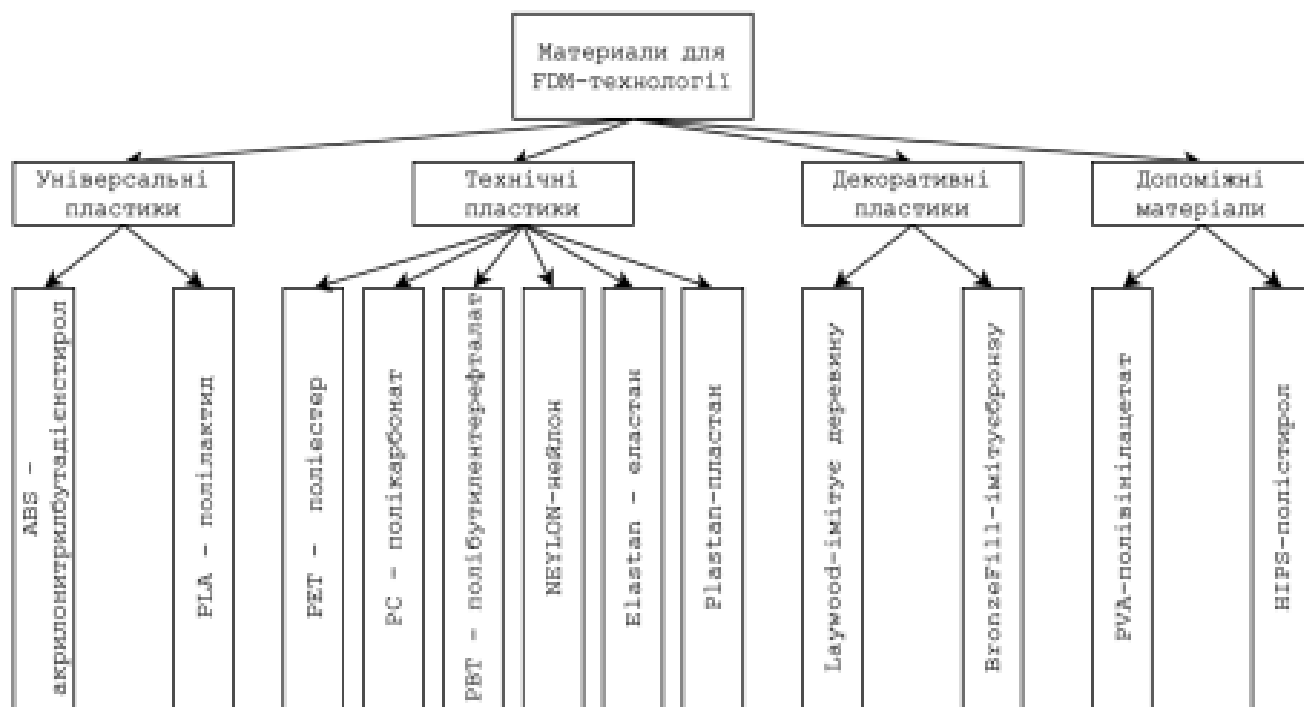


Рисунок 1.22– Схема класифікації витратних матеріалів FDM-технології [13]

1.6.1 Витратні матеріали технології друку FDM

Універсальні пластики загального призначення використовуються для створення виробів, що не зазнають значних механічних, термічних і інших видів навантажень.

Друк сувенірної продукції буде здійснюватись саме витратними матеріалами для FDM-друку, тому проведемо порівняння властивостей матеріалів FDM технології, для подальшого вибору потрібного полімеру, від якого залежатиме якість отримання сувенірного виробу [55].

Для зрозумілішої картини властивостей полімерів додамо деякі ключові критерії, від яких залежить вибір матеріалу (без урахування вартості та швидкості):

– Параметр «Складність друку» вказує на те, наскільки легко друкувати матеріал – максимальна швидкість друку, частота невдалих друків, точність, легкість подачі в принтер. Візуальна якість: наскільки добре виглядає готовий виріб. Параметр «Межа міцності» вказує на максимальне зусилля, яке виріб може витримати перед тим, як зламатися.

– Параметр «Міцність на розрив» вказує на максимальну довжина, на яку виріб розтягується перед розривом.

– Параметр «Опір удару» вказує на енергію необхідна для того, щоб зламати виріб різким ударом.

– Параметр «Адгезія шару» вказує наскільки хороша адгезія між шарами матеріалу. Це з ізотропією: що краще адгезія шару, то більш ізотропним буде виріб. Параметр «Вогневитривалість» вказує на максимальну температура, яку виріб витримує перед розм'якшенням та деформуванням.

PLA – поліактид – найпростіший полімер для друку, забезпечує гарну візуальну якість. Дуже жорсткий, досить міцний, але дуже крихкий. Переваги та недоліки зведено до таблиці 1.8.

Пластики типу ABS застосовуються замість PLA, у випадках, коли 3D-сувенірам потрібно забезпечити стійкість до високої температури, а також більшу твердість.

PET – поліетилентерефталат – трохи м'якіший полімер, який широко поширений і має цікаві додаткові властивості з кількома недоліками.

Nylon – має високі механічні властивості і кращу ударостійкість. Однак адгезія шарів проблематична.

TPU — головним чином використовують для гнучких виробів, але його дуже високий опір удару може знайти незвичайне застосування.

PC – найміцніший матеріал з усіх, може бути цікавою альтернативою до ABS, оскільки їх властивості досить схожі.

Сформуємо таблицю 1.8 порівняльних характеристик витратних матеріалів для FDM-друку.

Таблиця 1.8 Порівняльна характеристика витратних матеріалів для FDM-друку [55]

Матеріал	Переваги	Недоліки
PLA	Біорозкладний	Низька вологостійкість
	Без запаху	Важко склеюється
	Можна обробляти шліфувальним папером та фарбувати акрилом	
	Стійкість до ультрафіолету	
ABS	Можлива пост обробка парами ацетону для надання глянцю	Чутливість до ультрафіолету
	Можна обробляти шліфувальним папером та фарбувати акрилом.	Запах під час друку
	Можна використовувати ацетон як клей	Потенційно шкідливі виділення
	Хороша зносостійкість	
PET	Можна використовувати з харчовими продуктами	Важче ніж PLA та ABS
	Висока вологостійкість	
	Висока хімічна стійкість	
	Піддається переробці	
Nylon	Хороша хімічна стійкість	Поглинає вологу
	Висока міцність	Потенційно шкідливі виділення
TPU	Хороша зносостійкість	Складність пост обробки
	Хороша стійкість до олії та мастила	Важко склеюється
PC	Піддається стерилізації	Чутливість до ультрафіолету
	Легкість пост обробки (шліфування)	

Для узагальненого порівняння властивостей витратних матеріалів для FDM-друку створено графік , який представлено на рисунку 1.23, де кожен матеріал був

оцінений за вищезазначеними критеріями (рис.1.23) за шкалою від 1 (низький) до 5 (високий) [14].



Рисунок 1.23– Розподіл оцінки матеріалів за критеріями [14]

Вибір правильного виду полімеру має вирішальне значення для отримання затребуваних замовником властивостей 3D-сувеніру, особливо, якщо сувеніри матимуть довготривале функціональне застосування.

1.6.2 Витратні матеріали технології друку SLA

Матеріали для SLA-друку мають найширший вибір [4].

SLA-матеріали виготовлені на основі термореактивних смол, різних за складом, кожна з яких розроблена з урахуванням характеристик звичайних пластиків. Найвища температурою експлуатації 238 °С.

На рисунку 1.24 зображено узагальнене схема класифікації термореактивних смол.

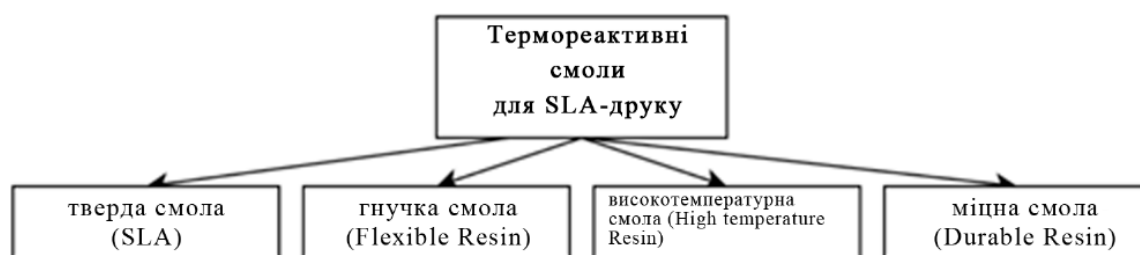


Рисунок 1.24 – Схема класифікації термореактивних смол [4]

Кожна класифікаційна назва використаної смоли у складі SLA-матеріалів відображає найбільш важливі характеристики матеріалу, його гнучкість, міцність, візуальну якість, адгезивність шарів, вогневитривалість, тощо.

На принтерах SLA доступний друк з найширшим вибором біосумісних матеріалів для стоматології та медицини.

На рисунку 1.25 представлено іншу класифікацію витратних матеріалів, які використовуються при технології SLA-друку, орієнтовану на подальшу сферу застосування виробів.

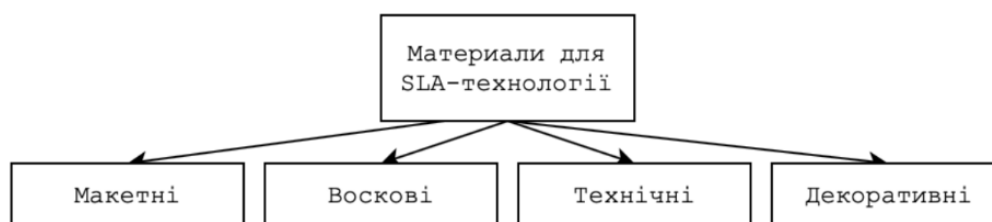


Рисунок 1.25 – Класифікація витратних матеріалів SLA-технології [4]

1.6.3 Витратні матеріали технології друку SLS

Найбільш широко застосованим матеріалом для технології друку SLS є поліамід (PA 12), ще відомий як нейлон 12, але він також може являти собою поліпропілен, алюмінідів, амід вуглецю, PEBA, PA 11, PEEK [13].

Ще викликано тим, що серед основних властивостей матеріалу визначено: механічну стійкість, біосумісність, гіпоалергенність, стійкість до ультрафіолетового впливу, жорсткість. Нейлон 12 підходить для SLS друку стандартних виробів, до характеристик яких не висувають суворих вимог. Нейлон 11 підходить для виробництва прототипів і деталей з підвищеним коефіцієнтом зносостійкості і пластичності.

Вказані матеріали — однокомпонентні. SLS технологія 3D друку також передбачає використання порошків, які складаються з двох компонентів. Це може бути полімерна основа і додаток, який надає виробу більшої міцності, гнучкості та інших потрібних характеристик.

Також можна додавати до матеріалів інші добавки, такі як вуглецеві волокна, скляні або алюмінієві волокна, тим самим покращуючи механічні характеристики деталей.

1.7 Аналіз критеріїв оцінювання якості поліграфічної продукції

3D-друк зараз користується великою популярністю. 3D-друк може здійснюватися різними способами і з використанням різних матеріалів, але у будь-якому випадку в основі лежить принцип пошарового створення (вирощування) твердого об'єкту.

Вимоги до якості 3D-друку з описаними стандартами (які, до речі, є на стадії розробки) зводяться в декілька технологічних груп (рис 1.26)

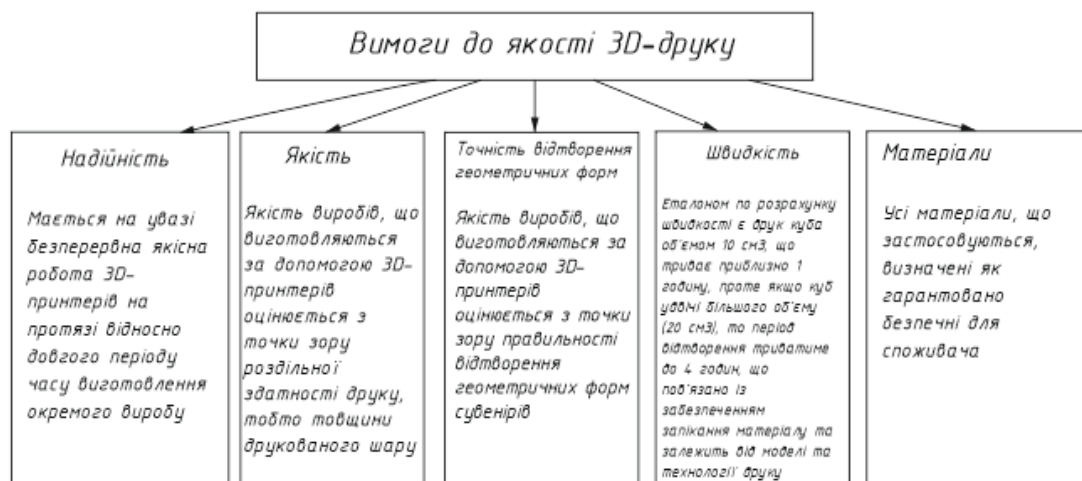


Рисунок 1.26 – Класифікація вимог до якості 3D-друку [42]

Ряд параметрів, що впливатимуть на якість отримання поліграфічного виробу методом 3D-друку можна оцінити в абсолютних величинах (рис.1.27).

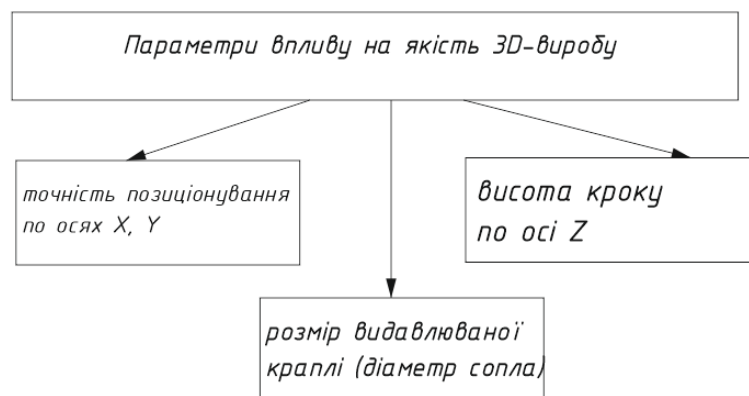


Рисунок 1.27 – Класифікація параметрів впливу на якість виробів [42]

Параметр точності позиціонування по осях X, Y вказує на те, на скільки вірно переміститься друкуюча голівка 3D-принтера відносно заданих комп'ютером координат. Точність позиціонування варіюється в межах близько 6-30 мікрон;

Параметр висоти кроку по осі Z – це крок механічного приводу, який опускає платформу з моделлю. Орієнтовний показник – до 2,5 мікрона.

Проте це не означає, що висота шару при друці буде всього 2,5 мікрони. На висоту шару впливає цілий ряд фізичних обмежень, які не дозволяють створювати шари такого малого розміру. Слід враховувати також і розмір розплавленої в'язкої краплі матеріалу з екструдера.

Відповідно до чисельних експериментів FDM 3D-друку, оптимальний показник висоти шару складає – 200 мікрон. Саме така висота дозволяє краплі утворюватись досить великою, щоб склеїтися з попереднім шаром і надійно зафіксуватися на поверхні. Разом з тим цілком прийнятною є висота шару 100 мікрон, та це призводить до збільшення часу друку і роблять об'єкт більш крихким. Зазначимо, що описані в технічних характеристиках 100, 50 чи то 20 мікрон – це може бути не точність позиціонування, і не точність друку, а усього лише висота віддрукованого шару;

– розмір краплі (діаметр сопла). Реальний розмір «точки» на створюваній 3D-моделей набагато більше залежить від діаметру отвору сопла екструдера, чим від висоти шару. Практика показує, що оптимальним параметром розміру сопла екструдера є показник у 400 - 500 мікрон. Звичайно, внаслідок зменшення розміру сопла, поліпшиться якість друку, але зовсім тонке сопло має і ряд недоліків: швидке засмічення, часте зупинення друку, крихкість шарів виробу. Це пов'язано із тим, що нитка, яку видавлює принтер, неоднорідна і пластична, а в процесі нагріву і охолодження нитка міняє свою форму, плавиться і вигинається. Так як це фізичний недолік термопластмас та схожих з ними матеріалів, тому при застосуванні FDM технології на 3D-принтері важко отримати якість друку вищу за 200-500 мікрон. Зазвичай, точність 3D-друку варіюється в межах 0,3-0,7 мм більш ніж достатньо.

Висновки до першого розділу

На основі аналізу огляду апріорної інформації в області застосування адитивних технологій можна зробити наступні висновки:

- методи 3D-друку знайшли широке застосування в поліграфічному виробництві;
- технології, що використовуються для друку 3D-сувенірів, засновані на використанні різноманітні витратних матеріалів, що мають ряд переваг та недоліків, що у свою чергу впливають на якість отриманого 3D-виробу;
- літературний огляд інформації про найбільш використовувані методи технології швидкого прототипування показує, що найбільш задіяний метод в поліграфії – це метод FDM;
- програмне забезпечення для здійснення розробки 3D-моделі та подальшого слайдингу досить різноманітне, застосування якого залежить від технічних характеристик використовуваної комп'ютерної техніки на до друкарському етапі;
- функціональні можливості 3D-обладнання, що можуть бути розширеними та обмеженими, в залежності від моделі, впливають на час, геометричні розміри та якість отриманого 3D-сувеніру;
- результати патентного пошуку вказують на переважну існуючу більшість сформованих та стабільно дієвих технологій адаптивного друку, а спад запитів на у 2022, пов'язаний із загальною світовою економічною кризою та широкомасштабним вторгненням на територію України.
- у вітчизняній і зарубіжній літературі відсутня інформація в достатній кількості щодо технологічних параметрів процесу 3D-друку, які впливають на показники якості;

Відповідно до вищезазначеного сформульовано мету дослідження, що забезпечить розробку рекомендацій щодо створення 3D-виробів рекламно-сувенірної галузі та встановлення відповідних налаштувань обладнання для здійснення якісного адитивного друку при виборі оптимальних режимів та матеріалів 3D- друку.

Для досягнення поставленої мети окреслено основні завдання щодо підвищення точності виготовлення 3D-виробів рекламно-сувенірної галузі за

теоретичними та експериментальними дослідженнями, що найбільше впливають на якість 3D-друку на всіх етапах від підготовки моделі до її безпосереднього виготовлення і пост обробку.

2 ПРОМИСЛОВЕ ЗАВДАННЯ

2.1 Розгорнуте промислове завдання

Вихідними параметрами для розробки виробничого процесу підприємства, що спеціалізується на ексклюзивно-подарункових 3-D виробах та пакуваннях із застосуванням лазерного гравіювання, слугують технічні характеристики поліграфічних виробів, які наведені у промисловому завданні та зведено до таблиці 2.1.

Як правило, ексклюзивні 3-D вироби використовують виробниками настільних ігор для створення фішок, кубиків та інших елементів, які недоступні в звичайних магазинах або повинні виготовлятися обмеженими серіями, а також ексклюзивне пакування із застосуванням лазерного гравіювання, застосовують для: упаковки дорогих алкогольних напоїв, рідкісних вин, ювелірних виробів, кондитерських смаколиків, косметичні виробів, адже все це вдалий спосіб підкреслити цінність.

Існує великий асортимент зовнішнього оформлення поліграфічної продукції та щоб бути конкурентно-спроможним на ринку, необхідно удосконалювати технології виготовлення і оздоблення виробу.

Таблиця 2.1 – Промислове завдання

№ позиції	Тип продукції	Витратні матеріали	Робоча температура еструдера, °C	Глибина випалювального шару, мм	Формат виробу, см	Наклад, тис.одиниць	Точність, мкм	Заповненість, %	Товщина стінки, мм	Формат робочих файлів	Технологія виготовлення виробу
1	Ігрові фішки	PLA	180	-	13×11×1*	1	80-300	10-100	0,8-1,6	.STL .obj	FDM
2	Ігрові персонажі	PLA	195	-	15,5×15,2×28	0,5	80-300	10-100	0,8-1,6	.DAE .obj	FDM
3	Прикраси, пов'язані із святами	PLA	205	-	11,82×14,52×12,9*	2	80-300	10-100	0,8-1,6	.STL .obj .blend	FDM

Закінчення таблиці 2.1

№ позиції	Тип продукції	Витратні матеріали	Робоча температура еструдера, °C	Глибина випалювального шару, мм	Формат виробу, см	Наклад, тис. одиниць	Точність, мкм	Заповненість, %	Товщина стінки, мм	Формат робочих файлів	Технологія виготовлення виробу
4	Сувенірні брелки (новорічні)	PLA	220	-	8,52×1,74×10,38*	3	80-300	10-100	0,8-1,6	.STL .fbx .obj	FDM
5	Сувеніри корпоративні	PLA	220		15×0,5×15*		80-300	10-100	0,8-1,6	.STL .obj .blend .fbx	FDM
6	Сувенірне пакування	фанера	-	0,1 - 0,3	70×70*	1				.jpeg, .cdr	Гравіювання
7	Сувенірне пакування	шпон	-	0,4-0,55	100×70*					.jpeg, .cdr	Гравіювання

*Розміри пакувальної та сувенірної продукції можуть змінюватись в залежності від бажання замовника, але не більше 200×200×190 мм.

На рисунках 2.1-2.18 представлено 3D-моделі сувенірної продукції, що проектується для виготовлення на підприємстві, а саме: прикрас, пов'язаних із святом, ігрових персонажів, фішок, сувенірних та корпоративних брелків, що пройшли всі етапи моделювання від макетування у 2D-проекції та просторової візуалізації до експорту у придатний для слайдингу формат, а отже, визначені придатними до здійснення друкарських операцій на 3D-обладнанні.

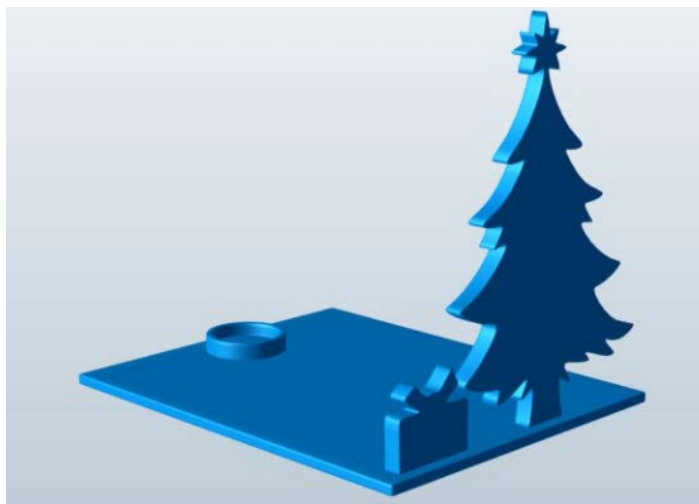


Рисунок 2.1 – 3D-модель готова до друку на 3D-обладнанні

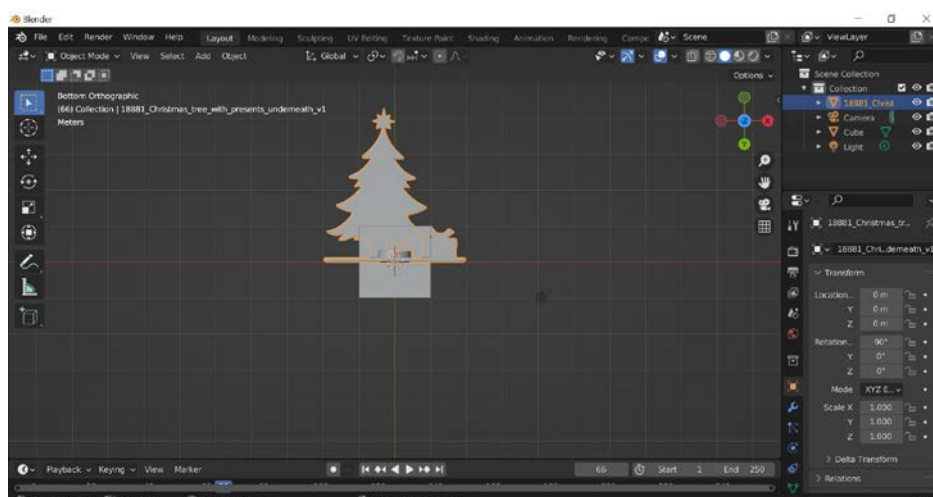


Рисунок 2.2 – Макетування 3D-моделі сувеніру в 2D-проекції

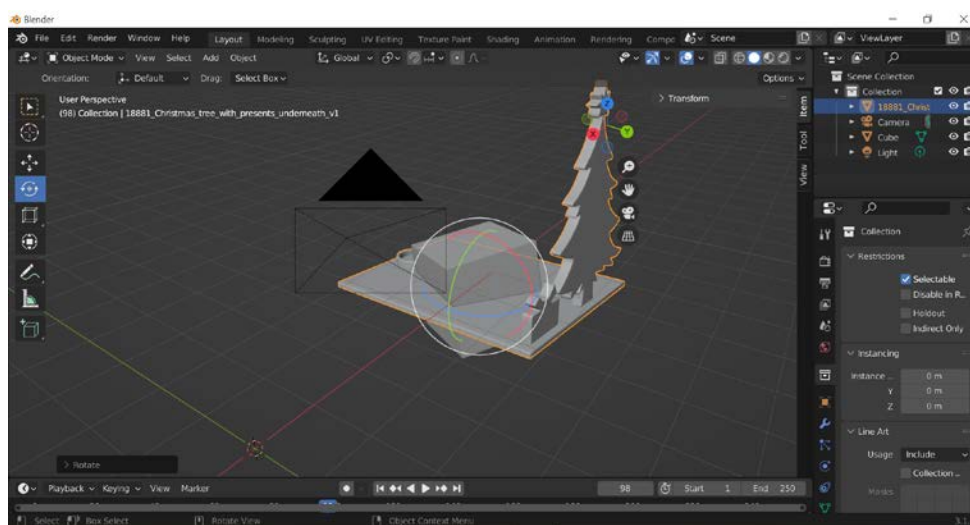


Рисунок 2.3 – Просторова візуалізація макету 3D-моделі сувеніру



Рисунок 2.4 – 3D-модель ігрового персонажу готова до друку

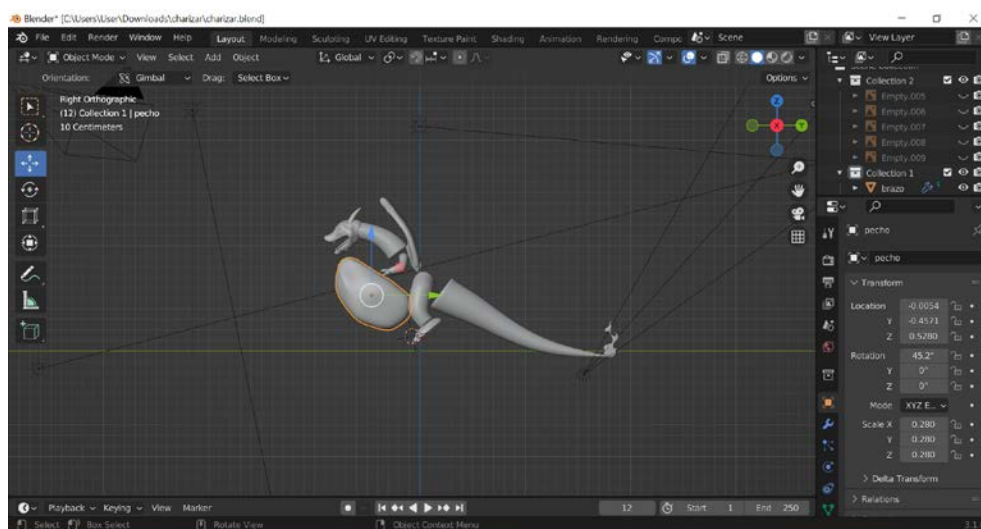


Рисунок 2.5 – Макетування 3D-моделі сувеніру в 2D-проекції



Рисунок 2.6 – Макетування 3D-моделі ігрового персонажу в 2D-проекції



Рисунок 2.7 – Просторова візуалізація макету 3D-моделі ігрового персонажу

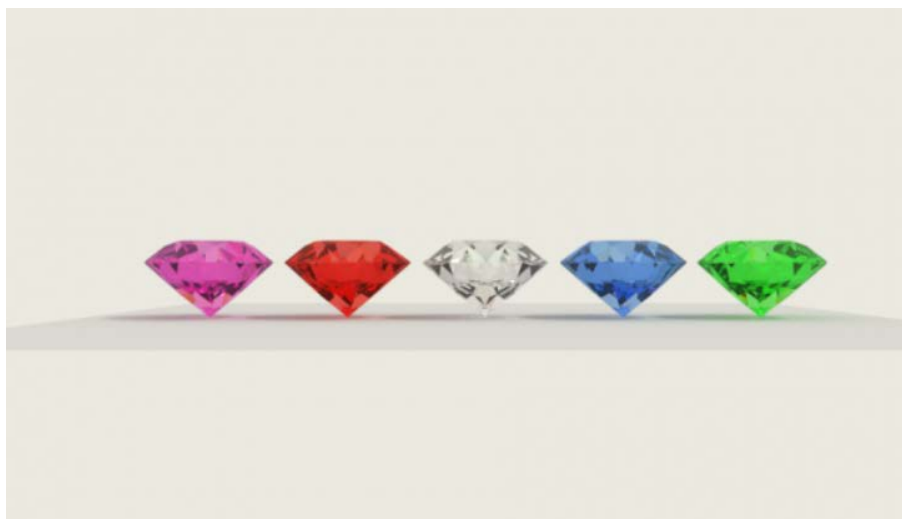


Рисунок 2.8 – 3D-модель корпоративного сувеніру готова до друку

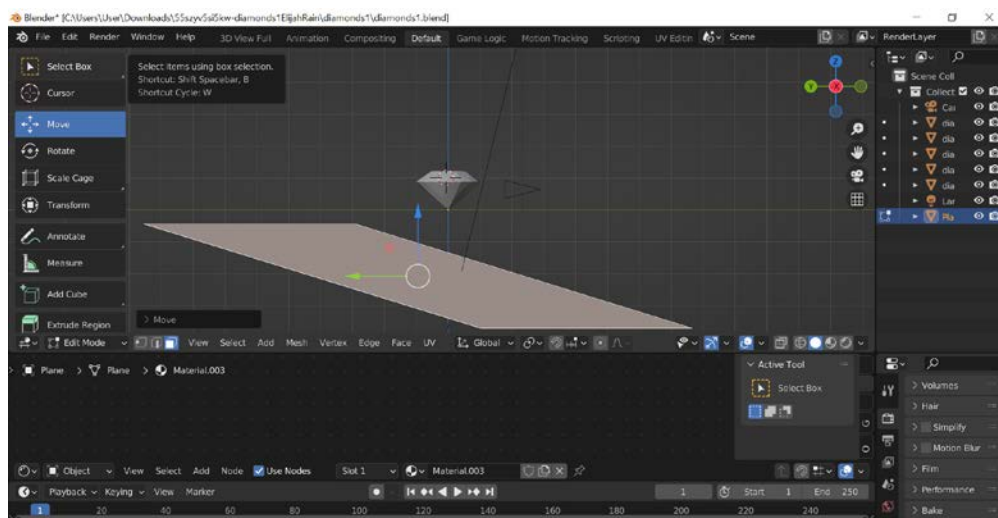


Рисунок 2.9 – Макетування 3D-моделі сувеніру в 2D-проекції

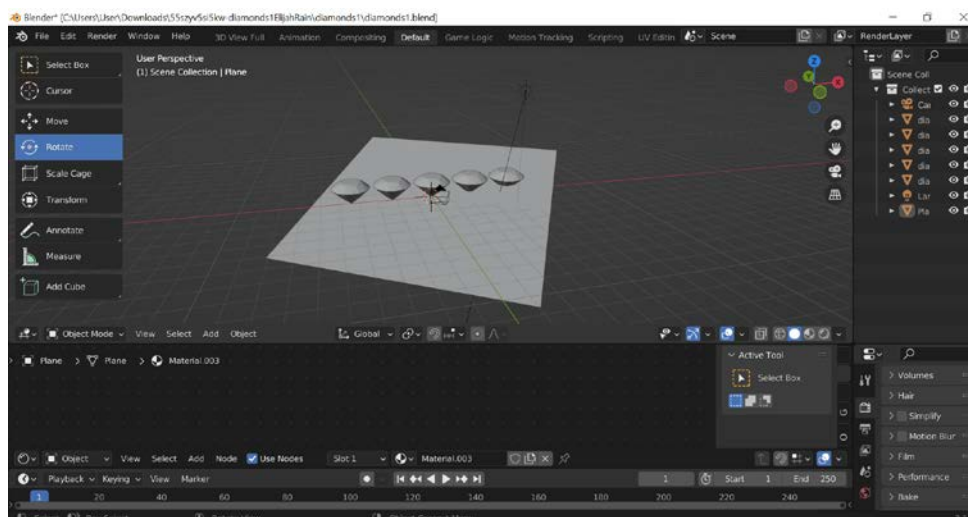


Рисунок 2.10 – Просторова візуалізація макету 3D-моделі сувеніру



Рисунок 2.11 – 3D-модель сувенірного брелку (новорічного) готова до друку

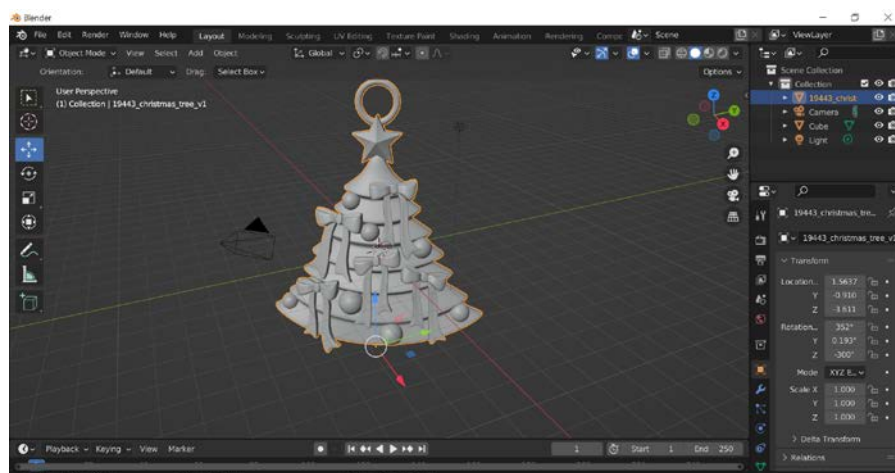


Рисунок 2.12 – Просторова візуалізація макету 3D-моделі сувенірного брелку (новорічного)

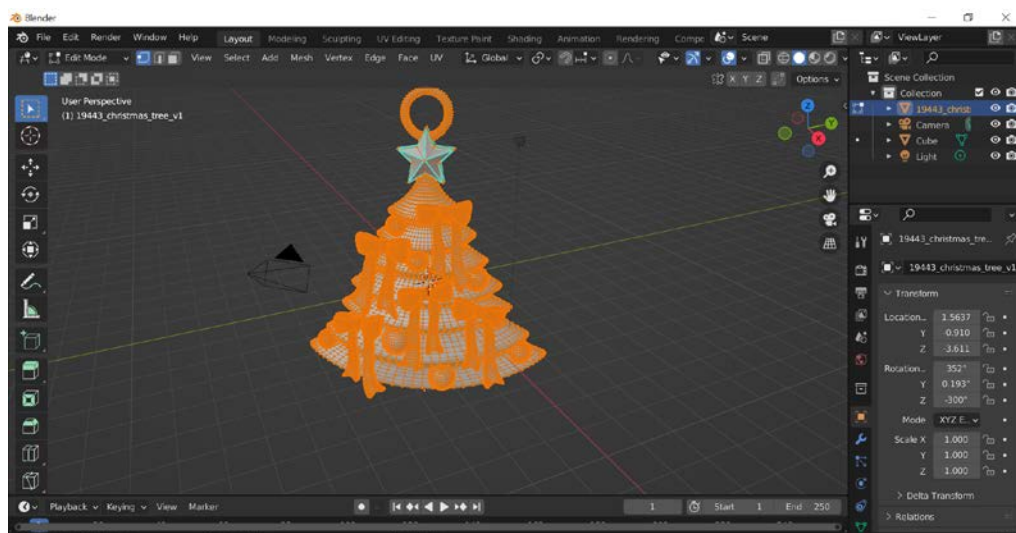


Рисунок 2.13 – Деталізована просторова візуалізація макету 3D-моделі

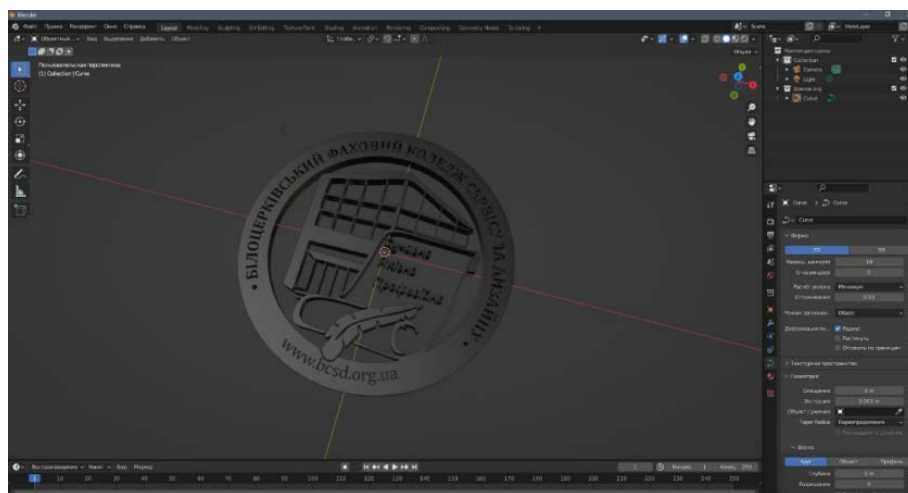


Рисунок 2.14 – Просторова візуалізація макету 3D-моделі
сувенірного брелку (корпоративного)



Рисунок 2.15 – Деталізована просторова візуалізація макету 3D-моделі
сувенірного брелку (корпоративного)



Рисунок 2.16 – 3D-модель ігрової фішки готова до друку

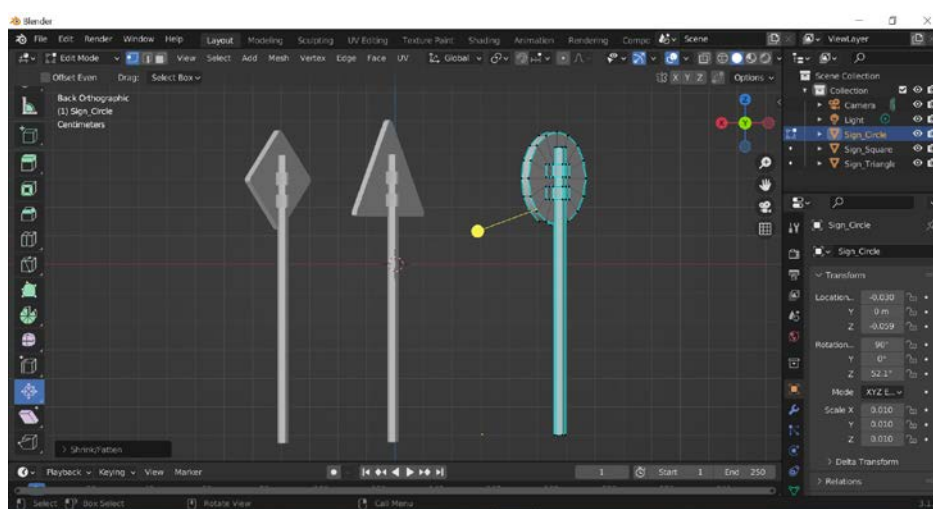


Рисунок 2.17 – Макетування 3D-моделі ігрових фішок в 2D-проекції

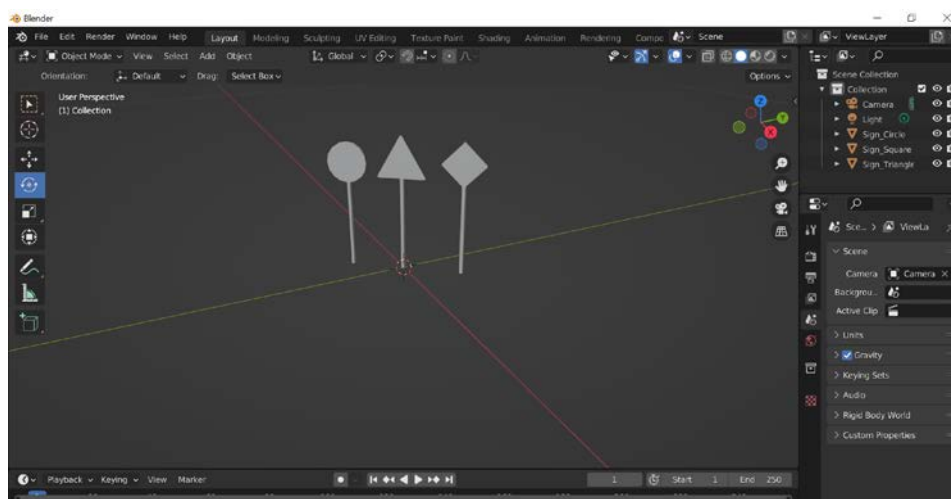


Рисунок 2.18 – Просторова візуалізація макету 3D-моделі ігрових фішок

2.2 Автоматизоване програмне забезпечення технологічних розрахунків 3D-продукції

Для поліграфічного підприємства є важливим етапом вірно провести технологічні розрахунки, що включають визначення габаритних розмірів 3D-виробів, об'єму моделі та площі її поверхні.

На рисунках 2.19 – 2.24 представлено задані технологічні параметри (табл.2.2) для кожного виду 3D-продукції, що виготовляється на підприємстві, із застосуванням автоматизованого програмного додатку XYZprintingcalc, що є індивідуальним для кожної моделі 3D-обладнання.

Виберіть технологію	FDM
Виберіть матеріал	PLA
Виберіть колір	Білий
Виберіть точність	100 мкм
Виберіть заповненість	100%
Товщина стінки	1.6мм
Витрати пластика (г)	0,7
Ціна за грам	10
Сума	7 грн
Модель	untitled1.obj
Габарити (см)	13×11×1
Об'єм моделі (см ³)	0,87
Площа поверхні (см ²)	13

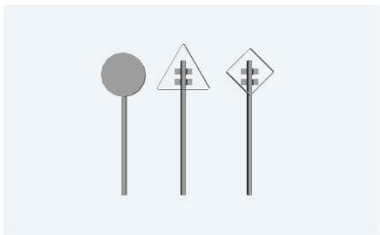


Рисунок 2.19 – Технологічні параметри макету 3D-моделі ігрових фішок

Виберіть технологію	FDM
Виберіть матеріал	PLA
Виберіть колір	Білий
Виберіть точність	100 мкм
Виберіть заповненість	100%
Товщина стінки	1.6мм
Витрати пластика (г)	2,2
Ціна за грам	10
Сума	22 грн
Модель	Брелок (3).obj
Габарити (см)	15×0,5×15
Об'єм моделі (см ³)	5
Площа поверхні (см ²)	22,5



Рисунок 2.20 – Технологічні параметри макету 3D-моделі сувенірного брелку (корпоративного)

Виберіть технологію	FDM
Виберіть матеріал	PLA
Виберіть колір	Білий
Виберіть точність	100 мкм
Виберіть заповненість	100%
Товщина стінки	1.6мм
Витрати пластика (г)	0,83
Ціна за грам	10
Сума	8,3 грн
Модель	19443_christmas_tree_v1.obj
Габарити (см)	11,82×14,52×12,9
Об'єм моделі (см³)	0,9
Площа поверхні (см²)	17,4



Рисунок 2.21 – Технологічні параметри макету 3D-моделі прикрас, пов'язаних із святами

Виберіть технологію	FDM
Виберіть матеріал	PLA
Виберіть колір	Білий
Виберіть точність	100 мкм
Виберіть заповненість	100%
Товщина стінки	1.6мм
Витрати пластика (г)	1,4
Ціна за грам	10
Сума	14 грн
Модель	charizar1.obj
Габарити (см)	15,5×15,2×28
Об'єм моделі (см³)	4,2
Площа поверхні (см²)	43,4

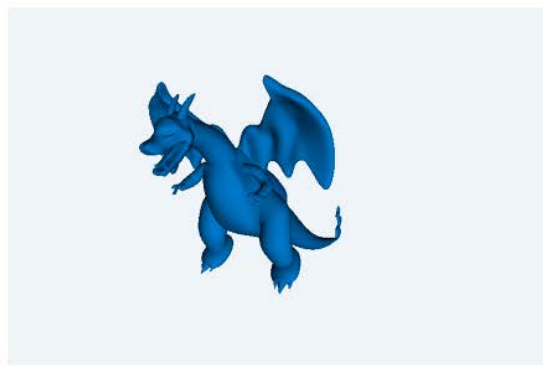


Рисунок 2.22 – Технологічні параметри макету 3D-моделі ігрового персонажу

Виберіть технологію	FDM
Виберіть матеріал	PLA
Виберіть колір	Білий
Виберіть точність	100 мкм
Виберіть заповненість	100%
Товщина стінки	1.6мм
Витрати пластика (г)	0,68
Ціна за грам	10
Сума	6,8 грн
Модель	19443_christmas_tree_v1.obj
Габарити (см)	12,79×1,22×12,79
Об'єм моделі (см ³)	2,8
Площа поверхні (см ²)	19,1



Рисунок 2.23 – Технологічні параметри макету 3D-моделі прикрас, пов'язаних із святами

Виберіть технологію	FDM
Виберіть матеріал	PLA
Виберіть колір	Білий
Виберіть точність	100 мкм
Виберіть заповненість	100%
Товщина стінки	1.6мм
Витрати пластика (г)	0,5
Ціна за грам	10
Сума	5
Модель	18881_Christmas_tree_with_presents_underneath_v
Габарити (см)	8,52×1,74×10,38
Об'єм моделі (см ³)	3,7
Площа поверхні (см ²)	15



Рисунок 2.24 – Технологічні параметри макету 3D-моделі сувеніру(новорічного)

Розраховані технологічні показники впливають на подальші витрату матеріалу та час виготовлення 3D-сувенірів. На основі показників XYZprintingcalc в таблиці 2.2 здійснено опис розгорнутого промислового завдання

Таблиця 2.2 – Розгорнуте промислове завдання

№ позиції	Тип продукції	Габарити, см	Об'єм, см ³	Площа поверхні, см ²	Витрати пластику, г	Довжи на нитки PLA, м	Час виготовлення, хв
1	Ігрові фішки	13×11×1	0,87	13	0,7	2,46	49
2	Ігрові персонажі	15,5×15,2× 28	4,2	43,4	1,4	2,91	72
3	Прикраси, пов'язані із святами	11,82×14,52 × 12,9	0,9	17,4	0,83	2,08	45
4	Сувенірні брелки (новорічні)	8,52×1,74× 10,38	3,7	15	0,5	1,895	30
5	Сувеніри корпоративні	15×0,5× 15	5	22,5	2,2	2,86	54
6	Сувенірне пакування	7×7	-	49	-	-	78
7	Сувенірне пакування	10×7	-	70	-	-	84

Висновки до другого розділу

У даному розділі було:

– розроблено розгорнуте промислове завдання для запроєктованого підприємства та розраховано габаритні розміри, об'єми 3D-моделей, площі поверхнь та витрати пластику на одиницю виготовлення 3D-сувеніру, довжини PLA ниток та час виготовлення;

– представлено розроблені 3D-моделі сувенірної продукції, що проектується для виготовлення на підприємстві, а саме: прикраси, пов'язані із святом, ігрові персонажі, фішки, сувенірні та корпоративні брелки, що пройшли всі

етапи моделювання від макетування у 2D-проекції та просторової візуалізації до експорту у придатний для слайдингу формат;

- здійснено 2D та просторову візуалізацію розроблених 3D- сувенірів.

3 МЕТОДИКА ВИГОТОВЛЕННЯ 3D-ВИРОБІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

3.1 Особливості застосування адитивних технологій

Використання адитивних технологій дозволяє суттєво зменшити витрати на отримання сувенірів-прототипів, починаючи з початкових етапів (чорнові скановані або чорнові прототипи) закінчуючи повноцінними моделями, які в повному обсязі задовольняють замовника.

Таким чином до поліграфічних 3D-виробів, отриманих за допомогою адитивних технологій, виноситься ряд вимог: якість, точність, відповідність геометричним параметрам та параметрам міцності, високі експлуатаційні властивості.

Використовувати 3D-вироби одразу після виготовлення, зокрема якщо мова йде про складання певного 3D-сувеніру, наприклад, у вигляді механізму, не можна, так як під час виготовлення на їх поверхні залишаються певні недоліки або так звані помилки друку.

Виходячи із сутності самої технології, всі недоліки на етапі друку прибрати практично неможливо. Через те що деталь отримується шар за шаром на ній в будь-якому випадку залишається недолік поверхні, котрий можна охарактеризувати як хвилястість.

Зазвичай, недоліки друку виправляють на етапі пост обробки деталі, в більшості випадків вручну, а їх виникнення можливе з різних причин [58]:

- через неправильні налаштування 3D-обладнання або слайсера;
- через програмні помилки;
- через неправильне зберігання певних видів полімерів.

3.2 Систематизація похибок точності отриманих поверхонь 3D-виробів та їх моделей

При використанні 3D-друку, в точності поверхонь готових моделей, виникають похибки, як і при будь-якому іншому технологічному методі обробки

для отримання кінцевої деталі. На рисунку 3.1 представлено класифікацію похибок точності поверхонь друкованих моделей [58].

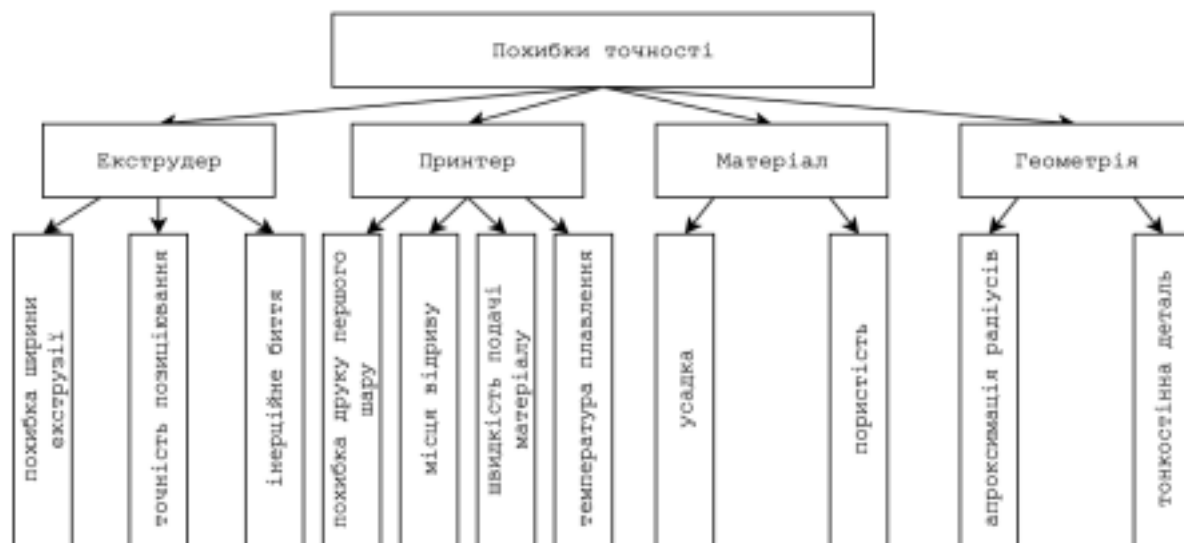


Рисунок 3.1 – Схема класифікації похибок точності отриманих поверхонь [58]

На рисунку 3.2 зображено порівняння 3D-сувенірів, що виготовлені за однакових умов, але зберігання витратних матеріалів відбувалось (рисунок справа) за зниженого температурного режиму (від 0⁰C до +5⁰C).



Рисунок 3.2 – Порівняння друку 3D-сувенірів із різним температурним режимом зберігання витратних матеріалів

На рисунках 3.3-3.10 зображені найбільш розповсюджені недоліки 3D-друку.

Дефект «ворс», зображений на рисунку 3.3 отриманий внаслідок холостого переміщення сопла на нову позицію [40]. Зміна режимів налаштування слайсера, через використання опції «втягування» допомагають виправити вищезазначений дефект.

При активуванні опції «втягування» в моменти, коли друк не здійснюється і

сопло переміщується пластик втягується з сопла, чим керує механізм подачі пластику, за потреби продовження процесу друку – витратний матеріал проштовхується назад у сопло.



Рисунок 3.3 – Похибка друку типу «ворс»

Дефект «надмірне екструдкування пластику», зображений на рисунку 3.4 отриманий внаслідок декількох причин [28, 40]:

- хибні налаштування слайсера, а саме коефіцієнту екструдкування, що призводить до помилок в обрахунку кількості пластику, що видавлюється;
- невідповідний діаметр пластикової нитки, що заходить у сопло.

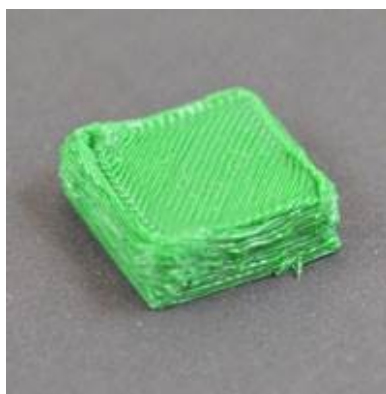


Рисунок 3.4 – Похибка друку типу «надмірне екструдкування пластику»

Дефект «перегрів пластику», зображений на рисунку 3.5 виникає внаслідок надмірно високої температури нагріву нитки пластику при друці. Витратний матеріал, не має можливості застигнути. Виділяють декілька причин: надмірно висока швидкість друку; висока температура нагріву пластику при друку; недостатній час охолодження [28,40].



Рисунок 3.5 – Похибка друку типу «перегрів пластику»

На рисунку 3.6 зображено дефект «розшарованої моделі». Зазвичай, такі дефекти викликані тим, що під час друку задано надто великий параметр висоти шару, або занадто малу температуру друку [28].



Рисунок 3.6 – Похибка друку типу «розшарування моделі»

Похибка друку типу «зміщення шарів», зображена на рисунку 3.7, виникає внаслідок недоліків мехатронних складових 3D-обладнання, тобто через часткову або повну відсутність зворотного зв'язку. В такому випадку відбуваються різке переміщення друкуючої голівки, що в свою чергу викликані або високим прискоренням при переміщенні, або вібраціями високої амплітуди.

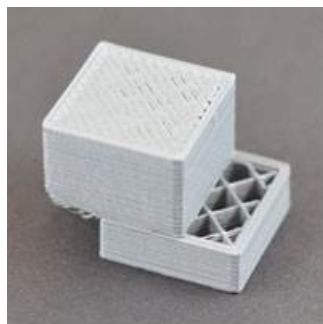


Рисунок 3.7– Похибка друку типу «зміщення шарів»

На рисунку 3.8 зображено дефект похибки бокової поверхні 3D-виробу, що

може з'являється з певною періодичністю. Виділено декілька причин виникнення дефекту:

- перепади температурних режимів при здійсненні друку;
- проблемами механічного характеру, наприклад. через несправність приводних шестерень або через невелику жорсткість монтажного столика;
- нерівномірне екструдювання, викликане, наприклад, низькою якістю пластикової нитки;

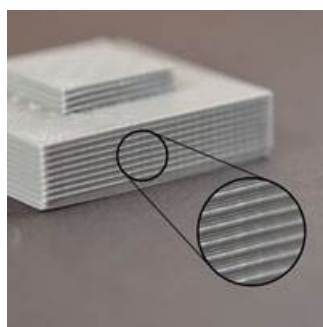


Рисунок 3.8– Похибка друку типу «лінії на бокових поверхнях моделі»

3.3 Процеси створення тривимірної моделі

Рисунок 3.9 схематично відтворює орієнтовний життєвий цикл 3D-виробу, що покладено в основу розробки технологічного процесу виготовлення 3D-сувенірів (рис 3.12).

Адитивна технологія передбачає наступні етапи створення кінцевого поліграфічного продукту [24, 26]:

1. Розробка базової концепції 3D-сувеніру.
2. Створення CAD-моделі (computer-aided design – комп'ютерна підтримка проектування), тобто створення електронної (цифрової) документації на спроектований 3D-сувенір.
3. Запис STL-файлу (stereo lithography – стереозображення), тобто створення файлу в форматі, що застосовується для зберігання тривимірних моделей.
4. Поділ моделі на шари – розподіл (віртуальний) виробу програмою-слайсером на шари в контурних межах макетованого 3D-сувеніру.

5. 3D-друк, який власно передбачає фізичне відтворення виробу на 3D-обладнанні на основі попередньо створеного цифрового макету.

6. Післядрукарська обробка для надання 3D-сувеніру необхідних якостей, властивостей чи зовнішнього виду, що передбачає можливу фізичну, теплову, декоративну чи іншу обробку.

7. Отримання готового виробу та активне використання.

8. Утилізація 3D-сувеніру.

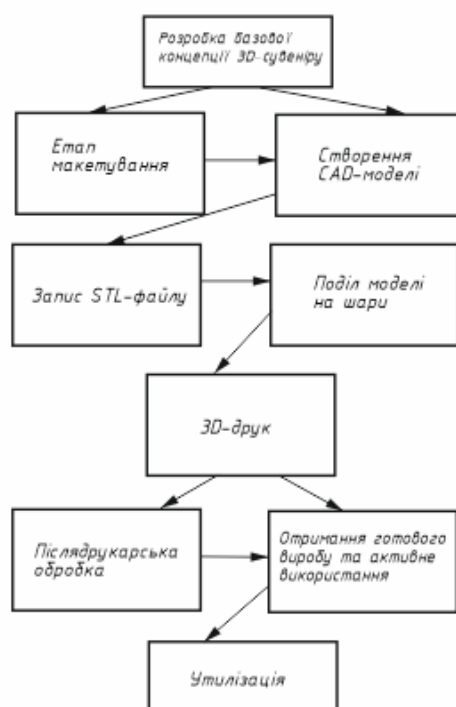


Рисунок 3.9 – Життєвий цикл 3D-виробу

Визначено велику кількість CAD систем призначених для розробки цифрових 3D-моделей будь-якої важкості, але кожна програма має певні недоліки, які впливають на якість поверхні і досягнуту геометричну точність прототипу [14].

Важливим для коректного здійснення технологічного процесу є файл, збережений у форматі .STL, адже основною характеристикою цього формату є те, що геометрія поверхні цифрової моделі здійснюється розбором на набір рівносторонніх трикутників, кількість яких залежить від обраного CAD забезпечення. У зв'язку з цим, для прикладу на рисунку 3.10 а) та б) зображено

представлення моделей в форматі .STL із застосуванням ПЗ по роботі із тривимірними об'єктами Blender та Compass.

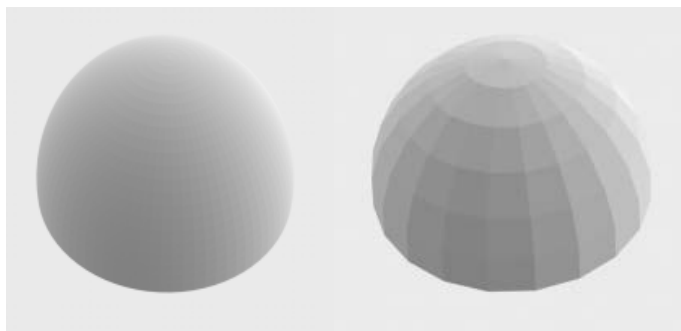


Рисунок 3.10– Цифрові моделі в форматі STL:

а) – Blender б) – Compass

Відповідно до аналізу рисунку 3.10 можна стверджувати, що препроцес у програмних продуктів різний.

У системі Blender є можливість отримати достатньо дрібну сітку трикутників, ніж в системі Compass. Так як 3D-обладнання повністю повторює форму кінцевого продукту з формату .STL, тому значення шорсткості поверхні у моделі 3.10 а) буде значно вищою. Після запуску спеціальною програмою файлу в форматі .STL, вона ділить модель на шари (слайси) і розписує їх на G-code.

Принцип друку ґрунтується на промальовуванні голівкою принтера периметра майбутньої деталі і її внутрішньої структури на певній висоті (шарі).

G-код – це ряд інструкцій, в яких треба прописати що робити 3D-принтеру при виконанні програми. Тобто, в який момент часу, в яку сторону і з якою швидкістю їхати друкарській голівці принтера (екструдеру), де саме включити подання матеріалу, або навпаки включити реверс.

В процесі накладання шарів один за одним, створюється певна фактура 3D-друку, вона і буде показувати значення шорсткості поверхні 3D-виробу. Точність шорсткості при друку визначається ще і додатковими факторами (рис 3.11):

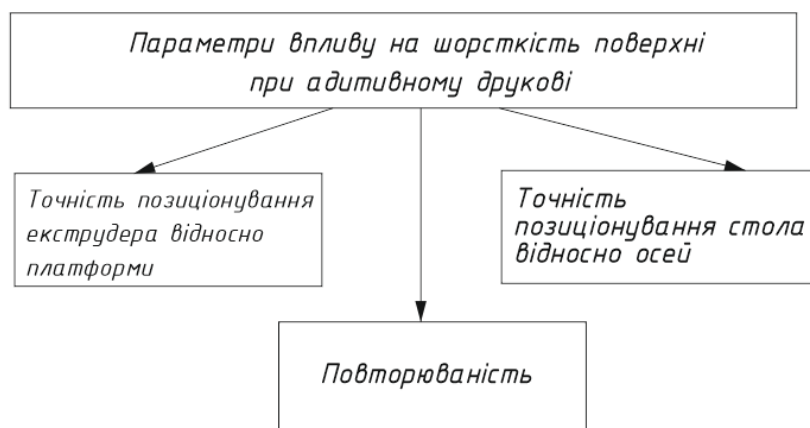


Рисунок 3.11 – Схема додаткових факторів впливу на шорсткість поверхонь [12]

Параметр точності позиціонування екструдера відносно платформи вказує на те, що якщо програмно задати переміщувати екструдер з точки А в точку Б з певною відстанню, то може виникнути похибка, яка визначається як відхилення від заданої позиції точок.

Параметр точності позиціонування монтажного стола відносно осей визначається точністю позиціонування екструдера відносно платформи, але вже у вертикальній площині.

Параметр повторюваності вказує наскільки попередньо надрукований шар має відрізнитись від наступного.

Дослідивши життєвий цикл 3D-виробу, здійснено побудову блок-схеми технологічного процесу виготовлення 3D-виробу (рис 3.12).

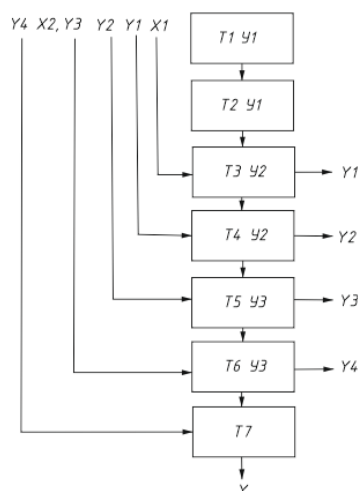


Рисунок 3.12 – Блок-схема технологічного процесу виготовлення 3D-виробу

Пояснення до блок-схеми:

T– технологічні операції:

T1 – розробка базової концепції 3D-сувеніру;

T2 – макетування 3D-сувеніру;

T3 – створення CAD-моделі;

T4 – запис STL-файлу;

T5 – поділ моделі на шари;

T6 – виконання друкарських операцій засобами 3D-обладнання;

T7 – післядрукарські операції;

У– устаткування:

У1 – графічний планшет Huion H1060P;

У2 – HP ProBook 440G7;

У3 – XYZ da Vinci 3D printer;

X – витратні матеріали:

X1 – електронний макет;

X2– PLA пластик;

X3 – ручний інструмент, хімічні розчини.

Висновки до третього розділу

У даному розділі було:

- проаналізовано основні особливості друкування 3D-виробів;
- класифіковано похибки точності поверхонь 3D-виробів та їх моделей;
- систематизовано етапи створення тривимірних моделей
- створено блок-схему технологічного процесу виготовлення 3D-виробів .

4 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ 3D-ВИРОБІВ

Для визначення параметрів, що впливають на властивості отриманих 3D-сувенірів необхідно визначити залежності, параметрів отриманої деталі від вхідних величин.

У випадку із адитивним виробництвом 3D-друк може бути використаний як і метод отримання заготовки або як метод отримання готового 3D-виробу.

У більшості випадків вхідними величинами для адитивних технологій будуть виступати (рис.4.1):



Рисунок 4.1 – Узагальнена схема вхідних величин АТ [13, 14]

Для визначення залежності впливу вхідних параметрів 3D-сувеніру на його якість та інші характеристики необхідно провести експериментальні дослідження.

Метою досліджень визначено те, що за допомогою зміни вхідних параметрів і впорядкованого збору інформації про отримані характеристики 3D-виробів, за допомогою різних методів аналізу, отримати відповідні залежності і вплив конкретних вхідних параметрів на ті чи інші характеристики 3D-виробу.

4.1. Параметри якості 3D-виробів, виготовлених із застосуванням адитивних технологій

У випадку застосування технологій адитивного друку, виготовлення функціональних 3D-виробів, таких як прикраси, корпоративні сувеніри, ігрові фішки та персонажі важливим аспектом є отримання якісного 3D-виробу.

Кожна зі сфер сучасного виробництва під терміном «якість» має на увазі інколи докорінно різні речі. За загальною класифікацією показник якості дуже відносний. Об'єктивною оцінкою якості є порівняння декількох схожих за характеристиками і вартістю виробами, той що буде краще виконувати свої функції відповідно більш якісний. Отже, в різних сферах за якість відповідають різні характеристики: в одній – 3D-виріб вважатимуть якісним, якщо він буде відносно стійким до умов навколишнього середовища, в іншій – якщо прослужить довгий час. Важливим є і зовнішній вигляд отриманого 3D-виробу.

Для визначення ступеню якості отриманого поліграфічного 3D-виробу визначають його характеристики такі як (рис.4.2):

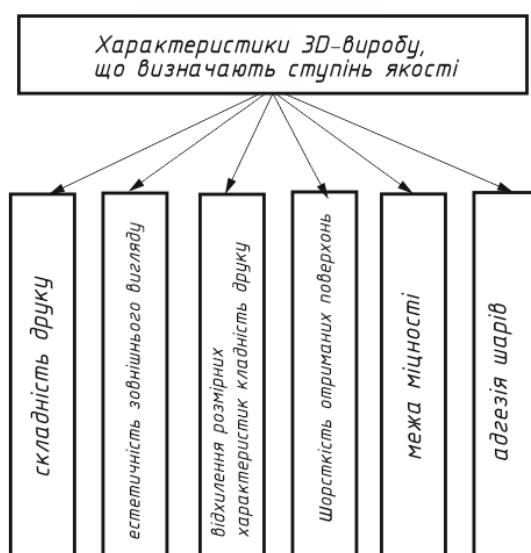


Рисунок 4.1 – Схема характеристик 3D-виробу, що визначають його якість

Для визначення того факту, чи 3D-виріб є якісним, зазвичай, з описаних вище обирають декілька, котрі необхідні для забезпечення ним поставлених функцій.

При виконанні прототипів 3D-виріб, методом сканування, часто найбільш важливими є характеристики точності отриманих геометричних розмірів та шорсткості поверхні виробу.

Сам принцип, за яким отримуються 3D-виріб, не дозволяє отримати ідеальних або близьких до них значень шорсткості поверхні. Через пошарове нанесення матеріалу на торцях і вертикальних частинах сувенірів завжди будуть зберігатися борозди та невеликі виступи.

Горизонтальні ж поверхні в ідеальному випадку вдається отримати досить гладкими, проте на них можуть виникати раковини і виступи, що негативно впливають на загальну якість поверхні.

Для 3D-сувенірів з низьким відсотком заповнення характерне отримання ям з малим кутом нахилу на горизонтальних площинах.

4.2 Методика визначення параметрів якості поверхневого шару 3D-виробів

Для проведення досліджень щодо шорсткості отриманих поверхонь, отриманих шляхом 3D-друку, зазвичай, застосовують профілографи, інтерферометри, мікрометри на індикаторних стійках, а з метою дослідження візуальних характеристик – мікроскопи. [15].

Рисунок 4.2 характеризує процес вимірювання шорсткості 3D-виробу за допомогою профілометром MarSurf PS1. До складу зазначеної моделі профілометра (рис.4.3) входить: 1 – клавіатура з позначками: Ra, Rz, F1, Lt/Lc, ▼, ► (кнопки демонстрації отриманих параметрів Ra, Rz, для налаштування довжини виміру); 2 – корпус; 3 – дисплей; 4 –кнопка START; 5 – щуп; 6 – вузол двигуна (здійснює переміщення приладу та фіксацію в момент виміру). Сучасною перевагою, що збільшує мобільність приладу є наявність альтернативного джерела живлення.



Рисунок 4.2 – Процес вимірювання шорсткості поверхні 3D-виробу



Рисунок 4.3 – Загальний вигляд профілометра MarSurf PS1 для вимірювання шорсткості поверхні 3D-виробу

1 – допоміжні кнопки; 2 – корпус; 3 – дисплей; 4 – кнопки початку вимірювань; 5 – щуп; 6 – вузол двигуна

Загальна характеристика профілометра MarSurf PS1 [62]:

- одиниці вимірювання: метричні і дюймові;
- принцип вимірювання: методом обмацування;
- датчик: індуктивно опорний датчик;
- радіус голки щупа 2 мкм (80 in);
- вимірювальне зусилля $\sim 0,7$ мН;
- вимірювані параметри: R_a , R_q , R_z відпов. R_y (JIS), R_z (JIS) (з допусковим контролем), R_{max} , R_p , R_p (ASME), R_{pm} (ASME), R_{pk} , R_k , R_{vk} , Mr_1 , Mr_2 , A_1 , A_2 , V_o , R_t , R_{3z} , R_{Pc} , R_{mr} соотв. t_p (JIS, ASME), R_{Sm} , R , A_r , R_x ;
- діапазон вимірювання: 350 мкм, 180 мкм, 90 мкм (0.014 in, 0.007 in);
- роздільна здатність профілю: 32 nm, 16 nm, 8 nm;
- довжина трасування L_t : 1.75 мм, 5.6 мм, 17.5 мм; (0.069 in, 0.22 in, 0.69 in);
- довжина трасування (MOTIF): 1 мм, 2 мм, 4 мм, 8 мм, 12 мм, 16 мм (0.04 in, 0.08 in, 0.16 in, 0.32 in, 0.48 in, 0.64 in);
- довжина оцінки l_n (0.050 in, 0.15 in, 0.50 in);
- число базових довжин n за вибором від 1 до 5;
- функція калібрування: динамічна;
- обсяг пам'яті максимум: 15 профілів, 20000 результатів вимірювань.

Особливість сучасних профілометрів є те, що окрім визначення шорсткості, в них закладена можливість отримання профілограму поверхні. Це дає уявлення про характеристики нерівностей, які виражено у вигляді числових величин, котрі вказують на ступінь їхнього відхилення від еталонних значень гладких поверхонь при заданій геометричній формі.

Номенклатуру із 6-ти параметрів оцінки шорсткості поверхні викладено у міждержавному стандарті ГОСТ 2789-73.

Такі параметри бувають висотними та кроковими. До висотних відносять [40]:

Параметри, які контролюються за допомогою профілометру Mar Surf PS1 наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри шорсткості

Позначення параметру	Пояснення параметру
Висотні	
Ra	середнє арифметичне відхилення профілю
Rz	висота нерівностей профілю по 10 точках (середнє значення п'яти найбільших висот та впадин);
Rmax	максимальна висота профілю
Rzj	середня висота елементів профіля
Rp	середня висота піка профіля
Rq	корінь квадратний середньої шорсткості
A1	заповнений матеріалом пік профіля
A2	заповнена маслом впадина профіля
Крокові	
S	середній крок виступів профілю
Sm	середній крок нерівностей профілю по середній лінії

Для виробів, отриманих адитивними технологіями доцільно використовувати параметр R_a (середнє арифметичне відхилення профілю), так як за допомогою даного параметру можна отримати характеристику середнього значення нерівностей.

Зазвичай, результатом вимірювань і характеристикою відхилень від профілю поверхні по середній лінії і є профілографа.

Процес вимірювань із застосуванням профілометра MarSurf PS1, що зображений на попередньому рисунку 4.1 складається з етапів:

- встановлення профілометра у вимірювальний стенд;
- встановлюється щупу відповідної точності в профілометр;
- закріплення об'єкту вимірювань в пристосуванні;
- підведення щупа профілометра до доторку (застосовано механізм переміщення стола);
- налаштування параметрів вимірювання та запуск в роботу (довжина, збереження профілю тощо);
- отримання числового результату зі збереженням в пам'яті пристрою у вигляді файлу (координати вершин профілограми).

З метою оцінки структури поверхні виробів адитивного друку та середнього кроку нерівностей, досить вдало застосувати мікроскоп БМИ-1, що має наступні характеристики [62]:

- границі вимірів, мм:
в повздовжньому напрямку $0 \div 150$;
в поперечному напрямку $0 \div 50$;
- границі вимірювання мікрометричними гвинтами, мм $0 \div 25$;
- збільшення основного мікроскопа: 10х; 15х; 30х; 50х;
- збільшення об'єктивів 1х; 1.5х; 3х; 5х;
- збільшення окуляра 10х;
- найбільша відстань між центрами, мм 235 при виробі діаметром до 85 мм і 315 при виробі діаметром до 39мм;
- ціна поділки:

Шкали мікрометричних гвинтів, мм 0.005; Кутомірної голівки, хвилин 1;

– границі повороту стола, град. $0 \div 360$.

Зазвичай, цю модель мікроскопу застосовують для дослідження інструменту, але зважаючи на достатність його характеристик, стає можливим використати його і для дослідження поверхонь виробів, отриманих 3D-друком. У порівнянні із профілометром, застосування мікроскопу дозволяє оцінити якість та недоліки досліджуваної поверхні.

Рисунок 4.4 характеризує процес дослідження 3D-виробу із застосуванням мікроскопу. В свою чергу на рисунку 4.5 відтворено вигляд поверхні 3D-виробу при 60 кратному збільшенні. Аналізуючи зображення стає можливим, візуалізувати борозни, які утворились внаслідок пошарового нанесення витратного матеріалу на поверхню сувенірного виробу.

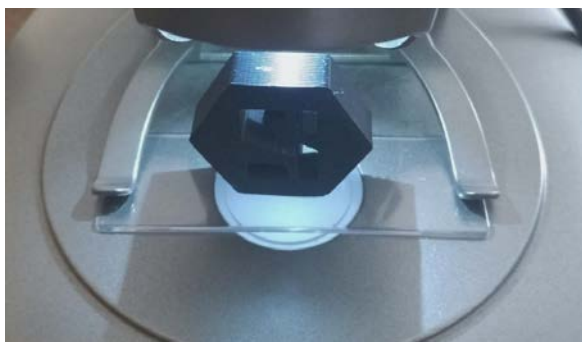


Рисунок 4.4 – Процес дослідження 3D-виробу в мікроскопі



Рисунок 4.5– Вигляд 3D-виробу при 60 кратному збільшенні

Етапами дослідження 3D-виробів із застосуванням мікроскопу визначено:

- подача напруги для підсвічування мікроскопу;
- розміщення виробу на стіл мікроскопа;

- здійснення налаштувань фокусування лінзи мікроскопа
- переміщення виробу із дотриманням фокусної відстані
- встановлення в точку початку вимірювань,
- переведення ноніусної шкали від точки початку до наступної, з метою отримання значень відстаней

4.3 Контроль параметрів 3D-виробів, що виготовлені із застосуванням адитивних технологій

Застосування методів контролю розмірних параметрів, отриманих 3D-виробів внаслідок друку адитивними технологіями, для будь-якої сфери сучасного виробництва є досить актуальним питанням та важливим завданням.

Для поліграфічної сфери застосування адитивних технологій, у порівнянні, наприклад із фармацевтичною або архітектурною, значення отриманих розмірів 3D-виробів може варіюватись у встановлених нормативних межах, які на сьогодні досить широкі. При бажанні замовника отримати точний прототип, наприклад, сувенір є масштабованою копією реального об'єкту, за розмірами геометричною подобою, тобто у випадку одиничного або дослідного виробництва, доцільно використовувати вимірювальні інструменти типу мікрометрів, штангенциркулів лінійок різного виду.

Вибір засобів для вимірювання якості отриманих розмірів при друку залежить від типу 3D-сувеніру його розміру та точності виконання. Зважаючи на те, що вимірювання може бути одиничним або призначеним для проведення експериментів, при цьому точність виміру має охопити діапазон від 0.05 до 0.1 мм можна застосувати штангенциркуль часового та електронного типу.

У випадку, коли виходять за межі вищезазначеного, а також впливу на них як зовнішніх факторів так і налаштувань друку суттєвий, доцільно використовувати мікрометри, вони забезпечать точність вимірювань від 2 до 50 мкм [62].

Якщо 3D-сувенір має досить габаритні розміри, тоді варто застосувати мікрометр типу МК 0-25, класу точності 1 ± 2 ; 2 ± 4 .

Для забезпечення всіх етапів процесу вимірювання прийнято використовувати

режим MOFIT із подальшим оцінюванням за стандартом ISO 12085.

Послідовність наступна: за допомогою основного барабану мікрогвинта відбувається підведення губки мікрометра до деталі, після чого за допомогою приводу тріскачки доводяться до доторку щупа з поверхнею вимірюваного 3D-сувеніру.

Для вимірювань використано щуп типу РНТ 6-350, який представлено на рисунку 4.6. Діапазон його вимірів 100мкм, 150 мкм або 350 мкм [40].

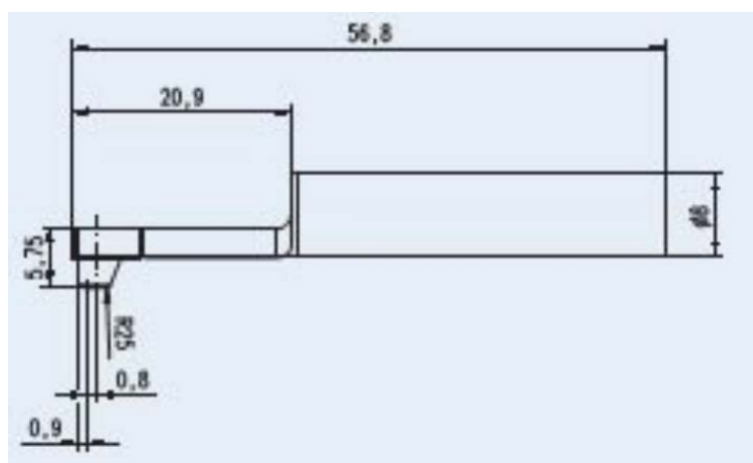


Рисунок 4.6 – Вигляд щупу РНТ 6-350

Застосування вищезазначеного обладнання виключає помилкові заміри, так як діапазон експериментів повністю забезпечено. Технічні характеристики щупа наведені в таблиці 4.2

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики щупа [40]

Система	Одноопорний датчик з сферичною опорою;
Радіус опори	у напрямку переміщення – 25 мм; у перпендикулярному напрямку – 2,9 мм;
Наконечник	0,8 мм – виступаюча частина
Діапазон виміру	350 мкм
Специфікація	щуп використовується для вимірювання плоских поверхонь, отворів діаметром від 6 мм, максимальною глибиною 17 мм.

4.4 Методика обробки результатів експериментальних досліджень

В ході проведених досліджень, отримані дані підлягатимуть визначенню залежностей між вхідними величинами та тими, що отримані.

Процес систематизації в цьому випадку досить суттєвий. Тому прийнято рішення, що буде складено таблицю, де рядки і стовпчики відповідатимуть за внесення отриманих даних щодо певного зразку. Саме це в подальшому надасть перевагу у зручності обробки.

Утворена система даних піддаватиметься аналітичним методами із найбільш підходящим режимом коригування вхідних величин. Використання регресійного аналізу дозволить застосувати формули та графічні залежності вхідних величин від вихідних.

Отже, спосіб регресійного аналізу, дозволить здійснити формування вхідних даних для проведення експерименту у вигляді таблиці (табл.4.3).

Таблиця 4.3 – Планування експериментальних досліджень

№ експерименту (зразку)	Кодові значення коефіцієнту при невідомих							
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_2 x_3$	$x_1 x_3$	$x_1 x_2 x_3$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1
7	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1

Метод заповнення таблиці 4.3 наступний:

- дані, що заповнюються в першу колонку (x_0) завжди дорівнюють одиниці.
- x_1 , x_2 , x_3 – дані коефіцієнтів відповідних вхідних величин в кодованій шкалі, це вхідні дані, що переведено в кодований вигляд, необхідний для зручності аналізу.
- колонки $x_1 x_2$, $x_2 x_3$, $x_1 x_3$ формуються методом перемноження комірок у рядку із значеннями, що вказані в назві колонки.

Перш за все, необхідно здійснити переведення отриманих значень і вхідних даних в кодовану шкалу із застосуванням формули (4.1):

$$x_j = \frac{y_j - y_{jc}}{y_{ji}} \quad (4.1)$$

де x_j – значення величини в кодованій шкалі, y_j – отримане значення вимірювальної величини, y_{jc} – середнє значення діапазону обчислюється за формулою (4.2), y_{ji} – інтервал вимірювань визначається за формулою (4.3).

$$y_{jc} = \frac{y_{jmin} + y_{jmax}}{2} \quad (4.2)$$

кде y_{jmin} – мінімальне значення діапазону вимірювань, y_{jmax} – максимальне значення діапазону.

$$y_{ji} = \frac{y_{jmin} - y_{jmax}}{2} \quad (4.3)$$

де y_{jmin} – мінімальне значення діапазону вимірювань, y_{jmax} – максимальне значення діапазону.

Отримані залежності носитимуть вигляд, оформлений за формулою (4.4), у відповідності до кількості вхідних даних вищезазначена формула може масштабуватися та скорочуватися. Представлено приклад формули для трьох вхідних величин:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 \quad (4.4)$$

де y – значення вхідної величини в кодованій шкалі, x_j – значення j -того коефіцієнта, a_i – обчислюється за формулою (4.5)

$$a_i = \frac{\sum_{i=0}^n x_i t_i}{n} \quad (4.5)$$

де t_i – значення відповідного коефіцієнту за планом дослідження. приклад якого наведений вище в таблиці 4.3, x_i – результат вимірювання i -того зразка, n – кількість дослідів.

Відповідно до здійснених обрахунків за рівняннями можна виконувати побудову графіків залежностей, а також переходити до визначення проміжних значень. Аналізуючи залежності, в кодованій шкалі, здійснювати визначення впливу коефіцієнтів на кінцевий результат. Серед недоліків слід зазначити те, що для

визначення проміжних значень, не описаних дослідженнями, досить не зручно постійно переводити значення вхідних величин в кодовану шкалу і результату в реальну шкалу. До того ж побудовані графіки залежностей, в кодованій шкалі, хоч є і наочними, проте по них не просто зрозуміти реальну картину, тобто їх можна назвати малоінформативні. З метою спрощення обчислень та побудови графіків залежностей в реальному діапазоні значень, необхідно перевести залежності в реальну шкалу.

Підставивши формулу (4.1) в формулу залежності (4.5), а далі спростивши її, отримано формулу залежності в реальній шкалі виміру.

При плануванні дослідження розглядається планування першого порядку та обрано фактори, які легко підконтрольні. Визначені інтервали для кожного фактору в межах яких будуть проведені експерименти.

Зважаючи на те, що кількість факторів відома, є можливість визначити кількість дослідів, які необхідні для реалізації всіх можливих комбінацій .

Застосовано формулу 4.6:

$$N = 2^K \quad (4.6)$$

де N – кількість дослідів, k – кількість змінних факторів.

Побудувавши за методикою описаною вище, всі залежності результату від вхідних величин. З метою наочності будують графіки. Варто зазначити, що в більшості випадків будуть побудовані графіки поверхонь, проте за умови великої кількості вхідних величин для більш повного розгляду необхідно будувати велику кількість таких графіків.

Зважаючи на значну кількість розрахунків, що у свою чергу вимагають, уникнення помилок, актуальним лишається питання автоматизації обрахунків.

Найбільш часто використовуються наступні набори ПЗ: MathCad, MathLab, Python і його модулі math, Wolfram Mathematica, Maxima.

Проаналізувавши представлені системи, для здійснення обчислень обрано набір ПЗ MathCad через ряд його переваг:

- просте імпортування вхідної інформації, практично з будь-яких джерел (Excell, баз даних текстових файлів, тощо.);

- доступність скриптової мови; наявність засосування без підключення зовнішніх модулів;
- доступність інструкцій на українській мові ;
- функціональність щодо одночасного застосування символьних та алгебраїчних обчислень; простота в налаштуванні і побудові графіків.

Висновок до четвертого розділу

У даному розділі було:

- визначено та описано параметри якості 3D-виробів, покращення яких є найбільш перспективним;
- проаналізовано методики визначення параметрів якості поверхневого шару та контролю розмірних параметрів 3D-виробів, що виготовлені із застосуванням адитивних технологій;
- сформовано алгоритм обробки результатів досліджень, що дозволяє сформулювати і детально дослідити залежності із вхідних даних та параметрів отриманих 3D-виробів.

5. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ 3D-ВИРОБІВ ОТРИМАНИХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДРУКУ

5.1. Вплив режимів друку за адитивними технологіями на геометричні параметри 3D-виробів

Попереднім етапом експерименту є проектування моделі зразків для друку, а також розрахунок кількості експериментальних дослідів.

Визначена кількість факторів дозволить здійснити розрахунки необхідної кількості зразків за формулою 4.6 (див. розділ 4 пункт 4).

Параметри режимів процесу друкування на 3D-принтері, що змінюються, дають розуміння кількості факторів, а саме: товщина перекриття δ_1 ; товщина бокової поверхні δ_2 ; швидкість друку v ; $k=3$;

$$N=2^3=8 \quad (5.1)$$

Отже, як видно із розрахунків, зразків має бути – 8 одиниць.

Вхідні параметри зразків досліджувались в межах:

- товщина перекриття, δ_1 – в діапазоні від 0,5мм до 3мм;
- товщина бокової поверхні δ_2 – в інтервалі від 0,5мм до 5мм;
- швидкість друку, v – діапазоном від 30 мм/с. до 60 мм/с, тобто $k=3$;

Діапазони зазначених параметрів δ_1 і δ_2 не є критично граничними, а для обох показників мінімумом є значення 0,2мм (обмеження по мінімальній товщині шару), а максимум – обмежується лише розмірами 3D-сувеніру.

Варто зазначити, що під час проведення досліджень виміри для визначення характеристик отриманих 3D-виробів (габаритні розміри, відповідальні або точні розміри, шорсткості поверхонь, значення кутів, тощо) проводились декілька разів, а обране середнє значення забезпечило зменшення похибки вимірювань.

У використовуваних формулах обрахунку варто враховувати різноманітні похибки, такі як похибка вимірювань, округлення, методу обрахунку, тощо.

Для проведення експерименту вибрано вісім експериментальних зразків у виді шестигранників, ескіз яких представлено на рисунку 5.1.

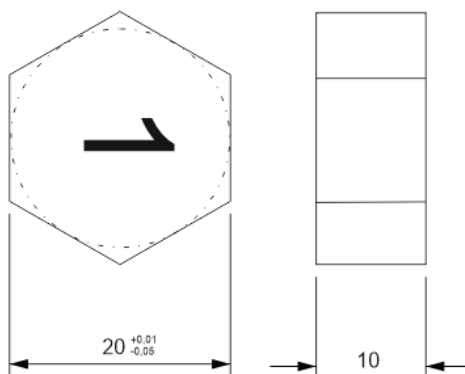


Рисунок 5.1– Ескіз досліджуваного зразка

Моделі зразків спроектовано в програмі Blender та збережено в файл .STL та представлено на рисунку 5.2.

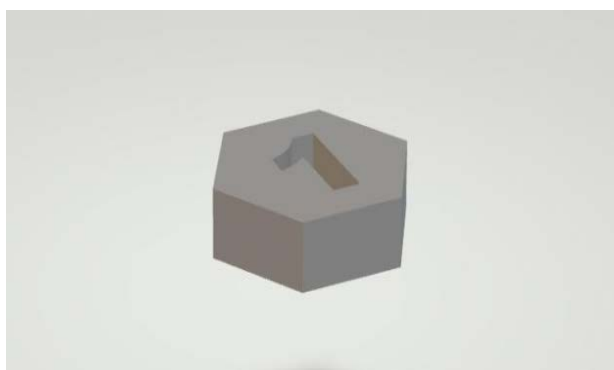


Рисунок 5.2– Експериментальний зразок №1 в форматі .STL

Кожен зразок відмічений своїм порядковим номером який, окрім функції нумерації, показує положення зразка під час друку.

Виготовлення зразків здійснювалося за вхідними параметрами, що наведено в таблиці 5.1. При цьому номер виготовлено зразка відповідає виконаному досліді

Таблиця 5.1 –Значення параметрів виготовлення дослідного зразка

Параметр	Номер досліді (зразка)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$\delta_1, \text{мм}$	0.5	3	0.5	3	0.5	3	0.5	3
$\delta_2, \text{мм}$	0.5	0.5	5	5	0.5	0.5	5	5
$V, \text{мм/с}$	30	30	30	30	60	60	60	60

Дослідні зразки за вказаними в таблиці 5.1 параметрами вимірювались у відповідності їх основних характеристик: шорсткості поверхонь, зовнішній вигляд

вимірювання представлений в попередньому розділі на рисунку 4.1; розмірів 3D-виробу за схемою, що представлена на рисунку 5.3.

Розміщення зразка для забезпечення процесу вимірювання відбувалось за допомогою помітки цифрою на поверхні виробу.

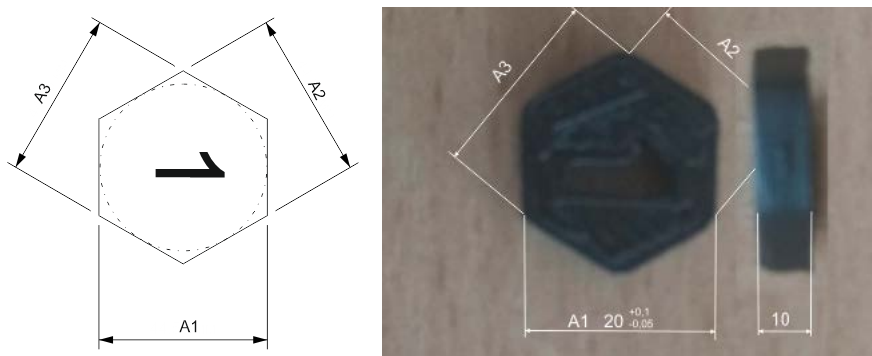


Рисунок 5.3– Схема вимірювання зразка

Шорсткість поверхні вимірювалась за допомогою профілометра MarSurf PS1 установка і схема вимірювання зображена на рисунку 4.2, визначення розмірів досліджуваних зразків виконувалося мікрометром МК1 0-25.

Для проведення досліджень, обробки отриманих даних і встановлення залежностей вихідних параметрів від вхідних було сформовано план проведення експерименту зображений в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – План заходів по проведенню дослідів

№ експерименту (зразку)	Кодові значення коефіцієнту при невідомих							
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_2 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1
7	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1

З метою спростити розрахунки та здійснити аналіз заходів експерименту та вхідних величин, що знаходяться в кодованій шкалі, було здійснено перерахунок за формулою (4.1) яка для параметру товщини покриття δ_1 буде мати вигляд (5.1).

$$X_1 = \frac{\delta_1 - \delta_{1c}}{\delta_{1i}} \quad (5.1)$$

За формулами (4.2), (4.3) розраховано середнє значення діапазону і інтервал вимірювань. Отримані розрахунки дають можливість використати формули (5.2) та (5.3) відповідно

$$\delta_{1c} = \frac{\delta_{1\min} + \delta_{1\max}}{2} = \frac{0,5+3}{2} = 1,75 \quad (5.2)$$

$$\delta_{1i} = \frac{\delta_{1\min} - \delta_{1\max}}{2} = \frac{0,5-3}{2} = 1,25 \quad (5.3)$$

Застосовано аналогічну методику проведення розрахунків і з наступними показниками (δ_2 , V) та отримано формули (5.4) - (5.9), з яких відповідно формули (5.4)-(5.6) для представлення величин в кодованій шкалі для значень товщини стінки, а (5.7)-(5.9) – та швидкості

$$X_2 = \frac{\delta_2 - \delta_{2c}}{\delta_{2i}} \quad (5.4)$$

$$\delta_{2c} = \frac{\delta_{2\min} + \delta_{2\max}}{2} = \frac{0,5+5}{2} = 2,75 \quad (5.5)$$

$$\delta_{2i} = \frac{\delta_{2\min} - \delta_{2\max}}{2} = \frac{0,5-5}{2} = 2,25 \quad (5.6)$$

$$X_3 = \frac{\delta_3 - \delta_{3c}}{\delta_{3i}} \quad (5.7)$$

$$\delta_{3c} = \frac{\delta_{3\min} + \delta_{3\max}}{2} = \frac{30+60}{2} = 45 \quad (5.8)$$

$$\delta_{3i} = \frac{\delta_{3\min} - \delta_{3\max}}{2} = \frac{30-60}{2} = 15 \quad (5.9)$$

З метою продовження експериментів отримані результати по здійсненим вимірюванням, представлено у вигляді таблиці 5.3.

Рисунки 5.4 – 5.6 характеризують отримані профілограми поверхні зразків.

Таблиця 5.3 – Зведені дані експериментальних досліджень

Найменування параметру	Зразок							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_a, \text{мкм}$	6,20	22,11	9,81	9,00	4,30	2,76	4,93	6,21
$A_1, \text{мм}$	20,45	20,45	20,41	20,45	20,45	20,46	20,06	20,41
$A_2, \text{мм}$	20,37	20,32	20,32	20,38	20,26	20,28	20,47	20,35
$A_3, \text{мм}$	20,08	20,16	20,04	20,00	20,02	20,01	20,11	20,00

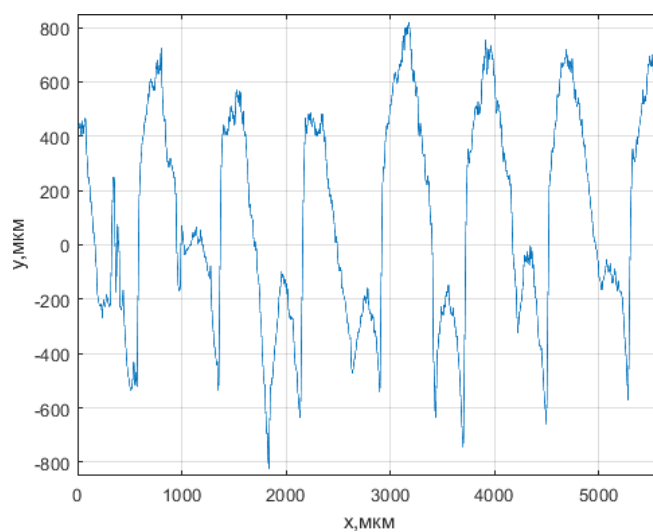


Рисунок 5.4– Поверхнева профілограма зразка 1

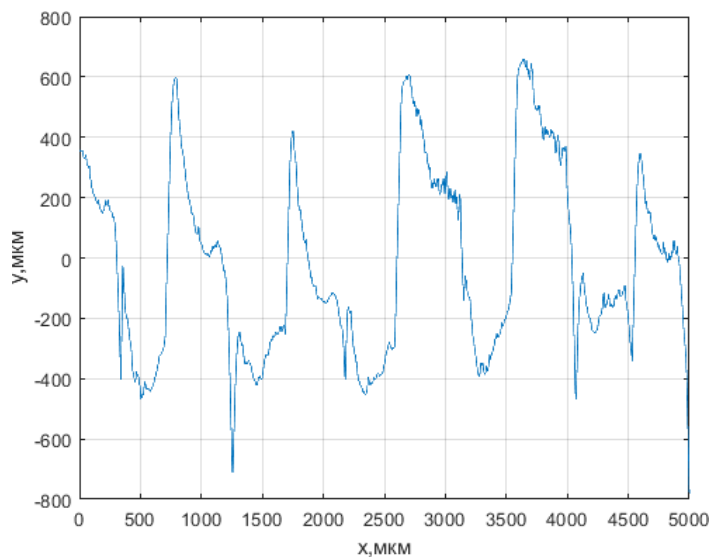


Рисунок 5.6– Поверхнева профілограма зразка 4

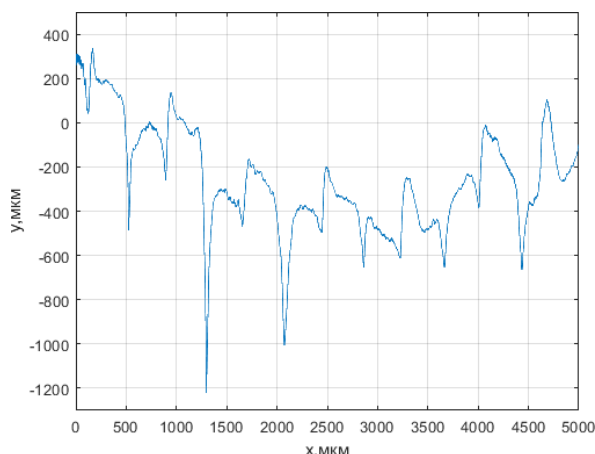


Рисунок 5.8– Поверхнева профілограма зразка 6

Дослідження якості поверхонь експериментальних зразків оцінювалось за допомогою мікроскопу типу БМІ-1, відповідно отримані у мікроскопі зображення поверхонь анонсовано на рисунках 5.7 - 5.12 , що досить добре характеризують структури поверхонь експериментальних зразків.

Також виявлено та представлено факти недоліків по заповненню перекриття зразка №2 зображеного на рисунку 5.12. Проаналізовано той факт, що профілі бокових поверхонь зразків майже аналогічні одне від одного, тому в якості для прикладу надано вигляд поверхні зразка 1 (рисунок 5.10).



Рисунок 5.9– . Схема встановлення зразка в мікроскопі

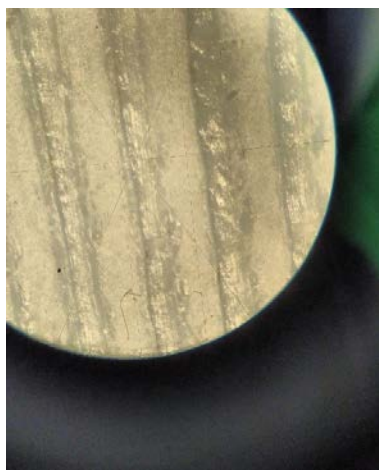


Рисунок 5.10 – Нижня поверхня зразка №1

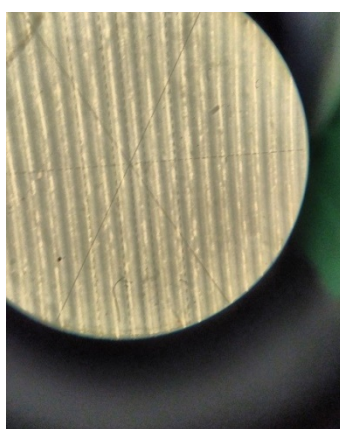


Рисунок 5.11 – Бокова поверхня зразка №1

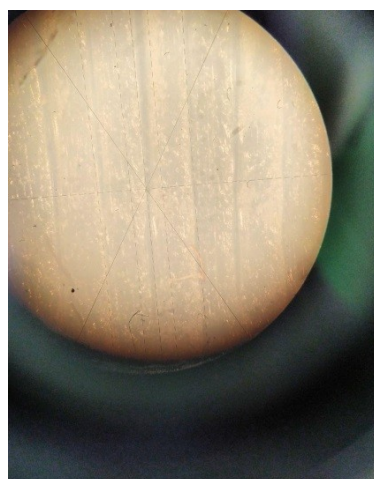


Рисунок 5.12 – Нижня поверхня зразка №2

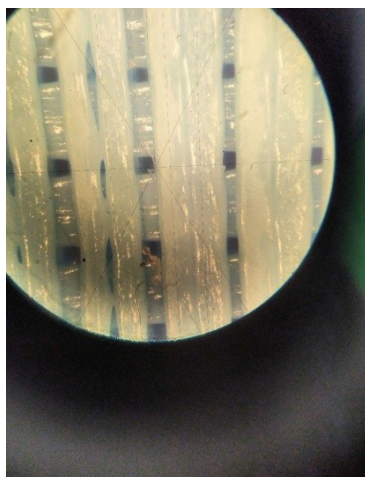


Рисунок 5.13 – Верхня поверхня зразка №2

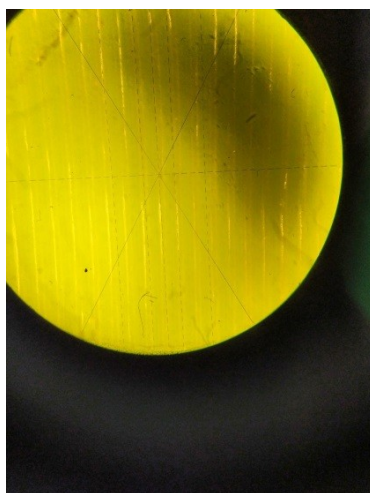


Рисунок 5.14 – Верхня поверхня зразка №6

Із застосуванням шкали мікроскопа, крок визначення ліній для верхніх поверхонь варіювався від 0,25 мкм до 0,96 мкм.

Здійснено обрахунок коефіцієнтів залежності вхідних величин, вигляд яких представлено в попередньому розділі формулою (4.4), а також за формулою (4.5) отримано значення коефіцієнтів. Приведемо приклад розрахунку коефіцієнтів для визначення рівняння залежності шорсткості від вхідних параметрів. Їх розрахунок має вигляд та визначається за формулами (5.10)-(5.16):

$$a_0 = \frac{\sum_{i=0}^8 Ra_i \times x_{0i}}{8} = 8,17 \quad (5.10)$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^8 Ra_i \times x_{1i}}{8} = 1,85 \quad (5.11)$$

$$a_2 = \frac{\sum_{i=2}^8 Ra_i \times x_{2i}}{8} = -0,68 \quad (5.12)$$

$$a_3 = \frac{\sum_{i=3}^8 Ra_i \times x_{3i}}{8} = -3,61 \quad (5.13)$$

$$a_{12} = \frac{\sum_{i=12}^8 Ra_i \times x_{12i}}{8} = -1,74 \quad (5.14)$$

$$a_{23} = \frac{\sum_{i=23}^8 Ra_i \times x_{23i}}{8} = 1,7 \quad (5.15)$$

$$a_{13} = \frac{\sum_{i=13}^8 Ra_i \times x_{13i}}{8} = -1,92 \quad (5.16)$$

Здійснено опрацювання величин коефіцієнтів залежностей параметрів товщини перекриття (δ_1) та товщини стінки (δ_2). На основі цих даних побудовано зведену таблицю коефіцієнтів 5.4.

Таблиця 5.4.- Зведені значення коефіцієнтів математичної моделі.

Найменування величини	Коефіцієнти (кодована шкала)						
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_{12}	a_{23}	a_{13}
R_a	8.17	1.85	-0.68	-3.61	-1.74	1.70	-1.92
A_1	20.39	0.05	-0.06	-0.05	0.05	-0.05	0.04
A_2	20.34	-0.01	0.04	-0.00375	-0.00375	0.03	-0.01
A_3	20.05	-0.01	-0.01	-0.02	-0.03	0.03	-0.02

Розрахунки за формулою (4.4) дають можливість отримати значення коефіцієнтів у залежностях, описаних формулами (5.17)-(5.20):

$$R_a = 8,17 + 1,85x_1 - 0,68x_2 - 3,61x_3 - 1,74x_1x_2 + 1,7x_2x_3 - 1,92x_1x_3 \quad (5.17)$$

$$A_1 = 20,39 + 0,05x_1 - 0,06x_2 - 0,05x_3 + 0,05x_1x_2 - 0,05x_2x_3 + 0,04x_1x_3 \quad (5.18)$$

$$A_2 = 20,34 - 0,01x_1 + 0,04x_2 - 0,00375x_3 - 0,00375x_1x_2 + 0,03x_2x_3 - 0,01x_1x_3 \quad (5.19)$$

$$A_3 = 20,05 - 0,01x_1 - 0,01x_2 - 0,002x_3 - 0,003x_1x_2 + 0,03x_2x_3 - 0,02x_1x_3 \quad (5.20)$$

Залежності розмірів експериментів, представлені в кодованій шкалі використовувати для подальшого аналізу. Тобто проаналізовано параметри, які негативно або позитивно впливають на кінцевий результат.

Детальний аналіз формули (5.18) – (5.20), що виконана для відображення залежності лінійних розмірів 3D-виробів від налаштувань друкарського обладнання.

Дослідження отриманих залежностей вказує на те, що зі збільшенням параметру x_2 або товщини стінки, як і параметру x_3 – швидкості друку, у своїй основній більшості випадків, мають позитивний вплив на якість виробу. Тобто,

отримані залежності характеризують те, що в загальному вхідні параметри мало чим і мало як впливають на забезпечення відповідності розмірів отриманого 3D-сувеніру, а отже, суттєвий вплив залишається за точністю переміщення сопла 3D-обладнання та коефіцієнтом усадки пластику при застиганні.

З метою підтвердження вищезазначеного факту, а також для побудови графіків, необхідно перевести отримані залежності з кодової шкали в натуральні за значенням величини, це надасть отриманій графічній інформації більшої інформативності.

Здійснено підстановку даних у формули (5.18) – (5.20) і перераховано вхідні значення в кодовану шкалу, скоротивши їх, отримано залежності у вигляді, представленим у формулами (5.21) – (5.23):

$$A_1 = 20,6 + 0,105\delta_1 - 0,00889\delta_2 - 0,00299V + 0,0178\delta_1\delta_2 - 0,0213\delta_1V + 0,0148\delta_2V \quad (5.21)$$

$$A_2 = 20,4 - 0,197\delta_1 - 0,0199\delta_2 - 0,00176V - 0,00133\delta_1\delta_2 - 0,000533\delta_1V + 0,000889\delta_2V \quad (5.22)$$

$$A_3 = 20,01 - 0,0693\delta_1 - 0,0258\delta_2 - 0,026V - 0,0107\delta_1\delta_2 - 0,00107\delta_1V + 0,000889\delta_2V \quad (5.23)$$

В результаті опрацьованого масиву даних, із наведених залежностей ((5.21) – (5.23)) здійснено побудову графіків, що характеризують залежності розмірів 3D-виробів в залежності від товщини стінки та товщини покриття, при сталій швидкості 30 мм/с – рисунки 5.13 – 5.15 і 60 мм/с - рисунки 5.16 – 5.18.

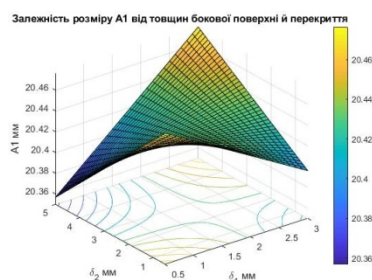


Рисунок 5.13 – Залежність A_1 від товщини БП та покриття, при швидкості 30 мм/с

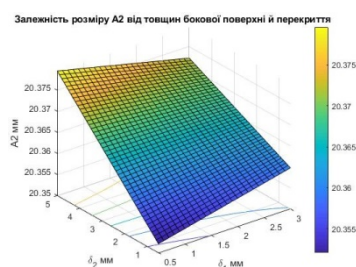


Рисунок 5.14 – Залежність розміру A_2 від товщини БП та покриття, при швидкості 30 мм/с

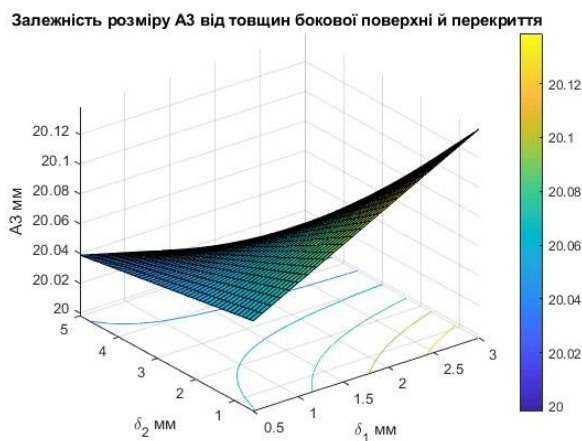


Рисунок 5.15 – Залежність A_3 від товщини БП та перекриття, при швидкості 30 мм/с

Побудовані графіки на рисунках 5.13-5.15 вказують на те, що збільшення товщини стінки підвищує точність значення отриманого розміру 3D-виробу, при цьому для розміру A_2 (рисунок 5.14) навпаки – похибка значення отриманого розміру 3D-виробу зростає.

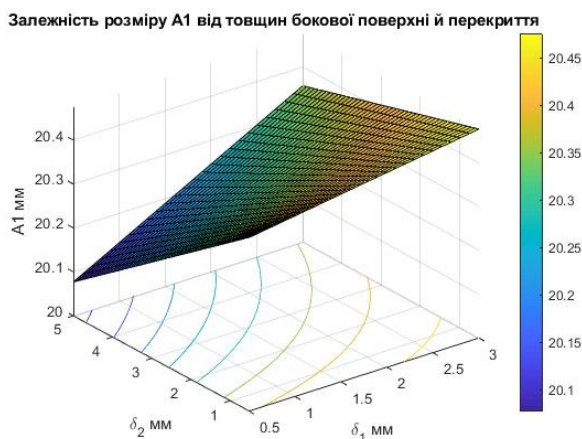


Рисунок 5.16 – Залежність A_1 від товщини БП та перекриття, при швидкості 60 мм/с

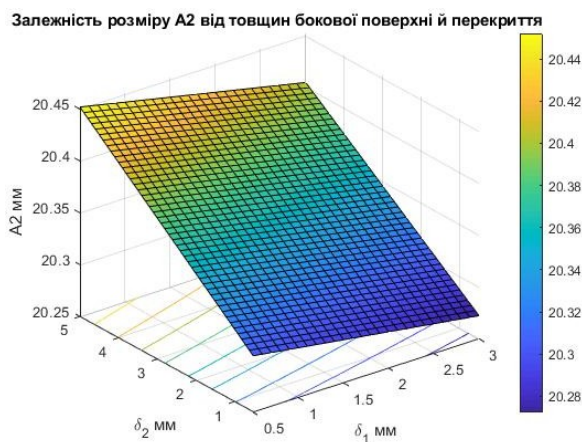


Рисунок 5.17 – Залежність A_2 від товщини БП та перекриття, при швидкості 60 мм/с

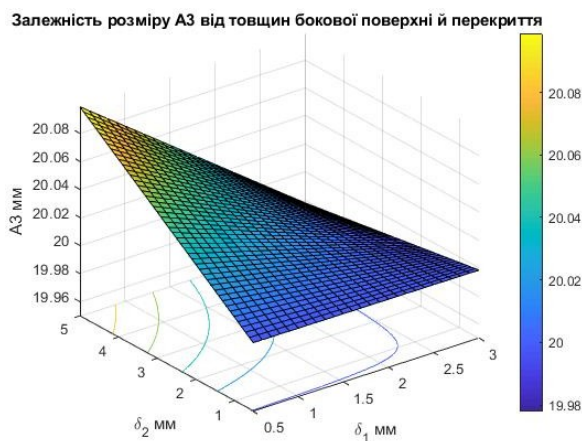


Рисунок 5.18 – Залежність A_3 від товщини БП та перекриття, при швидкості 60 мм/с

Порівняльний аналіз графіків залежності розмірів A_1, A_2 та A_3 зі зміною швидкості друку, вказує на те, що існує пряма залежність розміру A_2 . Про це свідчать показники на рисунках 5.17 та 5.14

Ще один факт аналізу графічної інформації говорить про те, що при підвищенні швидкості здійснення друку підвищується точність розміру отриманого виробу.

З метою глибшого аналізу вищезазначеного факту, здійснено побудову графіків, що характеризують залежності розмірів 3D-виробів від товщини бокової поверхні та швидкості з незмінною товщиною поверхні перекриття, їх представлено на рисунках 5.19 – 5.21.

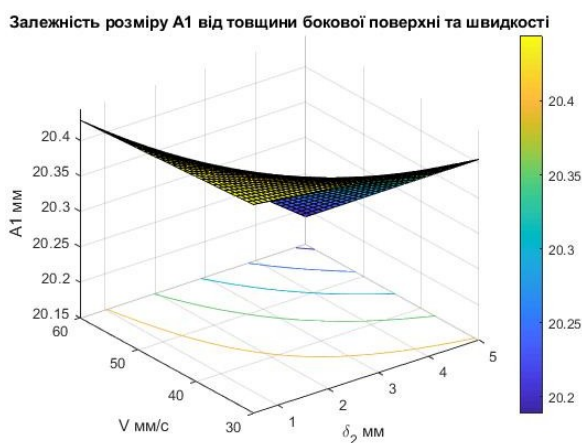


Рисунок 5.19 – Залежність A_1 від товщини БП та швидкості при незмінній товщині перекриття

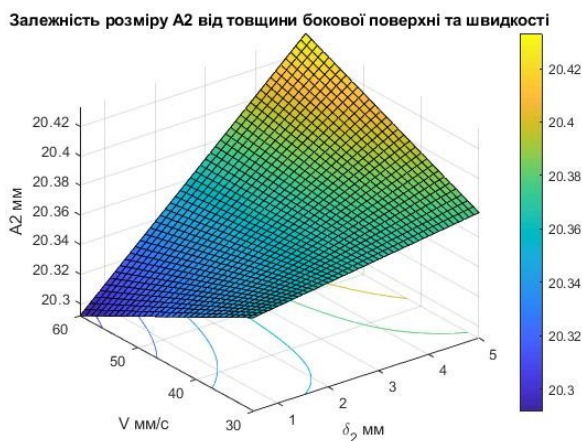


Рисунок 5.20 – Залежність A_2 від товщини БП та швидкості при незмінній товщині перекриття

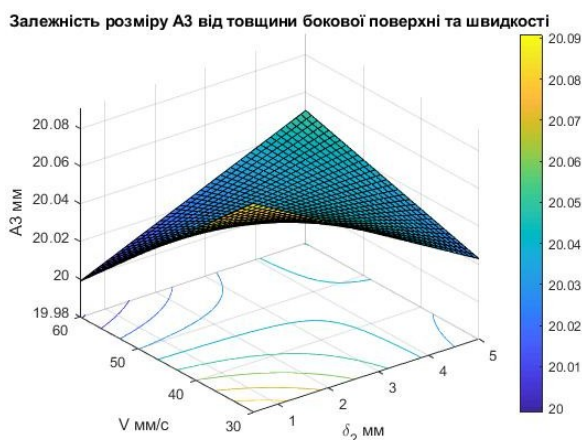


Рисунок 5.21 – Залежність A_3 від товщини БП та швидкості при незмінній товщині перекриття

За результатами, що зазначені на отриманих графіках видно, що при підвищенні швидкості друку і одночасному з цим зменшенні товщини стінки 3D-виробу, можна отримати більшу розмірну точність. Разом з тим, одночасне зменшення швидкості друку і товщини стінки 3D-виробу знижують цю точність. Можна також зазначити, що за низької швидкості друку раціонально підвищувати товщину стінки 3D-виробу, це збільшує точність розмірів надрукованого результату.

5.2 Вплив режимів друку на шорсткість поверхонь 3D-виробів, що отримані із застосуванням адитивних технологій

Детальний аналіз величин, зазначених у формулі (5.21) вказує на те, збільшення швидкості друку, товщини стінки та поєднання цих параметрів, а також поєднання товщини стінки і товщини перекриття призводить до підвищення якісних характеристик шорсткості поверхні отриманого 3D-виробу.

Пояснення цьому факту досить просте, адже в результаті збільшення швидкості друку, витратні матеріали, екструдовані на попередньому шарі як і розташована поряд щойно екструдована нитка, не встигають охолотитись і відповідно застигнути, що в свою чергу призводить до збільшення адгезії в самому шарі та між попереднім і наступним шаром.

Відповідно в результаті підвищення товщини стінки і перекриття відбудеться зменшення просідання витратного матеріалу на внутрішньому заповненні. Можна зробити висновок про те, що збільшення товщини стінок призведе до отримання меншої площі структур заповнення і відповідно буде менша кількість місць, де нитка пластику провисатиме під час друкарського процесу. Отже, в такому разі підвищення товщини перекриття досить позитивно вплине на зменшення провисань пластику, особливо, на перших суцільно заповнених шарах 3D-виробу.

Несподіваними виявились параметри, що призводять до втрати якості поверхні виробів, отриманих методом 3D-друку. Ними визначено товщину перекриття та поєднання параметрів швидкості здійснення друку і товщини стінки.

Неочікуваним результатом стало те, що збільшення товщина перекриття призводить до втрати якості отриманих виробів. Тому виникло припущення щодо занадто широко обраного діапазону зміни цього параметру (від 0,5мм до 3мм) у експериментах, так як це могло призвести до накопичення похибки.

Оформлення формули (5.17) розрахунками, здійснення перерахунку вхідних значень в кодовану шкалу та їх скорочення, дало можливість сформуваи залежність шорсткості поверхонь, отриманих виробів від встановлених налаштувань, тобто режимів друку. Наведено виміри в натуральній шкалі та здійснено розрахунки за формулою (5.24):

$$R_a = 12,4 + 7,795\delta_1 - 1,49\delta_2 - 0,2V + 0,619\delta_1\delta_2 - 0,102\delta_1V + 0,05\delta_2V \quad (5.24)$$

Так як графічна візуалізація даних є більш інформативна для сприйняття, побудовано графіки залежностей параметрів, що впливають на шорсткість поверхонь виробів, отриманих із застосуванням адитивних технологій та подано на рисунках 5.22 – 5.25.

Залежність шорсткості від товщин бокової поверхні й перекриття

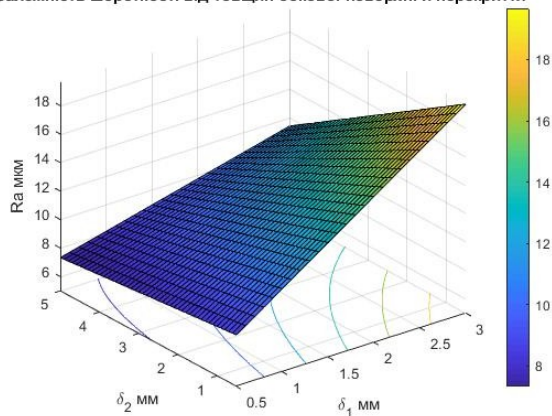


Рисунок 5.22 –Залежність шорсткості від товщини БП та перекриття при швидкості 30мм/с

Залежність шорсткості від товщин бокової поверхні й перекриття

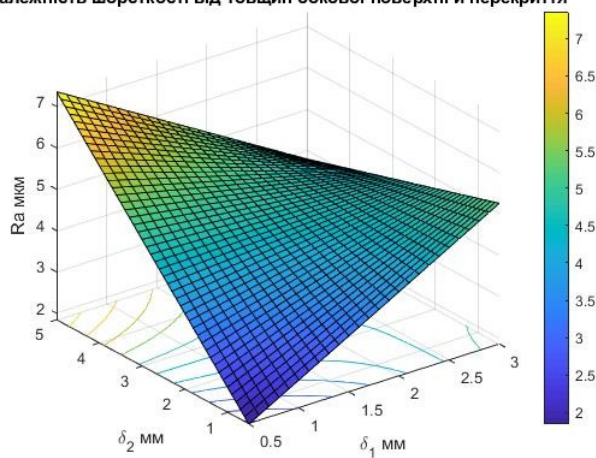


Рисунок 5.23– Залежність шорсткості від товщини БП та перекриття при швидкості 60мм/с

Залежність шорсткості від товщини бокової поверхні та швидкості

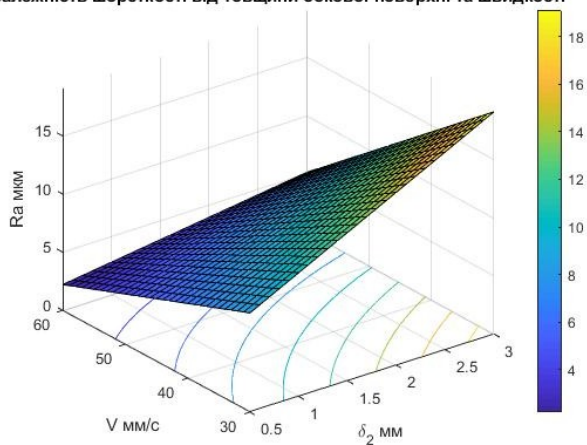


Рисунок 5.24 – Залежність шорсткості від товщини БП та сталій швидкості при товщині перекриття –1.5мм

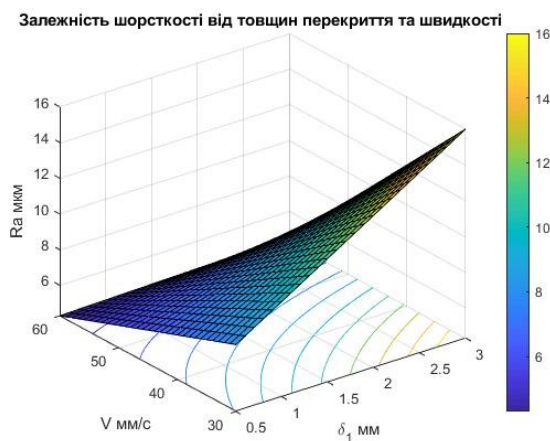


Рисунок 5.25 – Залежність шорсткості від товщини БП та сталій швидкості при товщині покриття -0.8 мм

Аналіз рисунків 5.24 та 5.25 вказує на те, що зі збільшенням швидкості друку до максимального її значення, а також при цьому підвищенні товщини бокової поверхні та покриття призводить до збільшення шорсткості поверхні 3D-виробів.

Найоптимальніший результат щодо шорсткості поверхні можна отримати при максимальному підвищенні швидкості, та зменшенні товщини стінки, згідно графіку, представленою на рисунку 5.24. А от зміна товщини покриття при високій швидкості друку практично не впливає на отриманий результат, про це свідчить графік, зображений на рисунку 5.25.

4.3 Визначення оптимальних параметрів друку 3D-виробів за АТ

Одним із важливих етапів виготовлення 3D-виробів є вибір оптимальних параметрів налаштувань друку 3D-обладнання, адже саме вони мають вплив на якість отриманої поліграфічної продукції із застосуванням адитивних технологій.

Оптимізація отриманих залежностей передбачала застосування широковідомих методів математичного моделювання. Як найпростіший метод оптимізації залежностей кількох змінних, було обрано метод по координатного спуску, а для оптимізації функції однієї змінної обраний метод дихотомії як найбільш швидкий.

Для забезпечення оптимальних результатів щодо шорсткості поверхні 3D-виробів здійснено визначення параметрів: $\delta_1=0.52$, $\delta_2=4.98$, $V=59.94$.

Відповідно до вищевказаних величин прогнозована шорсткість $Ra=4.88$.

Зважаючи на конструктивні особливості 3D-обладнання типу XYZprinting моделі da Vinci, стає зрозумілим, що крок параметра δ_1 може набувати 0.1мм, проте оптимально обрати крок кратний діаметру сопла (0.4 мм), тож найбільш раціональним буде зупинитись на значенні $\delta_1=0.8$ мм.

Формування товщини стінок виробу відбувається із врахуванням вищезазначених залежностей, тому раціональний вибір слід зупинити на значенні $\delta_2=4.4$.

Швидкість здійснення друку у досліджуваному обладнанні має крок, що складає 1 мм/с, відповідно раціональне обране значення $V=60$ мм/с.

Щодо отримання найоптимальнішого показника розміру A_1 експериментально визначено величини параметрів: $\delta_1=2.84$, $\delta_2=1.06$, $V=33.75$. Відповідно до яких прогнозований розмір A_1 складає – 20.41.

Обґрунтування найоптимальнішого показника розміру A_2 .

Зважаючи на конструктивні особливості 3D-обладнання типу XYZprinting моделі da Vinci, стає зрозумілим, що крок параметра δ_1 може набувати 0.1мм, проте оптимально обрати крок кратний діаметру сопла (0.4 мм), тож найбільш раціональним буде зупинитись на значенні $\delta_1=2.8$ мм.

Формування товщини стінок виробу відбувається із врахуванням вищезазначених залежностей, тому раціональний вибір слід зупинити на значенні $\delta_2=1,2$.

Швидкість здійснення друку у досліджуваному обладнанні має крок, що складає 1 мм/с, відповідно раціональне обране значення $V=34$ мм/с.

Щодо отримання найоптимальнішого показника розміру A_2 експериментально визначено величини параметрів: $\delta_1=1.12$, $\delta_2=1.62$, $V=52.5$. Відповідно до яких прогнозований розмір A_2 складає – 20.33.

Обґрунтування найоптимальнішого показника розміру A_3 .

Зважаючи на конструктивні особливості 3D-обладнання типу XYZprinting моделі da Vinci, стає зрозумілим, що крок параметра δ_1 може набувати 0.1мм, проте оптимально обрати крок кратний діаметру сопла (0.4 мм), тож найбільш

раціональним буде зупинитись на значенні $\delta_1=1.2$ мм.

Формування товщини стінок виробу відбувається із врахуванням вищезазначених залежностей, тому раціональний вибір слід зупинити на значенні $\delta_2=1,6$.

Швидкість здійснення друку у досліджуваному обладнанні має крок, що складає 1 мм/с, відповідно раціональне обране значення $V=53$ мм/с.

Щодо отримання найоптимальнішого показника розміру A_2 експериментально визначено величини параметрів: $\delta_1=0.81$, $\delta_2=3.87$, $V=30$ мм/с. Відповідно до яких прогнозований розмір A_3 складає – 20.41.

Обґрунтування найоптимальніших кінцевих показників.

Зважаючи на конструктивні особливості 3D-обладнання типу XYZprinting моделі da Vinci, стає зрозумілим, що крок параметра δ_1 може набувати 0.1мм, проте оптимально обрати крок кратний діаметру сопла (0.4 мм), тож найбільш раціональним буде зупинитись на значенні $\delta_1=0.8$ мм.

Формування товщини стінок виробу відбувається із врахуванням вищезазначених залежностей, тому раціональний вибір слід зупинити на значенні $\delta_2=4$.

Швидкість здійснення друку у досліджуваному обладнанні має крок, що складає 1 мм/с, відповідно раціональне обране значення $V=30$ мм/с.

Зважаючи на досить широкий діапазон отриманих значень, для раціонально вибору значення всіх параметрів, їх було усереднено.

Отже, експериментальні дослідження показали, що оптимальними величинами параметрів є значення: $\delta_1=1.32$, $\delta_2=2.88$, $V=44.04$ мм/с..

Зважаючи на конструктивні особливості 3D-обладнання типу XYZprinting моделі da Vinci, параметри налаштувань, встановлених для обладнання будуть наступними: $\delta_1=1.4$, $\delta_2=2.8$, $V=44$ мм/с.

4.4 Розробка практичних рекомендацій з раціонального використання друку 3D-виробів за адитивними технологіями

Аналізуючи та враховуючи сучасні можливості адитивних технологій, 3D-принтер перетворюється на універсальний інструмент створення різноманітних конструкцій, починаючи від сувенірних виробів, таких як іграшки та скульптури, закінчуючи складними виробами будь якої галузі сучасного виробництва.

Запорукою отримання якісних 3D-виробів, є вибір оптимальні режимів друку 3D-обладнання. До них належить, як його програмне налаштування так і налаштування слайсингу моделі.

Результати експериментальних досліджень дали можливість визначитись із раціональними значеннями параметрів друку сувенірних виробів із застосуванням адитивних технологій таких як швидкість, товщина перекриття та бокової поверхні, а отже, їх прийнято в межах $\delta_1=1.4$, $\delta_2=2.8$, $V=44\text{мм/с}$.

Разом з тим ці параметри не є ідеальними, так як в нашому випадку вони усереднені, зважаючи на особливості обладнання друку, та для отримання заданої якості виробу в дослідженнях.

Однак зазначимо, що поєднання параметрів товщини стінки та товщини перекриття однозначно впливає на міцність отриманого виробу. Саме тому ці параметри підлягають коригуванню в залежності від вимог подальшої експлуатації виробу. Тобто для друку інших сувенірних виробів вказані режими будуть коригуватись.

Отже, однією із головних рекомендацій є те, що для підвищення точності друку, необхідно обирати товщину перекриття та товщину стінок виробу кратну діаметру сопла. Щодо швидкості, то її бажано коригувати в залежності від шарів з мінімальною площею, адже при надто низькій площі поверхні на декількох шарах, що йдуть одне за одним, виріб не встигатиме охолоджуватись і буде в подальшому вибракуваний.

Висновки до п'ятого розділу

В даному розділі проведено дослідження відповідно до методики досліджень параметрів якості 3D-виробів, отримуваних із застосуванням адитивних технологій.

Здійснено вибір засобів та обладнання для проведення досліджень, що дозволило провести дослідження якості отриманих 3D-виробів.

Дослідження щодо поверхонь отримано за допомогою профілометра та мікроскопа, а розміри із застосуванням мікрометра.

Здійснено відтворення та аналіз закономірностей впливу вхідних параметрів на якість отриманих поверхонь та їх розмірів, що дозволили в подальшому визначити, як вхідні параметри впливають на той чи інший вихідний параметр.

Візуалізація даних стала можливою завдяки переведенню отриманих залежностей з кодової шкали в реальну шкалу виміру.

Здійснено раціональний підхід до розрахунку отриманих залежностей і визначено усереднені оптимальні параметри для виготовлення 3D-виробів із застосуванням адитивних технологій.

6 ТЕХНОЛОГІЯ ЛАЗЕРНОГО ГРАВІЮВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ 3D-ОБЛАДНАННЯ

6.1 Загальна характеристика технології лазерного гравіювання

Все більшого ужитку та застосування у різних сферах сучасного виробництва знаходять лазерні технології. Використання лазерної технології не оминуло і поліграфічну сферу, а саме рекламно-сувенірний напрямок та пакування. Справа в тому, що при виготовленні 3D-обладнання виробники почали створювати моделі, які одночасно можуть виконувати функції як 3D-друку, так і лазерного гравіювання. Прикладом такого обладнання і є 3D-принтер типу XYZprinting моделі «da Vinci 1.0 Pro 3-in-1»

Разом з тим, ще досить значна частина 3D-обладнання із застосуванням різновидів лазерних технологій перебувають у стадії дослідження.

Опис технології та досліджень параметрів якості нанесення із застосуванням лазерних технологій у роботі викликаний тим, що використане у дослідженнях обладнання має такі розширені функції, але не є основною метою та завданнями для магістерської дисертації. У зв'язку із цим як огляд, так і дослідження цього напрямку будуть досить поверхневими у порівнянні із дослідженнями, що стосуються адитивних технологій.

Перевагою застосування лазерних технологій у поліграфії на 3D-обладнанні є простота управління лазерним пучком, точність виконаних робіт по нанесенню зображень і оперативність, відсутність безпосереднього контакту з матеріалом нанесення, можливість нанесення на надтонких ділянках сувенірної продукції.

Лазерне гравіювання у сфері поліграфії застосовується для нанесення текстової та графічної інформації на поверхню 3D-виробу або виробу з іншого матеріалу під впливом високо інтенсивного лазерного випромінювання.

На сьогодні виділяють чотири типи лазерного впливу на поверхню оброблюваного матеріалу (рис.6.1 а, б, в, г):

- гравіювання поверхні видаленням матеріалу,
- створення колірною поверхневого контрасту,

- оплавлення поверхні,
- гравіювання з оплавлення.

Гравіювання сфокусованим випромінюванням видаляє частину матеріалу до 100 мкм, до 0,5 мм глибини матеріалу видаляється при художньому гравіюванні та до 3,5 мм –при глибокому гравіюванні.

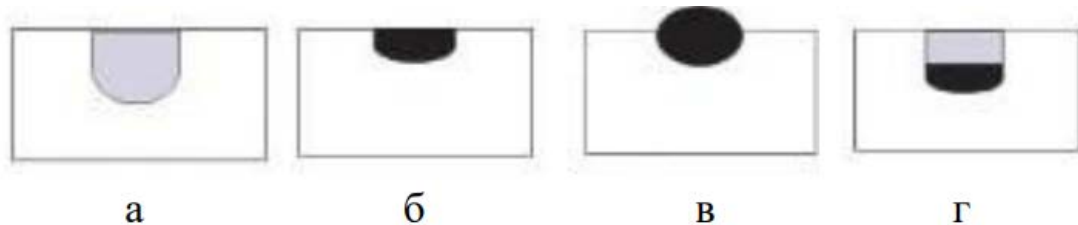


Рисунок 6.1 – Типи впливу лазерного випромінювання на поверхню оброблюваного матеріалу: а – гравіювання поверхні видаленням матеріалу, б – поверхневий контраст, в – оплавлення поверхні, г – гравіювання з оплавленням

Гравіювання найчастіше наносять на поверхні із дерева, металу (зазвичай на вироби з вуглецевої і нержавіючої сталі), кераміки, оргскло і акрил (рис. 6.2-6.4)



Рисунок 6.2 – Гравіювання сувенірних виробів із застосуванням лазерної технології



Рисунок 6.3 – Гравіювання сувенірних виробів із застосуванням лазерної технології



Рисунок 6.4 – Гравіювання сувенірних виробів із застосуванням лазерної технології

6.2 Лазерне гравіювання як спосіб сучасного маркування в поліграфії

У списку найзатребуваніших лазерних технологій поліграфічної промисловості, на ряду із лазерним розрізуванням, яке має можливості для виготовлення сувенірів різних за типорозмірами та геометричною складністю, особливо місце належить застосуванню лазерного маркування сувенірної продукції та паковань для неї і не тільки.

Технології лазерного гравіювання, що застосовані в поліграфії використовуються для широкого спектру матеріалів, серед яких: пластики та гуми, папір і картон, дерево та шкіра. Доречі, вищезазначені технології знайшли широке застосування не лише у рекламно-сувенірному напрямку, а й у маркуванні поліграфічної продукції.

Сьогодні 90% ринку із послуг по маркуванню поліграфічної продукції займає саме лазерне. Справа в тому, у порівнянні із механічним маркуванням (тиснення, висікання, перфорація, гравіювання, застосування штампів, а також струменним або термотрансферним друком), лазерне маркування має значно нижчу вартість та високою гнучкістю, а також процес повністю керованим комп'ютерним обладнанням.

Поєднання лазерних технологій та комп'ютерного обладнання дає можливість здійснити нанесення графічних та текстово-ідентифікаційних даних без застосування витратних матеріалів, а лише за рахунок їх введення в комп'ютерну

програму та корегуванням дизайну. Це істотно впливає на зміну традиційного процесу виробництва та надає більш оперативні інструменти щодо гнучкості і скорочення повного процесу виготовлення продукту.

Лазери можуть створювати позначки на полімерах за допомогою одного з чотирьох процесів: зміни кольору, піноутворення при плавленні, гравіювання або гравіювання зі зміною кольору.

Лазерне гравіювання можна наносити майже на всі класи комерційних пластичних полімерів, що і є основою для сувенірних виробів.

Однак для того, щоб нанести гравіювання на деякі з них, необхідно використовувати добавки. Залежно від того, які використовуються матеріали і добавки, позначки можуть бути світлими на темному фоні або темними на світлому фоні. Однак більш сучасні типи гравірувальних систем включають в себе темні або світлі відтінки на кольорових фонах. Такими відмітками можуть бути білий, чорний або різні відтінки фонових кольорів. Крім цього, відмітки можуть мати різні кольори на білому, чорному або сірому фоні.

На рисунку 6.5 зображені: кнопка клавіатури, темне гравіювання на світлому фоні (ліворуч); логотип компанії, світле гравіювання на темному фоні (у центрі); зроблений на замовлення брелок для ключів золотого кольору з одноколірною подвійною рамкою (праворуч).



Рисунок 6.5 – Гравіювання сувенірних виробів із застосуванням лазерної технології

Технологія лазерного гравіювання дозволяє створювати чіткі позначення, наприклад, штрих-коди, QR-коди та інші символічні зображення.

Найперспективнішим рішенням при роботі із малогабаритними 3D-сувенірами, що до того ж можуть бути крихкими, і в яких може відбутись руйнація є саме лазерне маркування.

Завдяки тому, що лазерне маркування є безконтактним процесом з

поверхнею виробу, ймовірність псування сувенірного виробу мінімізується.

До основних переваг лазерного маркування відноситься:

- захист від підробок;
- довговічність покриття та точність маркованого зображення, що визначаються високою видільною і роздільною здатністю;
- широкий спектр використовуваних матеріалів;
- висока якість обробки за рахунок мінімальних зон термічного впливу, зниження теплових деформацій, відсутності силового впливу інструменту на виріб;
- підвищення швидкості обробки (у кілька разів у порівнянні з традиційними методами маркування);
- скорочення в кілька разів витрат часу на підготовку виробництва при маркуванні нової продукції;
- висока продуктивність процесу при маркуванні виробів великих за розміром поверхонь чи великих тиражах;
- відсутність трафаретів та інших витратних матеріалів;
- можливість маркування деталей із заглибленнями у вигляді гострих кутів та переходів без радіусів;
- незважаючи на значні інвестиції в обладнання для лазерного маркування, вартість самого маркування набагато нижча з точки зору експлуатаційних витрат;
- екологічність процесу.

6.3 Лазерне кольорове гравіювання

В основі кольорового гравіювання металів лежить процес утворення на поверхні виробу, що гравірується плівок з оксидів і нітридів матеріалу під впливом лазерного випромінювання.

Кольори мінливості з'являються на гладкій поверхні металу або мінералу в результаті утворення тонкої прозорої поверхневої окисної плівки (яку називають мінливістю) і інтерференції світла в ній. Оксидні плівки формуються при лазерній обробці на відкритому повітрі. Для отримання нітридних плівок метали обробляють

у спеціальній камері з піддувом азоту.

В обох випадках колір плівки залежить від її хімічного складу і товщини. На практиці частіше створюють оксидні плівки, так як це не вимагає спеціального технологічного оснащення для азотування.

Однак лазерна технологія отримання кольорових оксидних плівок має ряд значних переваг, в тому числі швидкість, локальність впливу і високу точність обробки. Це досягається завдяки малому (десятки мікрометрів) діаметру лазерного променя і застосуванню високоточних швидкісних систем сканування.

Поява кольорів мінливості обумовлена інтерференцією світла, яка виникає в результаті складання хвиль, що відбиваються від поверхневого шару оксидної плівки і поверхні самого металу. При цьому в міру зростання товщини оксиду послідовно виникають умови гасіння променів з тією чи іншою довжиною хвилі, в результаті чого колір плівки може змінюватися від фіолетового до червоного. Однак на колір плівки впливає також і ступінь шорсткості поверхні металу.

6.4 Вплив режимів лазерного гравіювання на якість отриманих оптичних показників

Дослідження впливу режимів лазерного маркування відбувалось із використанням додаткової лазерної голівки обладнання для 3D-друку, що працює з довжиною хвилі лазера – 0,406 мкм та полягало в нанесенні текстово-графічної інформації на пакування, виготовлене із фанери.

Додрукарські операції було по роботі з оринал-макетами було проведено у векторному графічному редакторі SAN2 (графічний планшет) та адаптовано до подальшої роботи у Corel Draw (рис. 6.5), так як особливістю підготовки макету до друку є його збереження із використанням ліній «зверху тонкого абрису».

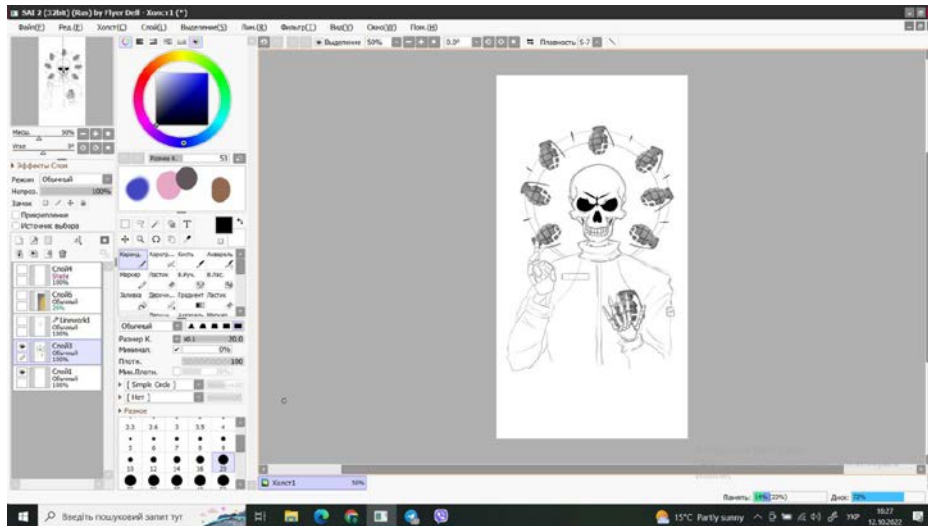


Рисунок 6.5 – Додрукарські операції по роботі з макетами

Єдиною вимогою при зміні потужності лазерної голівки та швидкості її руху була візуальна читабельність.

У зв'язку з цим, при зміні від мінімальної потужності – 0,15 Вт до максимальної – 0,35 Вт швидкість маркування варіювалась від 10 до 26 мм/с.

При цьому використовувався механізм не випаровування чи розплавлення матеріалу, а його руйнування.

Підвищення потужності понад 0,3 Вт призводить до руйнування верхнього шару виробу з фанери та до погіршення друку тонких ліній (зливаються в сусідню) та загальної читабельності маркування (рис. 6.6)



Рисунок 6.6 – Гравіювання із підвищення потужності понад 0,3 Вт

Контрастність та чіткість маркування залежить від виду поверхні виробів,

виготовлених із фанери. Можливі кольорові відтінки штрихових кодів визначаються кольором внутрішньої будови фанери та його поверхневого шару.

Максимальну контрастність та оптичну щільність можна отримати маркуванням на світлому фоні фанерних виробів (рис.6.7).



Рисунок 6.7 – Гравіювання на світлому фоні фанерних виробів

Контрастність маркування буде менша, якщо фанера має темний колір, тобто при використанні низьких сортів фанери (рис 6.8).



Рисунок 6.8 – Гравіювання на темному фоні фанерних виробів

Яскраве маркування буде помітніше на фоні світлих видів фанери, і менше – на темному фоні.

Висока чіткість та читабельність забезпечується зниженням потужності до 0,25 Вт та збільшенням швидкості маркування до 18 мм/с для даного типу виробів (рис. 6.9).



Рисунок 6.9 – Гравіювання із оптимальними налаштуваннями

Висновок до шостого розділу

У розділі подано загальну характеристику технологіям лазерного гравіювання та сфер їх застосування на теперішній час, вказано на їх переваги та перелічено види.

Описано лазерне гравіювання як спосіб сучасного маркування в поліграфії та визначено вплив зміни режимів на якість отриманих оптичних показників при використанні виробів із фанери.

7 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ «ЯКІСТЬ 3D-СУВЕНІРІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ АДИТИВНИМ СПОСОБОМ ДРУКУ»

7.1 Опис ідеї проекту

Розглянувши питання того, як впливають параметри при виготовленні сувенірної продукції на якість їх поверхонь, а конкретно на геометричні розміри поверхонь 3D-об'єктів, і відповідно їх точність було розроблено програмний продукт, з метою оцінки та оптимізації даних параметрів для покращення якості отриманої поліграфічної продукції.

У даному розділі представлені результати аналізу стартап-проєкту, для визначення можливості виходу програмного продукту на ринок. У таблиці 7.1 представлена інформаційна карта проєкту:

Таблиця 7.1. – Інформаційна карта проєкту

1. Назва проєкту	3D-printing Precision
2. Автори проєкту	Володько М.Ю.
3. Коротка анотація	У даному проєкті розглянуто створення та впровадження програмного продукту з підвищення якості геометричних розмірів сувенірів виготовлених за допомогою адитивних технологій, а саме на 3D принтері із застосуванням технології FMD
4. Термін реалізації проєкту	8 місяців
5. Необхідні ресурси	1. Інтелектуальні – знання автора 2. Матеріальні – комп'ютерне обладнання 3. Фінансові – витрати на обладнання, створення проєкту, рекламу.
6. Опис проблеми, яку вирішує проєкт	Проект вирішує проблему якості виготовлення сувенірних виробів через надання точності геометричних розмірів при виготовленні за допомогою адитивних технологій

Закінчення таблиці 7.1

7. Головні цілі та завдання проекту	Головна ціль в створенні програмного продукту. Завдання: 1. Розробка програмного забезпечення 2. Реалізація на ринку 3. Отримання прибутку
8. Очікувані результати	Реалізація проекту дасть можливість отримати програмне забезпечення, що дозволить підвищити якість сувенірної продукції, отриманої після 3D друку.

У таблиці 7.2 зображено зміст, ідея та базові ринки для пошуку цільової аудиторії та клієнтів:

Таблиця 7.2 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрями застосування	Вигоди для користувача
Створення підприємства по розробці програмного продукту для підвищення якості сувенірної продукції шляхом підвищення точності геометричних розмірів при виготовленні за допомогою адитивних технологій	Підвищення якості рекламно-сувенірних виробів, що виготовляють за допомогою адитивного виробництва	1. Підвищення точності геометричних розмірів поліграфічного виробу 2. Підвищення якості поліграфічного виробництва
	Удосконалення режимів роботи в межах технологічних процесів	1. Підвищення ефективності проектування 2. Прискорення та покращення проведення розрахунків. 3. Підвищення точності геометричних розмірів поліграфічного виробу та зменшення похибки отриманих неякісної (бракованої) продукції

Отже, пропонується створення програмного забезпечення для підвищення якості сувенірної продукції при виготовленні за допомогою адитивних технологій, на основі проведених дослідів та статистичних розрахунків залежностей, що дозволить підвищити точність відтворення геометричних розмірів сувенірної продукції.

У таблиці 7.3 наведений аналіз можливих техніко-економічних переваг даної ідеї при порівнянні пропозицій конкурентів:

- визначимо техніко-економічні характеристики даної ідеї;
- визначимо орієнтовне коло конкурентів (товарів-замінників), проведемо аналіз техніко-економічних показників проектів конкурентів;
- виконаємо порівняльний аналіз показників: для ідеї визначено показники, що мають а) кращі значення (S, сильні); б) аналогічні значення (N, нейтральні); в) гірші значення (W, слабкі)

Таблиця 7.3 – Аналіз кращих, аналогічних та гірших характеристик ідеї

№ п/ п	Техніко економічні характерис тики ідеї	Товари конкурентів			S	N	W
		Мій проект	Meshmixer	Розробка «КП»			
1.	Аналіз даних на коректність	+	-	-	Вбудовані програмні модулі ПЗ, що забезпечують додаткову перевірку даних за декількома незалежними алгоритмами		
2.	Надійність системи	висока	висока	висока		Системи захисту, збереження та передачі оброблених даних високі для всіх розгля- нутих компаній	

Закінчення таблиці 7.3

3.	Точність системи	висока	висока	висока		Системи та алгоритми точності обробки отриманих даних високі для всіх розглянутих компаній	
4.	Торгівельна марка	-	+	+			Показник невідомості при виборі для клієнта, що викликає недовіру, незахищеність від плагіату
5.	Універсальність	середня	висока	середня		Побудова ПЗ на основі регламентної галузевої документації, яка обов'язкова для сфери в цілому	
6.	Вартість	низька	висока	висока	Розширеніший функціонал ПЗ за нижчу плату у порівнянні із іншими розглянутими пропозиціями компаній		

Отже, після аналізу характеристик проекту з конкурентами визначає сильні, нейтральні та слабкі сторони, після цього можна сформулювати висновок щодо конкурентоспроможності даної ідеї. Сильними сторонами є аналіз даних на коректність та низька і доступна вартість. Нейтральними сторонами є точність та надійність системи. Недолік мого програмного продукту це відсутність торгової марки, що є показником невідомості для клієнтів та нема захищеності від плагіату.

7.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Для реалізації ідеї створення проекту виконується аудит технології.

У таблиці 7.4 визначено технологічну здійсненність ідеї, що аналізує такі складові:

- технологія, що використовується при реалізації проекту;
- доступність технологій;
- наявність технологій;

Таблиця 7.4 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології, що використовуються	Наявність технології	Доступність технології
1.	Аналіз даних на коректність	Мова програмування Java	Наявні	Доступні
2.	Імпорт параметрів	Мова програмування Java	Наявні	Доступні
2.	Розрахунок залежностей	Мова програмування Java	Потребують створення	Доступні
3.	Експорт результатів у вигляді G-коду	Мова програмування Java	Наявні	Доступні

Аналізуючи дані таблиці можна зробити висновок, що даний проект потребує створення частини програмного забезпечення, яка реалізує розрахунок залежностей, а інші пункти можна виконати за допомогою наявних і доступних технологій.

Це створення лінійних залежностей, які будуть розраховуватись за допомогою регресійного аналізу, але потрібно також створити перелік стандартних значень та набір можливих змінних.

Частина технологій, які використовуватися при реалізації продукту є доступними та потребують мінімальних доопрацювань, що значно спрощує розробку, а додаткові витрати складають не значні суми. Доступ до цих технологій знаходяться у відкритому доступі. Отже, технологічна здійсненність проекту є частковою.

7.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Аналізуємо наші ринкові можливості, щоб використати їх під час реалізації проєкту на ринок, а також ринкові загрози та перешкоди, які можуть виникнути. Це дозволяє скласти план розвитку та врахувати ринкові потреби клієнтів та оцінити пропозиції програм-конкурентів.

В таблиці 7.5 наведений аналіз попиту:

- наявність попиту,
- обсяг,
- динаміка розвитку ринку.

Таблиця 7.5 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап проєкту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	5
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од (1 рік /2 рік /3 рік)	50 000 / 250 000 / 500 000
3.	Динаміка ринку	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу	відсутні
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	IEEE, ISO
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	40%

Визначено, що динаміка ринку зростає та попит на даний продукт на високому рівні. При відсутньому обмеженні для входу, потенційно легко успішно вийти на ринок, незважаючи на наявність проєктів-конкурентів в даній галузі.

У таблиці 7.6 визначимо потенційну цільову аудиторію та групи клієнтів, їх характеристики, та визначимо орієнтовний перелік вимог для кожної групи товару.

Таблиця 5.6– Характеристика потенційних клієнтів стартап проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Програмний продукт для підвищення якості сувенірної продукції шляхом підвищення точності геометричних розмірів при виготовленні за допомогою адитивних технологій	Поліграфічні підприємства, що застосовують адитивні технології ТМ «місцева ювелірна» м.Біла Церква Easy 3D Print м.Біла Церква 3DDevice м.Київ Навчальні заклади I-IV рівня акредитації Науково-дослідні установи Деякі медичні установи, стоматологічні центри	Надійність, довговічність, ціна.	Зручність у використанні, невисокі технічні вимоги, правильність розрахунку.

Отже, потенційною групою клієнтів даного продукту є підприємства оперативної поліграфії, що здійснюють виробництво із застосуванням адитивних технологій, ювелірні підприємства для розробки макетів ювелірних виробів, навчальні заклади, що здійснюють навчання спеціалістів по 3D друку.

Загрози, які можуть з'явитись при застосуванні даної технології наведені в таблиці 7.7

Для попередження таких ситуацій необхідна підтримка висококваліфікованих сервісних програмістів, операторів обладнання та постійний моніторинг потреб ринку.

Таблиця 7.7– Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конфігурація обладнання	На підприємствах виготовлення сувенірної продукції буде відбуватись іншим методом друку	Реалізація продукту для різних методів та технологій друку
2.	Конфігурація параметрів	Не передбачені параметри для зміни. Для кожної конкретної моделі 3D-обладнання існують свої (індивідуальні) вбудовані виробником набори параметрів, зміна яких не передбачена, тобто це обтяжуватиме програмне забезпечення додатковим функціоналом, який може і не бути використаний	Збільшення кількості можливих параметрів в залежності від потреб підприємства.
3.	Конкуренти	Технологія 3D-друку активно розвивається	Моніторинг ринку
4.	Технічні питання	Відсутність покрокової інструкції	Постійна підтримка кваліфікованими інженерами.
5.	Спеціалісти	Відсутність кваліфікованого персоналу	Навчання без відриву від виробництва за рахунок компанії
6.	Фінансування	Так як, технологія 3D-друку активно розвивається, то ПЗ потребує постійного доопрацювання та оновлення, а разом із тим і постійних капіталовкладень	Залучення інвесторів

Закінчення таблиці 7.7

7.	Криза в країні, викликана широкомасштабним вторгненням на територію України	Знецінення гривні, несвоєчасні виплати від замовників, нестача грошей для виплат зарплат	Виконувати замовлення по передплаті, за потреби взяття кредиту на пільгових умовах для можливості продовження функціонування компанії.
8.	Світова криза	Призупинення діяльності великих компаній на поліграфічному ринку України	Орієнтація на приватний малий і середній бізнес України, пошук нових масштабних клієнтів

Фактори загроз показані в таблиці 7.7, їх необхідно контролювати, щоб зменшити вплив на якість отриманих послуг для клієнта. Для цих факторів описаний ряд рекомендацій, щоб здійснити їх усунення, описано в таблиці 7.8.

Таблиця 7.8 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Спосіб використання	Більша кількість точок зв'язку з користувачем	Створення аналога з більшими можливостями
2.	Універсальність	Використання продукту в різних методах розрахунку	Розробка компактного, портативного та універсального продукту
3.	Розробка нових програмних продуктів	Залучення нових працівників	Створення продуктів для різних методів друку

Показано потенційні фактори можливостей, які допомагають реалізації даного продукту на ринку, а також можливі реакції компанії (табл. 7.7).

У таблиці 7.9 проведений ступеневий аналіз конкуренції на ринку: визначимо основні особливості конкурентного середовища та його прояви.

Таблиця 7.9 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії)
1. Олігополія	Переважає домінація декількох конкуруючих підприємств	Виготовлення конкурентоспроможного товару
2. Національний	Конкуренція на міжнародному рівні	Зниження вартості, адаптація продукту для національного ринку
3. Товарно-видова	Конкуренція між продуктами з вирішенням схожих питань	Розширення можливих функцій
4. Внутрішньогалузева	Конкуренти виготовляють продукт, що вирішує одне питання	Розробка нових технологій
5. Цінова	Вартість це важливий фактор на який звертає увагу багато підприємств, особливо дрібних.	Зменшення вартості продукту або збільшення функцій при такій же вартості як і в конкурентів.
6. Марочна	Зареєстрований бренд, марка вказує на підприємство, яке відповідає за готовий продукт	Створення та реєстрація власної марки.

Аналізуючи бачимо, що особливості конкурентного середовища дають нам великі перспективи та можливості для конкурентної боротьби.

Проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в різних галузях виробництва (табл. 7.10).

Таблиця 7.10 – Аналіз конкуренції за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари замітники
	Meshmixer Розробка «КП»	«3D Way»	Підприємства і є постачальниками на ринок.	Клієнти надають оцінку програмного продукту, що орієнтований на просування	Товари з більш широким функціоналом.
Висновки:	Вже відомі підприємства, що займаються такими розробками, та мають більший вплив на користувачів поліграфічними послугами	Адитивна компанія світу починає займатись власними розробками і в даній сфері, необхідно прямувати до заданих стандартів щоб бути конкурентноспроможними.	Зменшує рівень додаткових витрат.	Потреби клієнта це ключовий фактор, так як вони створюють попит.	Збільшення конкуренції

Аналізуючи дані таблиці було визначено прямих та потенційних конкурентів, також було визначено, що головним фактором є клієнти.

Визначимо перелік факторів конкурентоспроможності (табл. 7.11).

Зазначена оцінка є орієнтовною, так як продукт ще не реалізовано.

Таблиця 7.11– Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1	Новизна	Нова технологія дозволяє отримати продукт, здатний стати конкурентоспроможним
2	Технічні вимоги	Програма не потребує високого рівня технічних вимог обладнання.
3	Собівартість	Низька собівартість продукції
4	Ціновий фактор	Встановлення вартості продукту для охоплення підприємств з різними серіями виробництва.
5	Гарантія та підтримка	Надання гарантії та технічну підтримку продукту.

В боротьбі з конкуренцією важливо розуміти свої сильні та слабкі сторони. Тому їх потрібно визначити ще на етапі проєктування стартап-проєкту.

Фактори конкурентоспроможності, їх значимість в балах та рейтинг конкурентів порівняно з проєктованим проєктом наведено в таблиці. Проведемо порівняльний аналіз сильних і слабих сторін нашого продукту (табл. 7.12).

Таблиця 7.12 – Порівняльний аналіз сильних та слабих сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Новизна	16				X			
2	Технічні вимоги	14					X		
3	Собівартість	17							X
4	Ціновий фактор	12				X			
5	Гарантія та підтримка	12					X		

Аналіз сильних та слабких сторін показав, що новизна, ціновий фактор дають проекту бути конкурентноспроможним.

Одним з способів аналізу сильних та слабких сторін є SWOT аналіз.

SWOT - аналіз допомагає в розумінні, яка загрози можуть стати перешкодою при виході на великий ринок

В таблицях 7.13-7.15 наведено дані та проведено їх розрахунки для визначення значимості сильних та слабких сторін.

Таблиця 7.13 – SWOT – аналіз стартап проекту

Сильні сторони (S): S1- корисність; S2 - розширеніший функціонал із наданням технічної підтримки; S3- зручність у використанні;	Слабкі сторони (W): W1 – конкуренція W2- продукт не зарекомендував себе на ринку (відсутність іміджу так, як підприємство новостворене) W3- відсутність патентів
Можливості (O): O1- отримання держзамовлень; O2- розширення на іноземному ринку; O3 - розширення програмного продукту для охоплення більшого ринку;	Загрози (T): T1- технічні збої; T2- проблеми з постачальниками; T3- застосування інших методів друку та більш модернізованого програмного продукту;

Таблиця 7.14 – Матриця SWOT – аналізу

	Ai	Можливості			Загрози		
		O1	O2	O3	T1	T2	T3
Імовірність появи (Pj)		0,65	1	0,9	0,85	0,7	0,65
Коефіцієнт впливу (Kj)		0,8	0,9	0,65	0,6	0,55	0,7
Сильні сторони (S)							
S1	5	5	5	4	5	2	4
S2	4	3	3	4	5	2	5
S3	3	1	1	1	4	3	3
Всього							
Слабкі сторони (W)							
W1	-3	4	4	4	2	1	2
W2	-4	1	1	4	1	1	1
W3	-2	1	1	2	1	1	1

Перетворення вихідної матриці здійснюється на підставі формули 7.1.

$$A_{ij} = A_i * K_j * P_j * a_{ij} \quad (7.1)$$

Таблиця 7.15 – Перетворена матриця SWOT-аналізу

	Ai	Можливості			Всього	Загрози			Всього
		O1	O2	O3		T1	T2	T3	
Імовірність появи (Pj)		0,65	1	0,9		8,5	0,7	0,65	
Коефіцієнт впливу (Kj)		0,8	0,9	0,65		0,6	0,55	0,7	
Сильні сторони (S)									
S1	5	13,00	22,50	11,70	47,20	12,75	3,85	9,10	25,70
S2	3	6,24	10,80	9,36	26,40	10,20	3,08	9,10	22,38
S3	4	1,56	2,70	1,76	6,02	6,12	3,47	4,10	13,68
Всього		20,80	36,00	22,82		29,07	10,40	22,30	
Слабкі сторони (W)									
W1	-3	-6,24	-10,80	-7,02	-24,06	-3,06	-1,16	-2,73	-6,95
W2	-4	-2,08	-3,60	-9,36	-15,04	-2,04	-1,54	-1,82	-5,40
W3	-2	-1,04	-1,80	-2,34	-5,18	-1,02	-0,77	-0,91	-2,70
Всього		-9,36	-16,20	-18,72		-6,12	-3,47	-5,46	

Проведено SWOT – аналіз продукту (табл. 7.15). Вказано сильні та слабкі сторони продукту, можливості та загрози зі сторони конкурентів.

Відповідно до таблиці 5.15, найбільшого значення набуває можливість, що стосується розширення функціональності програмного продукту для охоплення більшого ринку

Сильні сторони найбільше захищають від технічних збоїв при опрацюванні даних якості виготовлених 3D-виробів, оскільки підприємство планує вихід на іноземний ринок, то це є суттєвою перевагою.

Найбільш сильна сторона, що допомагає підприємству скористатися можливостями та захиститися від конкуренції та втрати корисності програмного продукту.

Можливість, яка є найбільш вразливою із-за слабких сторін – зручність використання програмного продукту, адже через високу конкуренцію та відсутність постійних клієнтів якісний програмний продукт буде нікому продавати.

Оскільки слабкі сторони стосуються фінансової складової діяльності підприємства, то за підрахунками проблеми з постачальниками нестимуть найбільший вплив.

Слабкі сторони, що найбільше перешкоджають підприємству скористатися можливостями так як воно не зарекомендувало себе на ринку через те, що нове на ринку надання програмних продуктів для визначення якості 3D-виробів, виготовлених адитивними технологіями.

Конкуренція є найбільш слабка сторона, що спричиняє виникнення загроз.

На основі SWOT – аналізу розробимо альтернативи поведінки ринкового впровадження продукту та його виведення на ринок, строки реалізації продукту, ймовірності отримання ресурсів (табл. 7.16).

Таблиця 5.16 – Альтернативи ринкового впровадження стартап проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Компенсація слабких сторін стартапу: - отримання патенту; - моніторинг нових пропозицій від конкурентів; - проведення рекламної компанії (у мережі інтернет), спрямованої на упізнаваність підприємства.	50%	1 рік
2	Стратегія виходу з ринку: - орієнтація на замовлення, що фінансуються державою	20%	
3	Нейтралізація загроз: - навчання співробітників з метою отримання кваліфікаційних спеціалістів на підприємстві; - робота із захищеними програмними платформами; - розробка універсального програмного продукту, що охоплюватиме і інші види друку.	60%	1,5 року
4	Стратегія розвитку можливостей: - участь у гранд-програмах, як в межах України так і за кордоном; - проведення рекламної компанії з метою пошуку нових замовників ПЗ	80%	1 рік

На основі аналізу визначаємо, що обравши стратегію розвитку можливостей, в короткий строк реалізації, можна краще впровадити стартап проект на ринок.

7.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Першим кроком розроблення ринкової стратегії є визначення стратегії охоплення ринку, тобто опис потенційних споживачів (табл. 7.17).

Таблиця 7.17 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Приватні власники	Висока	Високий попит	Висока	Середня
2	Державні підприємства	Низька	Високий попит	Низька	Складна
Які групи обрано приватних власників.					

На основі аналізу цільових груп споживачів були обрані групи приватних підприємств, для яких буде запропонований наш продукт з метою покращення якості поліграфічних 3D-виробів, отриманих за допомогою адитивних технологій.

Визначимо та сформуємо розвиток базової стратегії для роботи в обраному сегменті ринку (табл.7.18).

Таблиця 7.18 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Стратегія розвитку можливостей	Орієнтуватись на захоплення більше різних методів виробництва адитивними технологіями, розширення функціоналу програми.	Низький рівень оплати за більший функціонал.	Стратегія розвитку.

За базову стратегію обрано стратегію розвитку, що передбачає розширення функціоналу програмного продукту.

Оберемо стратегію конкурентної поведінки (табл. 7.19).

Таблиця 7.19 – Стратегія конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Компанія буде забирати існуючих клієнтів	Так - схожість розрахунку	Стратегія наслідування лідеру

Для входу на ринок обрано стратегію наслідування лідеру, це дозволить зменшити боротьбу з конкурентами, зосередитися на підвищенні кількості клієнтів та прибутку.

У таблиці 7.20 показано як, в залежності від обраних стратегій розвитку та стратегій конкурентної поведінки, на основі обраного сегменту, розробимо стратегію позиціонування, яка буде показувати ринкову позицію, згідно якої клієнти зможуть ідентифікувати проект.

Таблиця 7.20 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Висока точність	Стратегія розвитку	Низька вартість та високий функціонал	Висока якість, технічне обслуговування, моніторинг попиту.

Результатом є вибір такої базової стратегії як стратегія розвитку, за стратегію конкурентної поведінки обрано стратегію наслідування лідеру. Приватні підприємства обрано як цільову аудиторію, щоб отримати нових клієнтів.

7.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком при розробці маркетингової програми є розробка маркетингової концепції товару, що отримає споживач.

Проведемо аналіз конкурентоспроможності товару в таблиці 7.21.

Таблиця 5.21 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1.	Якість	Висока якість	Розробка проекту здійснювалась на основі результатів досліджень.
2.	Доступність	Доступність продукції	Невисока вартість
3.	Точність	Висока точність	За рахунок постійного аналізу, продукт має високу точність.

Продукт про покращенню точності поверхонь деталей виготовлених на 3D принтері задовільняє всім вимогам клієнтів.

Щоб уточнити ідею продукту, фізичні складові, основні його характеристики та особливості процесу його надання розробимо трирівневу маркетингову модель товару (табл. 7.22).

Таблиця 7.22 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Програмний продукт, який аналізує залежність вхідних технологічних режимів друку та покращує якість 3D-виробів, виготовлених адитивними технологіями		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/ характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	Безпека	М	Тх
	Точність	Нм	Тл
	Економічність	Нм	Вр
	Надійність	М	Тл
	Довговічність	Нм	Тх
	Технологічність	М	Тх
	Якість: Відповідає існуючим нормативам		
	Пакування: електронний носій		
Марка: назва організації			
III. Товар із підкріпленням	Розповсюдження реклами		
	Акції на різні пакети програми.		
Захист від копіювання: інтелектуальна власність, патенти.			

Визначимо рівень витрат, що є необхідними для створення стартапу (табл. 7.23).

Таблиця 7.23 – Витрати на створення стартапу

№ п/п	Стаття витрат	Обсяг витрат, тис.грн.
1.	Придбання технічного обладнання	300
2.	Оренда приміщення	20
3.	Проектування програмного продукту	80
4.	Тестування продукту	15
5.	Виплати персоналу	180
6.	Реклама	40

Наступним кроком є визначення цінової політики, при формуванні якої необхідно керуватися аналізом цін конкурентів та змоги потенційних споживачів до придбання продукту (табл 7.24).

Таблиця 7.24 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	30 000 грн	45 000 грн	Високий	25 000 - 32 000 грн

Після проведення аналізу цін конкурентів встановлено межі ціни на власний продукт.

Сформуємо власну систему збуту, оберемо, як виробник продає товар клієнту, канали збуту, канали контакту з клієнтом (табл. 7.25).

Таблиця 7.25 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Передбачена модифікація продукту: зміна пакетів програми, розширення функціоналу, збільшення методів друку.	Встановлення продукту, первинне навчання, діагностика та підтримка.	Нульовий рівень	Продаж безпосередньо клієнту від виробника, а також продаж в сертифіковані підприємства які займаються власним пошуком клієнтів.

Обрано продаж товару клієнту напряму від виробника та збут в підприємства посередники. Обрано канал нульового рівня, тому що компанія прагне перш за все вийти на ринок з власною базою клієнтів та надавати постійну підтримку (табл 7.26).

Таблиця 7.26 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цілових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цілові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Ознайомлення з товаром на сайті, допомога технічного консультанта, можливість отримати демо версію програми, гарантія	Сайт компанії, соц. мережі, телефон, виставки.	Точність наданої інформації	Знаходженн я цілових клієнтів за допомогою зацікавленості.	Якість, точність, переваги.

Висновки до сьомого розділу

Аналіз переваг програмного продукту з покращення якості виготовлених 3D-сувенірів за допомогою адитивних технологій в порівнянні з вже існуючими системами автоматизації конкурентів.

Визначено ряд потенційних переваг продукту, проведено аналіз сильних та слабких сторін продукту, визначено підприємства-конкурентів та продуктів замінників, що вже існують на ринку.

Виявлено, що основним у даного продукту є високий потенціал реалізації, за рахунок низької кількості програм-конкурентів. Також даний продукт оснований на реальних дослідженнях, та знаходиться постійному аналізу, що дає високий рівень точності розрахунків – а це основна вимога покупця.

Для входу на ринок обрано стратегію наслідування лідеру, це дозволить зменшити боротьбу з конкурентами, зосередитися на підвищенні кількості клієнтів та прибутку.

Отже, подальша реалізація продукту є доцільною за рахунок сильних сторін продукту і наявного попиту на ринку.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації розглянуті питання, що пов'язані із якістю отримання сувенірної продукції із застосуванням адитивних технологій друку.

Проведено детальний аналіз літературних джерел та здійснено патентний пошук відповідно до застосування адитивних технологій.

Здійснено опис сутності методів і технологій АВ та лазерного гравіювання, а також області їх використання.

Проаналізовано переваги та недоліки вищезазначених методів і витратних матеріалів.

Проаналізовано ПЗ щодо моделювання 3D-виробів та технологічних параметрів, а також форматів збереження та подальшого слайдингу, зробленого його вибір.

Розглянуто технічні характеристики 3D-обладнання для роботи із адитивними технологіями.

Розглянуто методику виготовлення 3D-виробів із застосуванням адитивних технологій, описано технологічні недоліки друку та похибки.

Обрано метод друку (FDM) та витратний матеріал (PLA пластик) для подальшого дослідження.

Описано методику проведення експериментальних досліджень та обробки результатів.

Вказано параметри якості 3D-виробів, виготовлених із застосуванням адитивних технологій та описано методику визначення контролю цих параметрів.

Визначено основні технологічні показники, які впливають на точність геометричних параметрів сувенірних виробів із застосуванням АТ.

Проведено експериментальні дослідження показників точності зразків процесу друку виробів виготовлених за технологією FDM-друку

Встановлено математичні залежності показників якості поверхонь 3D-виробів виготовлених із застосуванням адитивних технологій від технологічних параметрів процесу швидкого прототипування.

Проаналізовано отримані залежностей та визначено вплив параметрів друку на контрольовані показники.

Виконано оптимізацію режимів друку 3D-виробів та визначено найбільш оптимальні.

Проаналізовано вплив режимів лазерного гравіювання на якість отриманого оптичного зображення

У результаті проведених досліджень науково-технічна задача щодо підвищення показників якості 3D-виробів, виготовлених із застосуванням адитивних технологій вирішено.

Розроблено стартап-проект впровадження та реалізації продукту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 3D Printed Bionic Ears. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl4007744>
2. 3D Printed Bionic Ears. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl4007744>
3. 3D Printer Market Sales Will Exceed \$14.6 billion in 2019 [electronic resource]. — Access: <http://blogs.gartner.com/pete-basilier/2015/09/29/3dprintermarket-sales-will-exceed-14-6-billion-in2019/>.
4. 3D PRINTING & ADDITIVE MANUFACTURING INTELLIGENCE: TCT Magazine . URL: www.tctmagazine.com/additive-manufacturing/university-of-sheffield-trials-3d-printed-unmanned-aircraft/)
5. 3D printing community: MakerBot's Thingiverse. URL: <https://www.thingiverse.com/>
6. 3d принтеры в медицине, их настоящее и будущее. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://medicena.ru/blogpost/3d-printeryi-v-meditsine-ih-nastoyashhee-i-budushhee/>
7. 3Dtoday – портал 3D-печати и сопутствующих технологий. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/managed-the-smallest-drone-in-the-world-are-manufactured-using-3d-printing/>
8. Green Car Congress Magazine: Energy, technologies, issues and policies for sustainable mobility. URL: <http://www.greencarcongress.com/2012/08/sulsa-20120827.html>.
9. Relativity Space, Inc.: the world's first autonomous rocket factory and launch services leader for satellite constellations. URL: <https://www.relativityspace.com/stargate/>
10. SLA (лазерная стереолитография) — технология 3D-печати // [Електронний ресурс] – режим доступу: https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/sla/
11. SLM (Selective Laser Melting) — технология 3D-печати // [Електронний ресурс] – режим доступу: https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/slm-tech/
12. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента

при поиске оптимальных условий. – М. : Наука, 1976. – 278 с. 32.

13. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3Ддруку (І частина) / Г.О. Андрощук // Наука, технології, інновації. - 2017. - № 1. - С. 68-77.

14. Андрощук Г.О. 3D-друк в епоху інноваційних технологій: проблеми регулювання / Г.О. Андрощук, Я.В. Копил // Інтелектуальна власність в Україні. — 2016. — № 5. — С. 17–26.

15. Антонюк В.С., Чонка Е. Я., // Точність поверхонь деталей виготовлених на 3d-принтері// XV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні»

16. Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О. Технологія лазерного кольорового маркування сталей. Вісник ХНАДУ. 2020. Вип. 88. С. 137-142

17. Валетов В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы) [Текст] : учебное пособие. – СПб. : Университет ИТМО, 2015. – 63с.

18. Валетов, В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). Навчальний посібник. [Електронний ресурс] : навчал. посібник — Електрон. дан. — СПб. : НИУ ИТМО, 2015. — 63 с.— Режим доступа :<http://e.lanbook.com /book/91553>

19. Вехов А.С. Применение аддитивных технологий в современном производстве / А.С. Вехов, С.А. Титаренко // Решетневские чтения. - 2018. - Т.1, N 22. - С.90-92.

20. Використання адитивних технологій на сучасних підприємствах. Електронний ресурс]. Режим доступу: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/9440/mod_resource/content/2/Лабораторна%20по бота%20№1.pdf

21. Габ'ян, Л. (2013). Розрахунок напружень в матеріалах під дією лазерних імпульсів. Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання: матеріали VI всеукр. студ. науковотехн. конф., 25-26 квітня 2013 року. – Т.: ТНТУ. – Т. 1. – С. 241. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/9968>.

22. Гавенко С.Ф., Мельников О.В. Оцінка якості поліграфічної продукції. Львів: Афіша, 2000. 120 с.

23. Гибсон Я. Технологии аддитивного производства / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер; пер. с англ., под ред. И.В. Шишковского. - Москва: Техносфера, 2016. - 646

с.: ил. - (Мир станкостроения; XVIII, 1).

24. Грабченко А. І. Сучасні технології матеріалізації комп'ютерних моделей : навч. посібник / А. І. Грабченко, В. Л. Доброскок. – Харків : НТУ "ХПІ", 2009. – 86 с

25. Гречко А. М. Технологии быстрого прототипирования – от детской игрушки до мирового господства // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2013. – №65(1038). – С. 14-36.

26. Гречко О. М. Сучасні адитивні технології та 3D-друк. Огляд останніх досягнень в різних сферах людського життя // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2019. – №1. – С. 63-75. doi: 10.20998/2079-3944.2022.1.12.

27. Гринчишин, Т.М., & Кіт, Г.В. (2014). Застосування оптичних лазерних систем та перспективи їх подальшого розвитку. Вісник НУ «Львівська політехніка»: Інформаційні системи і мережі, (805), 96-105. <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/26640>.

28. Е. Я. Чонка, О. Г. Новаковський, В. В. Серов // Дослідження якості поверхні при виготовленні моделей на 3D-принтері / Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції, 6–9 лист. 2019 р. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. – С. 201-202.

29. Журнал Control Engineering URL: <https://controlengrussia.com> /innovatsii/robototekhnika/robotizirovannoe-additivnoe-proizvodstvo/

30. Запровадження у навчальний матеріал шкільного курсу фізики поняття адитивних технологій. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://phm.cuspu.edu.ua/ojs/index.php/NZ-PMFMTO/article/viewFile/1200/1179>

31. Зачем нужны 3D принтеры. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://pechat-3d.ru/3d-printer/primenenie/3d-printer-primenenie.html>

32. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина; М-во образования и науки Рос. Федерации, С.- Петерб. гос. политехн. ун-т. - Санкт-Петербург: Политехнический университет, 2013. - 222 с. - Библиогр.: с.184-198.

33. Интегрированные генеративные технологии [Текст] : учеб. пособие [для студ. высш. учеб. заведений] / А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок [и др.] ; под ред. А. И. Грабченко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с.

34. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления [Текст] : 2-е изд., перераб. и доп. / Л. Л. Товажнянский, А. И. Грабченко, С. И Чернышов [и др.] ; под. ред. Л. Л. Товажнянского, А. И. Грабченко. – Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2005. – 224 с.

35. Интернет-портал и аналитическое агентство: Аддитивное производство (AdditiveManufacturing). [URL:http://www.tadviser.ru/index.php/](http://www.tadviser.ru/index.php/)

36. Кинематика 3D принтера. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dprinter.ua/kinematika-3d-printerov-vidy-i-osobennosti-delaem-svoj-vybor/>

37. Киппхан Гельмут. Энциклопедия по печатным средствам информации. Технологии и способы производства. Часть 1 М.: МГУП, 2003. ISBN: 5-8122-0310-5. – 1280 с.

38. Котляров, В.П., & Киященко, О.М. (2017). Особливості використання лазерної технології в умовах сучасного стану промисловості України. Наукові вісті НТУУ «КПІ»: міжнародний науково-технічний журнал, 1(111). 94-105. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/24092>.

39. [Мережа Espace Патентний пошук](http://www.worldwide.espacenet.com/) // [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://worldwide.espacenet.com/>

40. Метод экспертной оценки уровня и показателей качества продукции [URL:http://www.1mashstroi.ru/metodi_obespecheni_kachestva/metod_ekspert_ozenki/](http://www.1mashstroi.ru/metodi_obespecheni_kachestva/metod_ekspert_ozenki/) (дата звернення 13.11.2022).

41. Методичні вказівки до курсового проекту з дисципліни «Інженерно-технічне забезпечення видавничо-поліграфічного виробництва. Модуль 2 – Управління проектами» для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» і «спеціаліст» для спеціальностей напрямку «Видавничо-поліграфічна справа» [Електронний ресурс] / НТУУ «КПІ» ; уклад. О. М.Величко, А. В. Шангін. – Електронні текстові дані (1 файл: 267 Кбайт). –Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 32 с. – Назва з екрана. — Ресурс доступу:<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/2603>.

42. Новаковский А.Г., Антонюк В.С. Анализ современных технологических подходов к аддитивному производству // Республиканский межотраслевой производственно практический журнал. - Минск – № 3(72) – 2016.– С. 11 – 12.

43. Основи 3D-друку. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://cpto.dp.ua/public_html/posibnyky/osnovy_3d.pdf

44. Пухальська, Г.В., & Порвін, І.Е. (2020). Лазерне маркування. Тези доповідей науковопрактичної конференції, Запоріжжя, 13–17 квітня 2020 р. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – С. 21-22.

45. Разница в кинематике. Кинематика 3D принтера. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://tgraph.io/Voprosy-ot-podpischikov-08-09-2>

46. Розвиток 3D-друку. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://phm.cuspu.edu.ua/nauka/naukovo-populiarni-publikatsii/878-rozvytok_tekhnolohii-3-d-druku.html

47. Сапрыкина Н.А., Сапрыкин А.А. Понятие режимов лазерного спекания порошковых материалов. Вестник КузГТУ, 2010, No 3, с. 49–52. 33. Longhitano G.A., Larosa M.A., Munhoza A.L.J., Carvalho Zavagliaa C.A., Ierardia M.C.F. Surface finishes for Ti-6Al-4V alloy produced by direct metal laser sintering. Materials Research, 2015, vol. 18(4), pp. 838–842.

48. Спеціальні види друку [Електронний ресурс] : методичні вказівки до лабораторних робіт для студ. напряму підготовки 186 «Видавництво та поліграфія» спеціалізація «Поліграфічні медіатехнології» / НТУУ «КПІ» ; уклад. К. О. Чепурна. – Електронні текстові дані (1 файл: 742,62 Кбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 50 с. – Назва з екрана.

49. Сувенірна продукція [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://doka.rv.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=40 –

50. Технічні характеристики CreatBot DX// [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://3ddevice.com.ua/product/3d-printer-creatbot-dx-plus/>

51. Технічні характеристики da Vinci 1.0 Pro 3-1// [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.xyzprinting.com/ru-RU/product/da-vinci-1-0-pro-3-in-1>

52. Технічні характеристики Galaxy 500// [Електронний ресурс]. Режим

доступу: <https://effectenergy.com.ua/ua/produktsiia/3d-pryntery/galaxy.html>

53. Технічні характеристики wanhao duplicator i3 plus .// [Електронний ресурс].
Режим доступу :<https://pro3d.com.ua/p1048938090-printer-wanhao-duplicator.html>

54. Технология 3D-печати FDM (Fused Deposition Modeling) // [Електронний ресурс] – режим доступу: https://3d.globatek.ru/3d_printing_tech_nologies/fdm/

55. Технология DMT (Laser-aided Direct Metal Tooling)// [Електронний ресурс] – режим доступу: https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/dmt/

56. Технология спекания порошков SLS (Selective Laser Sintering)// [Електронний ресурс] – режим доступу: https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/sls-tech/

57. Технологія друку [Електронний ресурс]. Режим доступу : URL :<http://ukrefs.com.ua/page,2,180744-Tehnologiya-pechat.html> – Назва з екрану.

58. Управление качеством: методы, инструменты, советы по построению системы // Генеральный директор. URL: <https://www.gd.ru/articles/4121-upravlenie-kachestvom?from> (дата звернення 28.11.2022)

59. Учебный центр ведущих мировых производителей 3D-принтеров. URL: <https://blog.iqb.ru/additive-technologies-in-production/>

60. Филин В. Н. Путеводитель в мире специальных видов печати / В. Н.Филин. М. : УНИСЕРВ, 2003. 328 с.Персональні комп'ютери [Електронний ресурс]. Режим доступу:<https://www.foxtrot.com.ua/ru/compare/6> – Назва з екрану.

61. Цифровая светодиодная проекция (dlp))// [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://3ddevice.com.ua/dlp-3d-pechat/>

62. Цифровые микроскопы для полиграфии. URL: <http://www.compuart.ru/article.aspx?id=16281&iid=766> (дата звернення 12.11.2022).