

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний  
(повне найменування факультету)

Технологія машинобудування  
(повне найменування кафедри )

**Пояснювальна записка**

до дипломного проекту (роботи)

другий (магістерський)  
(ступінь вищої освіти)

на тему «Забезпечення якості виготовлення деталей з нейлону  
методом FDM друку»

Виконав: студент(ка) II курсу, групи M-112м

Спеціальності 131 Прикладна механіка  
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Технології машинобудування

МЕЛЬНИКОВА М. О.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ТУМАРЧЕНКО Л. О.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент МАТЮХІН А. Ю.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**

Факультет Машинобудівний  
 Кафедра «Технологія машинобудування»  
 Ступінь вищої освіти другий (магістерський)  
 Спеціальність 131 «Прикладна механіка»  
(код і найменування)  
 Освітня програма (спеціалізація) Технології машинобудування  
(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри С.І. ДЯДЯ

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)**

МЕЛЬНИКОВА Марія Олексіївна

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) « Забезпечення якості виготовлення деталей з нейлону методом FDM друку »

керівник проєкту (роботи) ст., викладач ТУМАРЧЕНКО Лариса Олександрівна  
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові.)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» 11 2023 року №436

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 13.12.2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) дослідити особливості забезпечення якості деталей з нейлону отриманих методом FDM

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Загальні положення. 2. Технічне та методичне забезпечення.

3. Результати досліджень. 4. Охорона праці. 5. Економічний розділ

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Презентація. Кількість \_\_\_\_\_ слайдів — 18

## 6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

| Розділ        | ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                           |
|---------------|-------------------------------------------|----------------|---------------------------|
|               |                                           | завдання видав | прийняв виконане завдання |
| 1-3           | ст., викладач. ТУМАРЧЕНКО Л. О.           |                |                           |
| 4             | к.т.н., доц. ШМИРКО В.І.                  |                |                           |
| 5             | к.т.н., доц. ПУХАЛЬСЬКА Г.В.              |                |                           |
| нормоконтроль | к.т.н., доц. ДЯДЯ С.І.                    |                |                           |
|               |                                           |                |                           |

7. Дата видачі завдання 04 вересня 2023

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проєкту (роботи) | Строк виконання етапів проєкту (роботи) | Примітка |
|-------|------------------------------------------|-----------------------------------------|----------|
| 1     | Аналіз літератури                        | 17.09.2023                              |          |
| 2     | Підготовка зразків до друку              | 08.10.2023                              |          |
| 3     | Друк зразків                             | 16.10.2023                              |          |
| 4     | Вимірювання розмірної точності           | 23.10.2023                              |          |
| 5     | Вимірювання шорсткості                   | 29.10.2023                              |          |
| 6     | Аналіз отриманих даних                   | 06.11.2023                              |          |
| 7     | Охорона праці                            | 09.11.2023                              |          |
| 8     | Економічний розрахунок                   | 13.11.2023                              |          |
| 9     | Оформлення пояснювальної записки         | 19.11.2023                              |          |
| 10    | Нормоконтроль                            | 01.12.2023                              |          |
| 11    | Рецензія                                 | 04.12.2023                              |          |
| 12    | Захист дипломного проєкту                | 13.12.2023                              |          |

Студент(ка)

\_\_\_\_\_ Марія МЕЛЬНИКОВА  
( підпис ) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

\_\_\_\_\_ Лариса ТУМАРЧЕНКО  
( підпис ) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

ПЗ: 93 с., 7 табл., 72 рис., 1 дод., 81 джерел.

### 3D ПРИНТЕР, FDM, ЕКСТРУДЕР, АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, РЕЖИМИ ДРУКУ, ШОРСТКІСТЬ, ТОЧНІСТЬ

Об'єкт дослідження – технологія адитивного виробництва Fused Deposition Modeling (FDM).

Мета дослідження – дослідження впливу режимних параметрів процесу FDM на шорсткість та геометричну точність і визначення раціонального поєднання режимних параметрів при яких досягається мінімальна шорсткість та вища якість поверхні.

Метод дослідження – експериментальний, науково-дослідний.

В магістерській роботі виконано оцінку впливу режимів FDM на шорсткість та розмірну точність зразків, обрано обладнання, були проаналізовані різні види 3D друку та розглянуті матеріали що використовуються для 3D друку, проаналізовано методи досягнення точності при друці, запропоновані рекомендації що до вибору оптимальних режимів друку деталей з нейлону, передбачені заходи щодо безпечної роботи персоналу, та розраховано бюджет наукового дослідження.

## ЗМІСТ

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Перелік умовних позначень, символів, одиниць вимірювання, скорочень.....                            | 7  |
| Вступ .....                                                                                         | 9  |
| 1 Загальні положення .....                                                                          | 10 |
| 1.1 Види 3D друку .....                                                                             | 10 |
| 1.1.1 Binder jetting .....                                                                          | 11 |
| 1.1.2 Directed Energy Deposition .....                                                              | 12 |
| 1.1.3 Materials extrusion .....                                                                     | 13 |
| 1.1.4 Materials jetting .....                                                                       | 15 |
| 1.1.5 Powder bed fusion .....                                                                       | 16 |
| 1.1.6 Sheet lamination .....                                                                        | 17 |
| 1.1.7 Vat Photopolymerization .....                                                                 | 19 |
| 1.2. Матеріали, що використовуються для технології 3D-друку в<br>машинобудівній промисловості ..... | 20 |
| 1.2.1 Метали .....                                                                                  | 23 |
| 1.2.2 Полімери .....                                                                                | 24 |
| 1.2.3 Кераміка .....                                                                                | 25 |
| 1.2.4 Композити .....                                                                               | 27 |
| 1.2.5 Розумні матеріали .....                                                                       | 28 |
| 1.2.6 Спеціальні матеріали .....                                                                    | 29 |
| 1.3. Основні методи .....                                                                           | 32 |
| 1.3.1 Моделювання методом наплавлення .....                                                         | 33 |
| 1.3.2 Селективне спікання .....                                                                     | 36 |
| 1.3.3 Струменевий друк і контурне виготовлення .....                                                | 39 |
| 1.3.4 Стереолітографія .....                                                                        | 40 |
| 1.3.5 Пряме енергетичне осадження .....                                                             | 41 |

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.3.6 Виготовлення ламінованих виробів .....                                                                               | 42 |
| 2 Технічне та методичне забезпечення .....                                                                                 | 44 |
| 2.1 Характеристика принтеру .....                                                                                          | 44 |
| 2.2 Досліджувальний матеріал .....                                                                                         | 45 |
| 2.3 Допоміжний матеріал .....                                                                                              | 46 |
| 2.4 Технологія отримання та геометричні параметри зразків .....                                                            | 47 |
| 2.5 Генерування коду .....                                                                                                 | 47 |
| 2.6 Пристрій для просушування .....                                                                                        | 48 |
| 2.7 Пристрій для вимірювання шорсткості .....                                                                              | 49 |
| 2.8 Інструмент для розмірної точності .....                                                                                | 49 |
| 2.9 Зразки .....                                                                                                           | 50 |
| 3 Результати досліджень .....                                                                                              | 51 |
| 3.1 Параметри експериментального дослідження .....                                                                         | 51 |
| 3.2 Вплив параметрів друку на шорсткість поверхні .....                                                                    | 52 |
| 3.3 Вплив параметрів друку на розмірну точність .....                                                                      | 57 |
| 3.3.1 Вплив параметрів друку на точність довжини зразка .....                                                              | 57 |
| 3.3.2 Вплив параметрів друку на точність ширини зразка .....                                                               | 63 |
| 3.3.3 Вплив параметрів друку на точність висоти зразка .....                                                               | 67 |
| 4 Охорона праці .....                                                                                                      | 71 |
| 4.1 Безпека дослідницьких робіт .....                                                                                      | 71 |
| 5 Економічний розділ .....                                                                                                 | 76 |
| 5.1 Бюджет наукового дослідження .....                                                                                     | 76 |
| Висновки .....                                                                                                             | 81 |
| Перелік джерел посилання .....                                                                                             | 83 |
| Додаток А Дані досліджень впливу режимних параметрів процесу FDM на параметри якості та геометричну точність зразків ..... | 92 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ, СКОРОЧЕНЬ

- LENS – (laser engineered net shaping) формування сітки за допомогою лазера
- FDM – (Fused deposition modelling) моделювання методом наплавлення
- FFF – (Fused Filament Fabrication) виготовлення плавлених ниток
- EBM – (Electron beam melting) плавлення електронним променем
- УФ – ультрафіолет
- SHS – (selective heat sintering) селективне термічне спікання
- SLA – (stereolithography) стереолітографія
- SLS – (selective laser sintering) селективне лазерне спікання
- DLP – (digital light processing) цифрова обробка світла
- LOM – (Laminated object manufacturing) виробництво ламінованих об'єктів
- UAM – (ultrasound additive manufacturing) ультразвукове адитивне виробництво
- PP – (polypropylene) поліпропілен
- ABS – (acrylonitrile butadiene styrene) акрилонітрилбутадієнстирол
- PLA – (polylactic acid) полімолочна кислота
- PMMA – (Polymethyl methacrylate) поліметилметакрилат
- PEEK – (Polyether ether ketone) поліетеретеркетон
- PE – (polyethylene) поліетилен
- SLCM – (Stereolithographic Ceramic Manufacturing) стереолітографічне виробництво кераміки
- ASTM – (American Society for Testing and Materials) Американське товариство випробувань і матеріалів
- SS - (Sum of Squares) сума квадратів
- Df - (Degrees of Freedom) ступені волі

MS - (Mean Square) середній квадрат

ANOVA – (Analysis of Variance) аналіз дисперсії

Residual – (Residual) залишкові значення

DED – (Directed Energy Deposition) спрямоване енергетичне осадження

PBF – (Powder bed fusion) процес селективного спікання

SL – (Sheet lamination) листове ламінування

VPP – (Vat Photopolymerization) фотополімеризація у ємності

## ВСТУП

У нас час адитивне виробництво набирає популярність. Ця технологія знайшла своє застосування у машинобудівній промисловості, авіації, дозволяючи виготовляти прототипи, запчастини або готові пристрої з гарними властивостями. Тому адитивне виробництво відіграє важливу роль у нашому житті.

Технологія FDM раніше використовувалась для створення моделей та прототипів, але зараз вона може використовуватись у таких галузях як машинобудування так як з'явився великий вибір матеріалів для друку. Наразі мало досліджень впливу комбінацій режимних параметрів друку та їх вплив на шорсткість поверхні і розмірну точність деталей отриманих методом FDM.

Нейлон широко використовується у машинобудівній промисловості, аерокосмічній та медицині, але виробництво деталей із нейлону методом FDM обмежено через недоліки, які виникають при друці. На даний час для того щоб забезпечити характеристики деталей отриманих методом FDM виходячи з їх службового призначення необхідно провести дослідження впливу режимних параметрів FDM на шорсткість і геометричну точність, які наразі є недостатньо дослідженими.

## 1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

### 1.1 Види 3D друку

Було розроблено безліч технологій 3D-друку (рис. 1.1), кожна з яких виконує різні функції. Відповідно до стандарту ASTM F2792 [1] технології 3D-друку поділяються на сім груп: струменеве скріплення, спрямоване осадження енергії, екструзія матеріалу, струменеве плавлення, ламінування листів і фотополімеризація. Загальновизнано, що немає остаточних даних щодо того, яка технологія функціонує краще, оскільки кожна з них має своє конкретне цільове застосування [2].

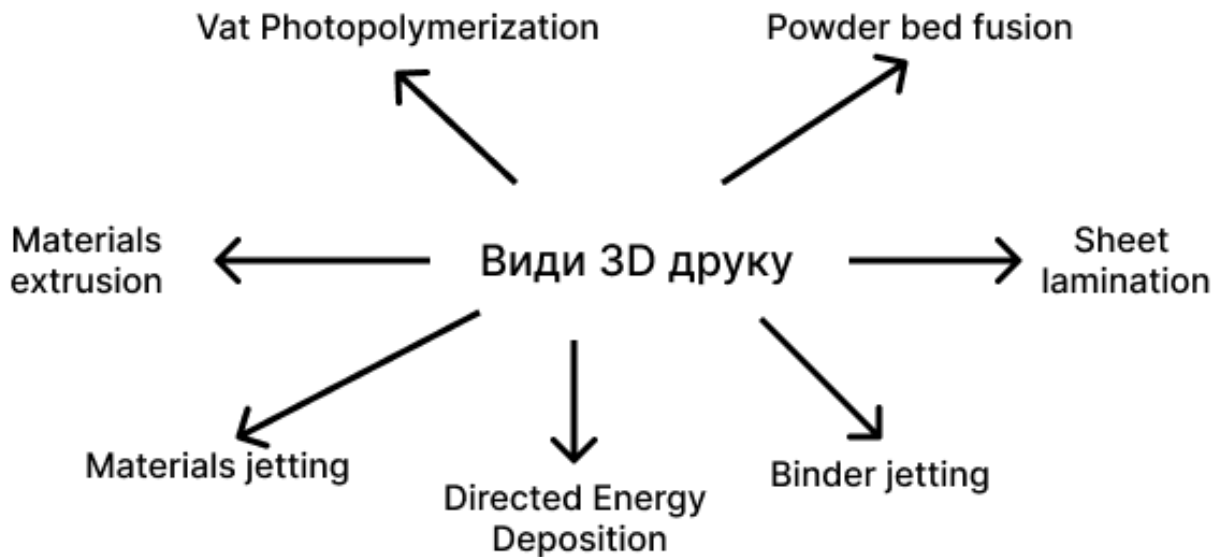


Рисунок 1.1 – Види 3D друку

У наш час технології адитивного виробництва вийшли за межі їх початкового використання в прототипах. Їх все частіше використовують для створення різноманітної продукції, що вказує на зростаючу універсальність і потенціал цих технологій [3].

### 1.1.1 Binder jetting

Струменевий друк (BJ) – це вдосконалений процес швидкого створення прототипів і 3D-друку, який передбачає вибіркове нанесення рідкого сполучника для з'єднання частинок порошку. У цій передовій технології хімічна сполучна речовина наноситься на розсипаний шар порошку для формування кожного наступного шару об'єкта [4]. Струменевий друк знаходить широке застосування у виробництві литих моделей, необроблених спечених виробів або інших великих об'ємних виробів із піщаних матеріалів [2]. Процес Binder jetting зображено на рис. 1.2.

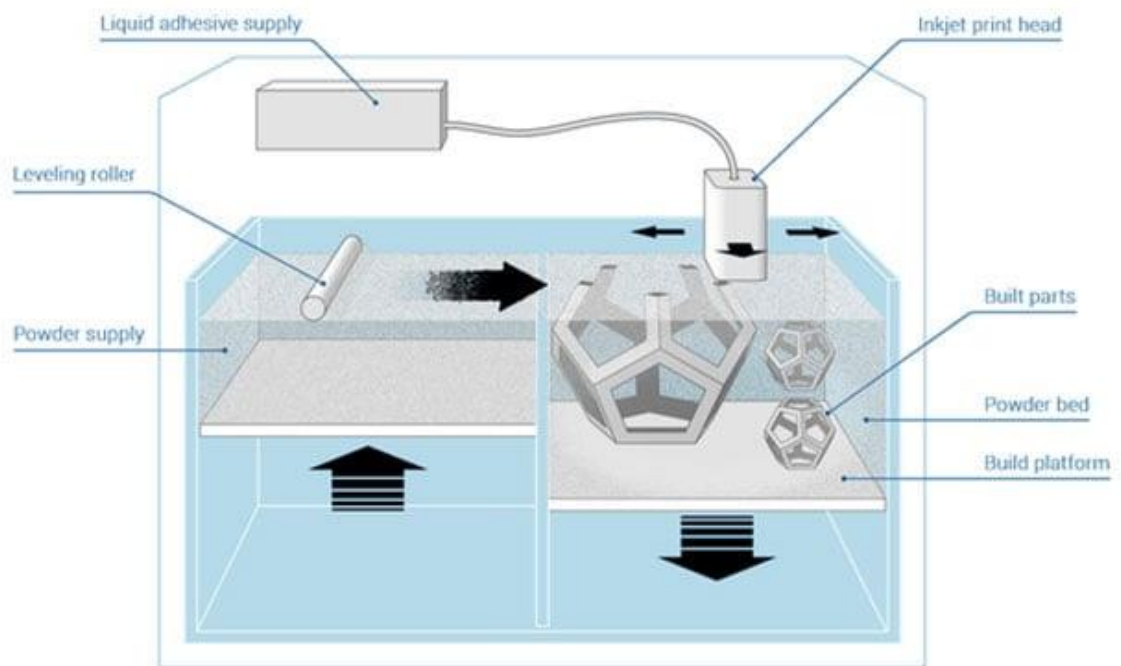


Рисунок 1.2 – Процес Binder jetting [5]

Однією з чудових особливостей струменевого друку є його здатність друкувати широкий спектр матеріалів, включаючи метали, пісок, полімери, гібриди

та кераміку. Деякі матеріали, такі як пісок, не потребують додаткової обробки після друку, що додає легкості та ефективності процесу. Заслуговує на увагу економічна ефективність струменевого сполучення, оскільки частинки порошку з'єднуються разом, що сприяє швидшому та економнішому виробництву [2].

Ще одна суттєва перевага струменевої обробки зв'язувального матеріалу — це можливість виготовляти дуже великі вироби, що робить його кращим для проектів, які вимагають значних розмірів. Поєднання універсальності, швидкості, рентабельності та можливості виготовляти значні вироби робить технологію швидкого друку все більш популярною та перспективною у сфері адитивного виробництва.

### 1.1.2 Directed Energy Deposition

Спрямоване енергетичне осадження (DED) — це складний процес 3D-друку, який зазвичай використовується для ремонту або додавання додаткових матеріалів до існуючих компонентів [6]. Ця техніка забезпечує високий ступінь контролю над структурою зерна, що забезпечує виробництво високоякісних об'єктів. Хоча процес концептуально подібний до екструзії матеріалу, сопло не обмежене певною віссю та може рухатися в кількох напрямках, що забезпечує більшу універсальність друку [2]. Процес Directed Energy Deposition зображено на рис. 1.3.

Спрямоване енергетичне осадження можна застосовувати з різними матеріалами, включаючи кераміку та полімери, але в основному воно використовується з металами та гібридами на основі металу, доступними у формі дроту або порошку. Яскравими прикладами цієї технології є лазерне осадження та формування сітки за допомогою лазера (LENS) [6]. Лазерне осадження, зокрема, є новою технологією, яка потенційно може виробляти або ремонтувати деталі

розміром від міліметрів до метрів. Завдяки своїй масштабованості та різноманітним можливостям, які пропонуються в одній системі, вона привернула значну увагу в таких секторах, як інструментальне обладнання, транспорт, авіакосмічна промисловість [7].

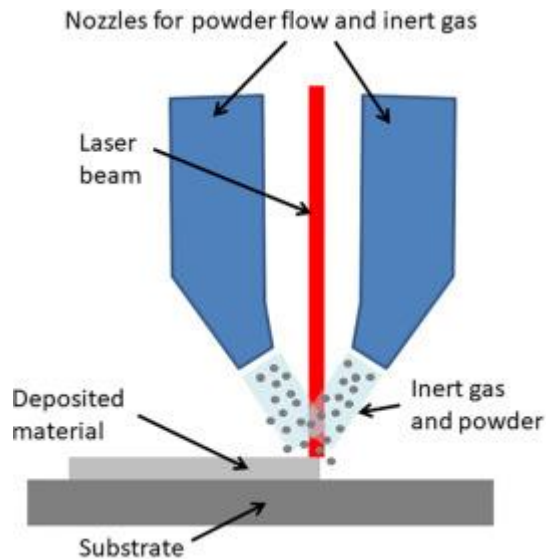


Рисунок 1.3 – Процес Directed Energy Deposition [8]

З іншого боку, LENS використовує теплову енергію для плавлення під час процесу лиття, а деталі виготовляються згодом [9]. Ця інноваційна технологія відкриває можливості для передових виробничих застосувань, забезпечуючи покращений контроль над виробничим процесом і можливість досягати складних геометрій і високоякісних результатів.

### 1.1.3 Materials extrusion

Екструзія матеріалів (ME) - технологія адитивного виробництва що має потенціал, щоб уможливити багатоматеріальний і багатокольоровий друк із різних речовин, включаючи пластик, їжу та живі клітини [10]. Цей універсальний процес

(рис. 1.4) набув широкого поширення, частково завдяки своїй економічній ефективності. Крім того, екструзія матеріалу дозволяє створювати повністю функціональні частини та компоненти [6], що ще більше підвищує його привабливість.

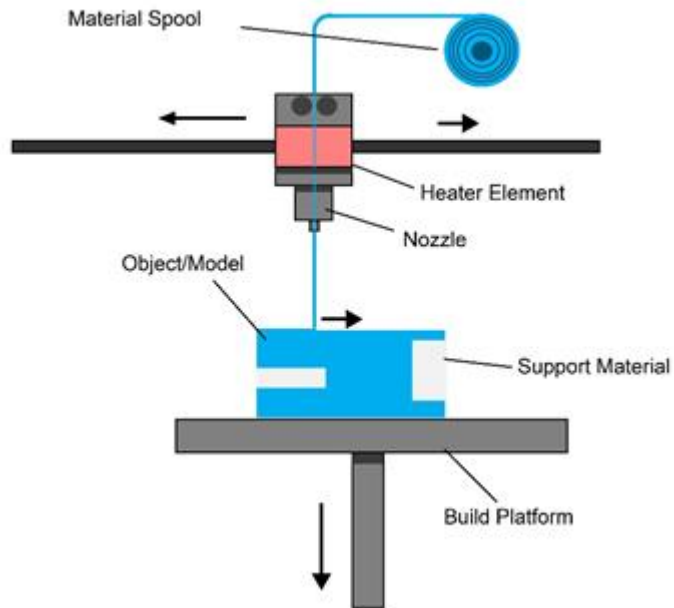


Рисунок 1.4 – Процес Materials extrusion [11]

Одним із прикладів екструзії матеріалів є моделювання методом наплавлення (FDM), яке було розроблено на початку 1990-х років [12]. FDM використовує полімери як основний матеріал і працює, створюючи деталь шар за шаром, починаючи знизу та просуваючись поступово угору. Це досягається шляхом нагрівання та екструдювання термопластичних ниток, які ретельно насаджуються для формування бажаного об'єкта.

Покроково процес FDM можна описати таким чином:

- 1) Термопластичний матеріал нагрівається до напіврідкого стану, а потім точно екструдується у надтонких потоках, схожих на кульки, уздовж визначеного шляху екструзії [13].

2) У випадках, коли потрібна підтримка або буферизація, 3D-принтер стратегічно розміщує знімний матеріал, який служить опорою для забезпечення стабільності та структури для складних або нависаючих частин надрукованого об'єкта. Міцний пластиковий матеріал використовується під час процесу друку для створення 3D-моделі кістки, гарантуючи точне копіювання та підтримку складних структур протягом усієї процедури друку. Після завершення друку опорний матеріал можна легко видалити, залишаючи бажаний готовий продукт [13].

#### 1.1.4 Materials jetting

Струменеве нанесення матеріалів (MJ) — це передовий процес адитивного виробництва, який передбачає точне нанесення друкованих матеріалів способом «крапля за краплею». У цій техніці спеціальна друкуюча головка подає краплі світлочутливого матеріалу, які швидко твердіють під дією ультрафіолетового (УФ) світла [14]. Пошарове накопичення цих затверділих крапель призводить до формування повністю реалізованої частини.

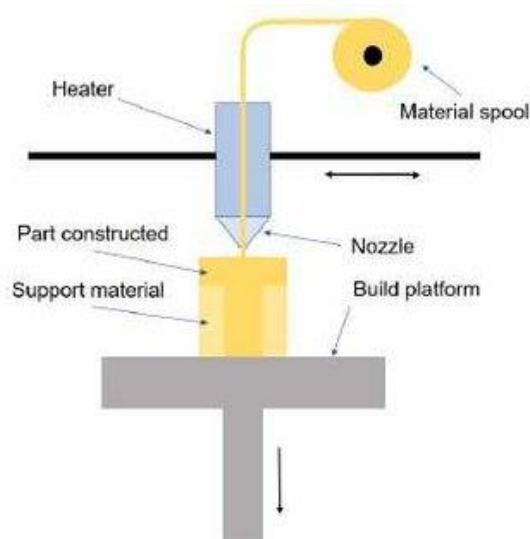


Рисунок 1.5 – Процес Materials jetting [15]

Однією з ключових переваг струменевої обробки матеріалів є можливість створювати деталі з виключно гладкою поверхнею та високою точністю розмірів. Більше того, цей процес забезпечує універсальність друку на кількох матеріалах, що дає змогу працювати з широким спектром матеріалів, включаючи полімери, кераміку, композити, біологічні та гібридні матеріали [6]. Широкий вибір матеріалів і можливість досягти найвищої якості та точності поверхні роблять струменеве нанесення матеріалів непоганим вибором для різноманітних застосувань у адитивному виробництві. Процес Materials jetting зображено на рис. 1.5.

#### 1.1.5 Powder bed fusion

Процес селективного спікання (PBF) включає різні передові технології адитивного виробництва, такі як плавлення електронним променем (EBM), селективне лазерне спікання (SLS) і селективне термічне спікання (SHS). У цих методах використовується або електронний промінь, або лазер для ефективного розплавлення або сплавлення порошку матеріалу разом, що призводить до утворення складних 3D-об'єктів (рис. 1.6). Матеріали, які використовуються в цьому процесі, охоплюють широкий діапазон, включаючи метали, кераміку, полімери, композити та гібридні матеріали [2].

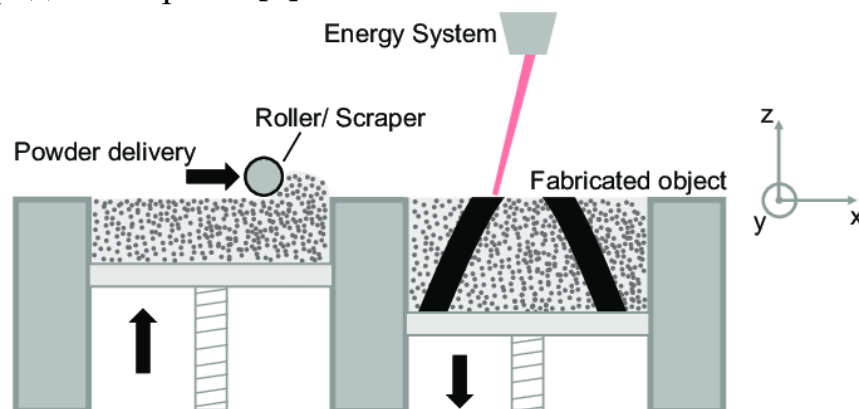


Рисунок 1.6 – Процес Powder bed fusion [16]

Серед технологій адитивного виробництва друку на основі порошку як основний приклад можна виділити селективне лазерне спікання (SLS). Розроблений Карлом Декардом у 1987 році, SLS відомий своєю винятковою швидкістю, високою точністю та універсальними можливостями обробки поверхні [17]. Ця технологія дозволяє створювати об'єкти з використанням різних матеріалів, таких як метал, пластик і кераміка [18]. SLS використовує потужність високо-енергетичного лазера для спікання полімерних порошків, таким чином перетворюючи їх на повністю реалізовані 3D-продукти.

З іншого боку, вибіркове термічне спікання (SHS) є ще одним важливим компонентом технології 3D-друку. SHS використовує термічну друкуючу головку в процесі плавлення термопластичних порошків, полегшуючи створення 3D-друкованих об'єктів [18].

Електронно-променеве плавлення (EBM) являє собою потужне джерело енергії, яке використовується для нагрівання матеріалу під час процесу друку. Цей метод допомагає виготовляти складні та високоякісні металеві компоненти з винятковою структурною цілісністю.

Процес сплавлення порошкового шару з його різноманітними та інноваційними технологіями відіграє ключову роль у розвитку можливостей адитивного виробництва та розширенні його потенційних застосувань у різних галузях промисловості.

#### 1.1.6 Sheet lamination

Згідно з визначенням ASTM, листове ламінування (SL) — це вартий уваги процес адитивного виробництва (зображений на рис. 1.7), який передбачає склеювання листів матеріалів разом для створення повної частини або об'єкта [14].

Двома яскравими прикладами технологій адитивного виробництва, які використовують цей процес, є виробництво ламінованих об'єктів (LOM) і ультразвукове адитивне виробництво (UAM) [6].

Переваг технології листового ламінування декілька. По-перше, це забезпечує повнокольоровий друк, створюючи візуально привабливі та реалістичні об'єкти. По-друге, цей процес відносно недорогий порівняно з іншими методами 3D друку

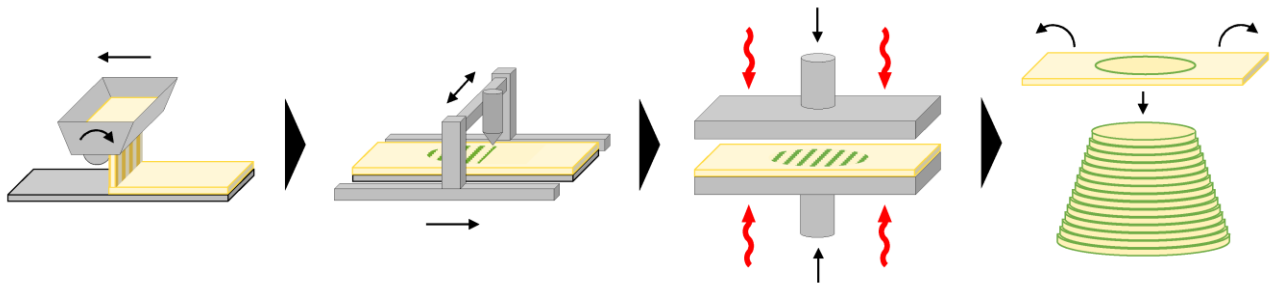


Рисунок 1.7 – Процес Sheet lamination [19]

що робить його економічно ефективним варіантом для певних застосувань. Крім того, обробка матеріалів у листовому ламінуванні є простою, що сприяє більшій легкості процесу виготовлення. Крім того, будь-який надлишок матеріалу можна переробити, що ще більше підвищує ефективність і довговічність техніки.

Laminated Object Manufacturing (LOM) демонструє свою здатність виробляти складні геометричні деталі з меншими витратами на виготовлення та коротшим робочим часом, що робить його кращим вибором для складних конструкцій і швидкого прототипування [20].

Ультразвукове адитивне виробництво (UAM) з'являється як інноваційна технологія, яка використовує звукові хвилі для злиття шарів металу, отриманого з невиразної фольги [2]. Цей передовий метод відкриває нові можливості для прогресивного виробництва, особливо у сфері виробництва металевих деталей.

Загалом, ламінування листів, представлене LOM і UAM, демонструє свій цінний внесок у адитивне виробництво, пропонуючи низку переваг, універсальність і потенціал для різноманітних промислових застосувань.

### 1.1.7 Vat Photopolymerization

Фотополімеризація у ємності (VPP) виділяється як одна з основних і часто використовуваних технологій адитивного виробництва (рис. 1.8), що охоплює затвердіння фотореактивних полімерів за допомогою лазерного, світлового або ультрафіолетового (УФ) випромінювання [21]. Стереолітографія (SLA) і цифрова обробка світла (DLP) є яскравими прикладами технологій адитивного виробництва, які використовують фотополімеризацію.

У випадку SLA процес значною мірою залежить від конкретних умов фотоініціації та опромінення, а також від наявності барвників, пігментів або інших поглиначів ультрафіолетового випромінювання [12]. Ця взаємодія факторів забезпечує точне затвердіння фотореактивних полімерів, що призводить до успішного створення 3D-друкованого об'єкта.

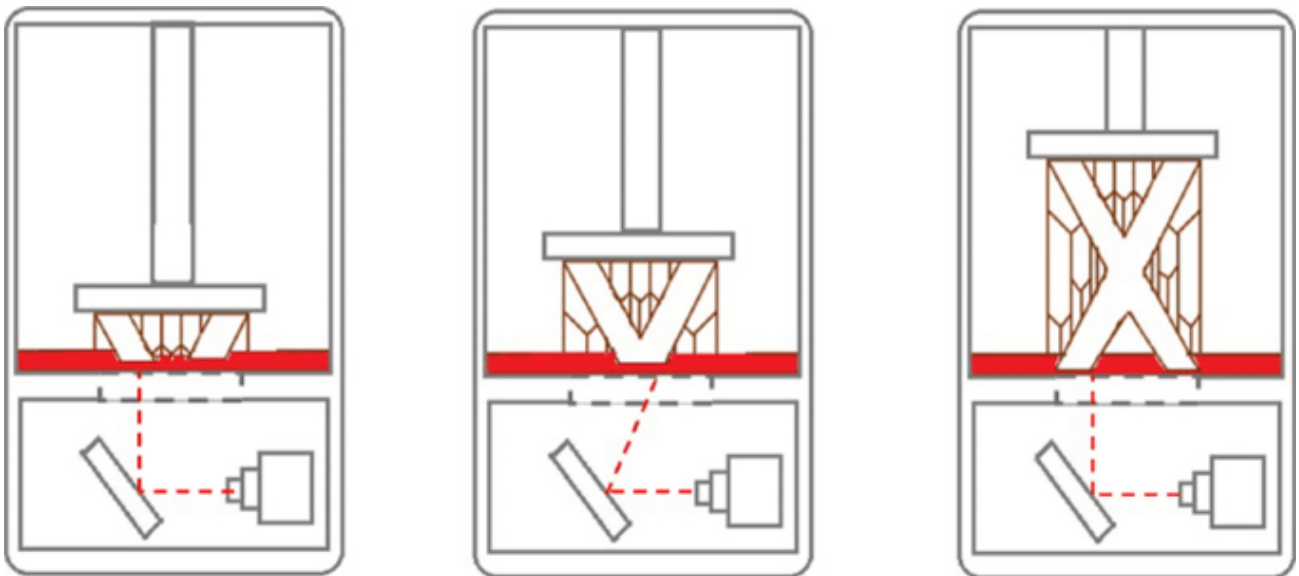


Рисунок 1.8 – Процес Vat Photopolymerization [22]

Подібним чином цифрова обробка світла (DLP) має спільні риси зі стереолітографією в роботі з фотополімерами. Основна відмінність полягає у використуваному джерелі світла, при цьому цифрова обробка світла використовує більш звичайне джерело світла, як дугова лампа в поєднанні з панеллю рідкокристалічного дисплея. Це джерело світла дозволяє застосовувати ультрафіолетове опромінення по всій поверхні ванни з фотополімерною смолою за один прохід, що призводить до швидшого друку порівняно зі стереолітографією [23].

Ключові параметри для успішної фотополімеризації у ємності включають час експозиції, довжину хвилі та потужність, що подається під час процесу друку. Матеріали, які використовуються в цій техніці, спочатку знаходяться в рідкій формі і твердіють під впливом ультрафіолетового світла.

Фотополімеризація дуже підходить для створення продуктів преміум-класу з винятковими деталями та високоякісною обробкою поверхні, що робить її найкращім вибором для виготовлення складних і візуально привабливих 3D-друкованих об'єктів [10].

## 1.2. Матеріали, що використовуються для технології 3D-друку в машинобудівній промисловості

Як і будь-який виробничий процес, 3D-друк вимагає використання високоякісних матеріалів, які відповідають узгодженим специфікаціям, щоб досягти виробництва надійних і першокласних пристроїв. Для забезпечення цього між постачальниками, покупцями та кінцевими користувачами матеріалів, залучених до процесу FDM, встановлюються комплексні процедури, вимоги та угоди. Це забезпечує стандартизований і контрольований підхід до вибору та використання

матеріалів [2], що в кінцевому підсумку сприяє створенню високоякісних 3D-друкованих продуктів.

Універсальність технології адитивного виробництва дозволяє виготовляти повністю функціональні деталі з використанням широкого спектру матеріалів. Ці матеріали включають кераміку, металеві речовини, полімери та різні їх комбінації, такі як гібриди, композити або функціонально сортовані матеріали. Цей широкий асортимент матеріалів надає FDM методу можливість задовольняти різноманітні потреби застосування, та виготовляти складні та індивідуальні продукти для різних галузей промисловості [6].

У таблиці 1.1 надано види матеріалів та їх характеристика для FDM методу.

Таблиця 1.1 – Види матеріалів та їх характеристика взятих з сайту продавця MonoFilament [24]

| Назва матеріалу | Густина, г/см <sup>3</sup> | Темп. експл., °C | Міц. на розтяг, МПа | Відн. Видов. при розриві, % | Модуль пружності при розтягу, МПа | Модуль пружності при згині, МПа | Міцність при згині, МПа | Ударна в'язкість без надрізу по Шарпі (23°C), кДж/м <sup>2</sup> | Вод. пог. 24ч/23°C, % |
|-----------------|----------------------------|------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1               | 2                          | 3                | 4                   | 5                           | 6                                 | 7                               | 8                       | 9                                                                | 10                    |
| ABS+            | 1,05                       | -20 - 80         | 40                  | 35%                         | 2700                              | 2800                            | 70-80                   | 208                                                              | 1%                    |
| MBS             | 1,05                       | +70              | 28                  | 50                          | 2100                              | 2000                            | 50                      | N                                                                | 0,1%                  |
| COPET           | 1,25                       | -20 - +70        | 50                  | 24                          | 1920                              | 1980                            | 76                      | 104                                                              | 3%                    |
| PCTG            | 1,23                       | -20 - +70        | 45                  | 340                         | 1800                              | 53                              | не зруйнувалася         | 105                                                              | 3%                    |
| PLA             | 1,24                       | -10 - +50        | 51                  | 30                          | 2300                              | 1440                            | 80                      | 102                                                              | 0,7                   |
| HIPS            | 1,05                       | -20 - +80        | 30                  | 30                          | 2230                              | 2300                            | 50                      | 120                                                              | 1                     |
| SAN             | 1,03                       | -10 - +80        | 71                  | 3                           | 3500                              | 2700                            | 120                     | 2                                                                | 0,2                   |
| ELASTAN D70     | 1,15                       | -40 - +120       | 57                  | 370                         |                                   |                                 | 78                      |                                                                  | 1                     |

Продовження таблиці 1.1

| 1                          | 2    | 3          | 4  | 5   | 6    | 7    | 8              | 9   | 10  |
|----------------------------|------|------------|----|-----|------|------|----------------|-----|-----|
| ELASTAN D100               | 1,18 | -40 - +100 | 68 | 436 |      |      | 46             |     | 1,2 |
| ELASTAN D160               |      | -40 - +80  | 55 | 680 |      |      | 46             |     | 1,5 |
| TPU 90A                    | 1,21 | -40 - +140 | 60 | 510 | 94   |      |                |     | 0,6 |
| PET                        | 1,27 | -20 - +200 | 70 | 50  | 3000 | 2700 | 70             |     | 2   |
| NYLON                      | 1,20 | -30 - +120 | 78 | 75  | 2700 | 2600 | 70             |     | 3   |
| PA12                       | 1,02 |            | 48 | 9   |      | 1900 | не зруйнувався |     | 1,5 |
| ASA                        | 1,07 | -40 - +85  | 47 | 15  | 2200 |      | 47             | 18  | 3   |
| PBT                        | 1,31 | -40 - +120 | 65 | 3   | 2550 | 2500 | 65             |     | 1   |
| PLA WOOD                   | 1,24 | -10 - +50  | 51 | 30  | 2300 | 1440 | 80             | 102 | 0,7 |
| PLA-CCU МІДЬ               | 2,5  | -10 - +50  | 51 | 30  | 2300 | 1440 | 80             | 102 | 0,7 |
| PLA-CG+ ГРАФІТОВИЙ         | 2,5  | -10 - +50  | 51 | 30  | 2300 | 1440 | 80             | 102 | 0,7 |
| COPEL-CCF (CARBON FIBER)   | 1/1  | -20 - +70  |    |     |      |      |                |     | 3   |
| ABS PRO CCF (CARBON FIBER) | 1,09 | -40 - +85  | 30 | 5,5 |      |      |                |     | 1   |
| ABS PRO CGF (GLASS FIBER)  | 1,09 | -40 - +85  |    |     |      |      |                |     |     |

Продовження таблиці 1.1

| 1                        | 2    | 3          | 4  | 5   | 6    | 7    | 8              | 9 | 10  |
|--------------------------|------|------------|----|-----|------|------|----------------|---|-----|
| NYLON-CCF (CARBON FIBER) | 1,12 | -30 - +120 | 60 | 50  | 5800 | 5800 | 70             |   | 3   |
| TPU CONDUCTIVE           | 1,21 | -40 - +140 | 60 | 510 | 94   |      |                |   | 0,6 |
| PA12 CCF (CARBON FIBER)  | 1,04 |            | 55 | 7   |      | 5200 | не зруйнувався |   | 1,5 |

- на сьогодні ці параметри не встановлені, а у вузькопрофільних матеріалах цих параметрів ще менше.

### 1.2.1 Метали

Технологія 3D-друку з металу привернула значну увагу та інтерес у різних галузях, включаючи аерокосмічну, автомобільну, медичну та промислову промисловість. Така популярність пояснюється численними перевагами, які вона пропонує [25]. Металеві матеріали мають виняткові фізичні властивості, що робить їх придатними для широкого спектру застосувань, від друку людських органів до виробництва аерокосмічних компонентів. Основні металеві матеріали, що використовуються у 3D-друці, включають алюмінієві сплави [26], сплави на основі кобальту [27], сплави на основі нікелю [28], нержавіючу сталь [29] і титанові сплави [30-31].

Сплави на основі кобальту, наприклад, використовують для 3D друку у стоматологічних цілях завдяки їх високій питомій жорсткості, пружності та чудовим

умовам термічної обробки [27]. Крім того, ці сплави демонструють високу здатність до відновлення та подовження, що робить їх ідеальним вибором для використання в стоматології.

В аерокосмічній промисловості сплави на основі нікелю [28] використовуються для виготовлення тривимірних об'єктів, здатних витримувати суворі та небезпечні умови [21]. Ці сплави мають високу корозійну стійкість і можуть витримувати температуру до 1200 °C, що робить їх високонадійними для аерокосмічного застосування [25].

Іншим відомим металом, який використовується в 3D-друці, є титановий сплав, відомий своїми унікальними властивостями, такими як пластичність, висока стійкість до корозії та окислення, а також низька щільність. Цей сплав особливо підходить для витримки високої напруги та високої робочої температури, наприклад, для аерокосмічних компонентів [30] і біомедичної промисловості [31].

Можливість адаптації та універсальність технології адитивного виробництва з металу відкриває безліч можливостей, пропонуючи передові рішення для складних і критичних виробничих потреб у різних сферах.

### 1.2.2 Полімери

Технології адитивного виробництва набули широкого застосування у виробництві полімерних компонентів, починаючи від прототипів і закінчуючи повністю функціональними структурами зі складною геометрією [32]. Моделювання методом наплавлення (FDM) — це метод, який полегшує створення 3D-друкованих об'єктів шляхом нанесення послідовних шарів екструдованої термопластичної нитки. Ця універсальна техніка дозволяє використовувати різні термопластичні матеріали, включаючи полімолочну кислоту (PLA),

акрилонітрилбутадієнстирол (ABS), поліпропілен (PP) і поліетилен (PE) [32]. Крім того, останні досягнення дозволили використовувати термопластичні нитки з вищими температурами плавлення, такі як PEEK і PMMA, як придатні матеріали для технології 3D-друку [33].

Полімерні матеріали в рідкому стані або з низькою температурою плавлення знайшли широке застосування в галузі адитивного виробництва завдяки своїй економічній ефективності, та гнучкості обробки [34]. Ці матеріали відіграють ключову роль у сфері біоматеріалів і медичних пристроїв, часто слугуючи інертними компонентами, які сприяють ефективному функціонуванню медичних пристроїв і забезпечують важливу механічну підтримку в різних ортопедичних імплантатах [27].

Універсальність і адаптивність адитивного виробництва з полімерними матеріалами спричинили революцію у виробництві, пропонуючи інноваційні рішення для складних вимог дизайну та економічно-ефективне виробництво індивідуальних компонентів. Постійний прогрес у полімерному 3D-друці містить величезний потенціал для трансформації різних галузей промисловості, зокрема в сфері медицини та охорони здоров'я.

### 1.2.3 Кераміка

У наш час технологія адитивного виробництва просунулася настільки, що дозволяє ефективно створювати 3D-друковані об'єкти з кераміки та бетону, демонструючи мінімальну пористість і тріщини завдяки ретельній оптимізації параметрів і точному налаштуванню механічних властивостей [35]. Кераміка, відома своєю міцністю, довговічністю та вогнестійкістю, стала багатообіцяючим виробничим матеріалом. Її рідкий стан перед застиганням дозволяє наносити

кераміку практично будь-якої геометричної форми, що робить її придатною для майбутнього будівництва та будівельних робіт [35]. Універсальність кераміки поширюється на різні галузі, зокрема кераміку використовують в стоматологічній та аерокосмічній промисловості [36].

Серед керамічних матеріалів, які використовуються в 3D-друці, виділяються оксид алюмінію [37], біоактивне скло [38] та діоксид цирконію [39]. Оксид алюмінію, зокрема, демонструє чудові властивості оксиду кераміки, знаходячи широке застосування в різноманітних галузях промисловості, таких як каталізatori, адсорбенти, мікроелектроніка, хімічна промисловість, аерокосмічна промисловість та інших високотехнологічних галузях [40]. Технологія адитивного виробництва дозволила виготовляти деталі складної форми з оксиду алюмінію з високою щільністю після спікання, а також високою щільністю неспеченого матеріалу [37], має можливості у створенні складних і міцних керамічних компонентів.

Стереолітографічні машини (SLA) відіграли важливу роль в експериментах зі склокерамікою та біоактивним склом, ефективно покращуючи їх міцність на згин і механічні властивості [2]. Зміцнене біоактивне скло відкриває можливості для застосування в таких клінічних структурах, як каркаси та кістки.

Використовуючи стереолітографічне виробництво кераміки (SLCM), тепер можна виробляти суцільну кераміку з високою щільністю, виключно однорідною мікроструктурою та вражаючою міцністю на стиск і згин [38].

У сфері ядерної енергетики діоксид цирконію відіграє життєво важливу роль, оскільки використовується як конструкційний матеріал для трубних елементів. Цирконій без гафнію, зокрема, демонструє низьку сприйнятливості до випромінювання та низький рівень поглинання теплових нейтронів [39], що робить його ідеальним вибором для цього критичного застосування.

Загалом, прогрес у технології адитивного виробництва розширила сферу застосування кераміки, для новаторських інновацій у багатьох галузях

промисловості та додатково розширивши потенціал для індивідуальних та високопродуктивних компонентів.

#### 1.2.4 Композити

Композитні матеріали, відомі своєю дивовижною універсальністю, легкою структурою та адаптованими властивостями, викликали революційний вплив у високопродуктивних галузях. Серед композитних матеріалів можна відокремити два приклади які включають: полімерні композити [41], армовані вуглецевим волокном, і полімерні композити, армовані скловолокном [42].

Полімерні композити, армовані вуглецевим волокном, знаходять широке застосування в аерокосмічній промисловості завдяки винятковій комбінації високої питомої жорсткості, міцності, хорошої корозійної стійкості та характеристик втоми [41]. Ці властивості роблять їх кращим вибором для побудови легких, але міцних конструкцій в аерокосмічній галузі.

З іншого боку, полімерні композити, армовані скловолокном, отримали широке застосування в різних програмах 3D-друку [42] завдяки своїй економічній ефективності та високій продуктивності [43]. Основний компонент полімерних композитів, армованих скловолокном, має високу теплопровідність і відносно низький коефіцієнт теплового розширення. Крім того, він негорючий і на нього не впливають температурні затвердіння, які використовуються у виробничих процесах, що робить його придатним для 3D-друку [43].

Впровадження цих композитних матеріалів у високопродуктивні галузі промисловості та технології адитивного виробництва призвело до значного прогресу та інноваційних рішень, демонструючи потенціал для послідуєчих проривів у різних галузях промисловості. Унікальні властивості та переваги

композитних матеріалів продовжують стимулювати прогрес у інженерії та виробництві, сприяючи передовим розробкам щодо покращенням характеристик експлуатації.

### 1.2.5 Розумні матеріали

Розумні матеріали — це клас матеріалів із чудовою здатністю змінювати свою геометрію та форму у відповідь на зовнішні умови, такі як тепло та вода [44]. Ця адаптивність відкрила дивовижні можливості в технології адитивного виробництва, що призвело до створення нових об'єктів, таких структур як «розумні» матеріали – саморозвиваюча структура, і м'якої роботехнічної системи. Розумні матеріали також підходять під групу матеріалів для 4D-друку, оскільки вони можуть трансформуватися з часом у відповідь на подразники навколишнього середовища.

Яскравими прикладами розумних матеріалів, які використовуються в адитивному виробництві, є сплави з пам'яттю форми (SMA) [45] і полімери з пам'яттю форми (SMP) [46]. Сплави з пам'яттю форми, такі як нікель-титан (Ni-Ti) [45], знайшли різноманітне застосування – від біомедичних імплантатів до мікроелектро-механічних пристроїв [35]. У виробництві 3D-друкованої продукції з використанням Ni-Ti контроль температур, відтворюваність мікроструктури та щільності є ключовими факторами [2] для забезпечення оптимальної продуктивності та функціональності.

З іншого боку, полімери з пам'яттю форми (SMP) належать до групи функціональних матеріалів, які реагують на різні подразники, такі як: світло, електрика, тепло та деякі хімічні речовини [46]. Використовуючи технологію адитивного виробництва, SMP складної форми можна виготовляти зручно й точно, розкриваючи їхній потенціал для широкого спектру застосувань. Оцінка якості SMP

будується навколо таких параметрів, як точність розмірів, шорсткість поверхні та щільність деталей [46], щоб забезпечити цілісність і надійність надрукованих об'єктів.

Розумні матеріали та адитивне виробництво мають величезні перспективи для розвитку різних галузей промисловості, зокрема охорони здоров'я, робототехніки, аерокосмічної галузі тощо. Здатність цих матеріалів динамічно адаптуватися до умов, дає можливість для розробки високочутливих і універсальних продуктів із розширеною функціональністю та користю. В міру того як дослідження та розробки в галузі продовжують прогресувати, «розумні» матеріали та адитивне виробництво роблять революцію в інженерних та виробничих процесах, розширюючи межі, того що можна досягти в сучасних технологіях.

#### 1.2.6 Спеціальні матеріали

Приклади спеціальних матеріалів:

##### 1) Їжа

Революційна технологія адитивного виробництва розширила свій вплив на сферу виробництва продуктів харчування, дозволяючи створювати чудові та персоналізовані кулінарні шедеври. Завдяки використанню різноманітних харчових матеріалів, таких як шоколад, м'ясо, цукерки, піца, спагетті та різноманітні соуси, 3D-друк їжі відкриває безмежні можливості для формування та створення кулінарних шедеврів [47].

3D-друк їжі виходить за рамки простого виготовлення візуально привабливих страв, а також пропонує унікальну перевагу сприяння здоровим харчовим звичкам. Цей інноваційний процес дає клієнтам можливість персоналізувати свій вибір їжі, регулюючи інгредієнти без шкоди для основних поживних речовин і апетитного

смаку оригінальних компонентів [48]. Отже, люди можуть пристосовувати свої страви відповідно до своїх харчових уподобань, дієтичних потреб і навіть конкретних дієтичних обмежень.

Крім того, 3D-друк їжі демонструє свій потенціал для революції в харчовій промисловості шляхом оптимізації та автоматизації процесів приготування їжі. Це означає підвищену ефективність і послідовність у виробництві їжі, що робить його багатообіцяючою перспективою для закладів громадського харчування, ресторанів і навіть персоналізованих служб доставки їжі.

Оскільки технології продовжують розвиватися, очікується, що поєднання адитивної технології та виробництва їжі змінить кулінарну сферу і підніме концепцію гастрономії на нову планку. Універсальність матеріалів, точність друку та персоналізація харчових пропозицій прокладають шлях до інноваційного майбутнього, де кулінарне мистецтво та передові технології об'єднуються, щоб задовільняти та жити наші смаки інноваційними та безпечними для здоров'я стравами.

## 2) Місячний реголіт

Революційний процес адитивного виробництва відкрив надзвичайну можливість: пряме виробництво багатошарових деталей за допомогою місячного пилу, також відомого як місячний реголіт. Ця технологія має величезні перспективи та потенціал, особливо в контексті майбутніх спроб колонізації Місяця [49].

Використовуючи місячний реголіт, знайдений на поверхні Місяця, 3D-друк має можливість виготовлення основних компонентів і структур, необхідних для підтримки життя та діяльності людини на поверхні Місяця. Ця здатність особливо важлива, враховуючи проблеми транспортування великої кількості матеріалів із Землі на Місяць, що було б і дорогим, і складним.

Використання місячного реголіту як сировини для 3D-друку відкриває великі можливості для будівництва середовищ існування, захисних укриттів і різних

елементів інфраструктури на Місяці. Цей самоокупний підхід до виробництва на місці є значним прогресом у галузі дослідження космосу та колонізації Місяця.

Оскільки космічні агентства націлюються на майбутні місячні місії та постійні поселення на Місяці, інтеграція адитивної технології з місячним реголітом як будівельним матеріалом пропонує чудовий підхід для вирішення проблем, пов'язаних із дефіцитом ресурсів і транспортними обмеженнями.

### 3) Текстиль

Поява технології адитивного виробництва готова революціонізувати не лише світ ювелірних виробів, а й індустрію одягу, розпочавши нову еру інновацій із появою 3D-друку на текстилі. Ця передова технологія приносить безліч переваг сфері моди, великий набір можливостей.

У сфері ювелірних виробів адитивне виробництво відкриває нові можливості у творчості та персоналізації. Тепер дизайнери можуть створювати складні та унікальні ювелірні вироби з дивовижною точністю та складністю, задовольняючи індивідуальні вимоги та смаки. Можливості швидкого прототипування 3D-друку значно скорочують час, необхідний для перетворення концептуальних проектів у реальні шедеври, прискорюючи процес розробки продукту [9].

Так само швейна промисловість переживає трансформацію з появою адитивного виробництва текстилю. Цей революційний процес дозволяє створювати тканини зі складними візерунками, текстурами, створюючи одяг, який колись вважався неймовірним.

Крім того, впровадження технології адитивного виробництва в індустрії моди приносить економічну перевагу. Зменшення матеріальних відходів, оскільки 3D-друк використовує лише точну кількість матеріалу, необхідного для кожного виробу. Крім того, спрощений виробничий процес, зменшує витрати на пакування та поставки [9], сприяючи більш екологічному підходу до модного виробництва.

### 1.3. Основні методи

Різні методи в галузі адитивного виробництва (надані на рис. 1.9) були розроблені, щоб задовольнити потребу у виробництві складних структур із винятковою точністю. Еволюція технологій адитивного виробництва була мотивована цілою низкою особливостей, таких як прискорення процесів прототипування, забезпечення можливості виготовлення великих конструкцій, усунення дефектів у друкованих об'єктах та покращення їх механічних характеристик [50].

Серед різноманітних підходів моделювання методом наплавлення (FDM) є переважним методом адитивного виробництва, в якому широко використовуються полімерні нитки. Крім того, адитивне виробництво включає такі методології, як селективне лазерне спікання (SLS), селективне лазерне плавлення (SLM) і зв'язування рідини в тривимірному друці (3DP). Крім того, струменевий друк, контурна обробка, стереолітографія, пряме енергетичне осадження (DED) та виробництво ламінованих об'єктів (LOM) є ключовими напрямками в адитивному виробництві [50].

Більш детальний огляд цих методів можна знайти в «Bhushan and Caspers» [51] які надають більш детальний аналіз цих методологій. Також з'явилися методи які також заслуговують на увагу, а саме: двофотонна полімеризація (TPP), проекційна мікростереолітографія (PμSLA) та електрогідродинамічний друк (EHDP) [52], та метод безконтактного мікро- і нанодруку [53].

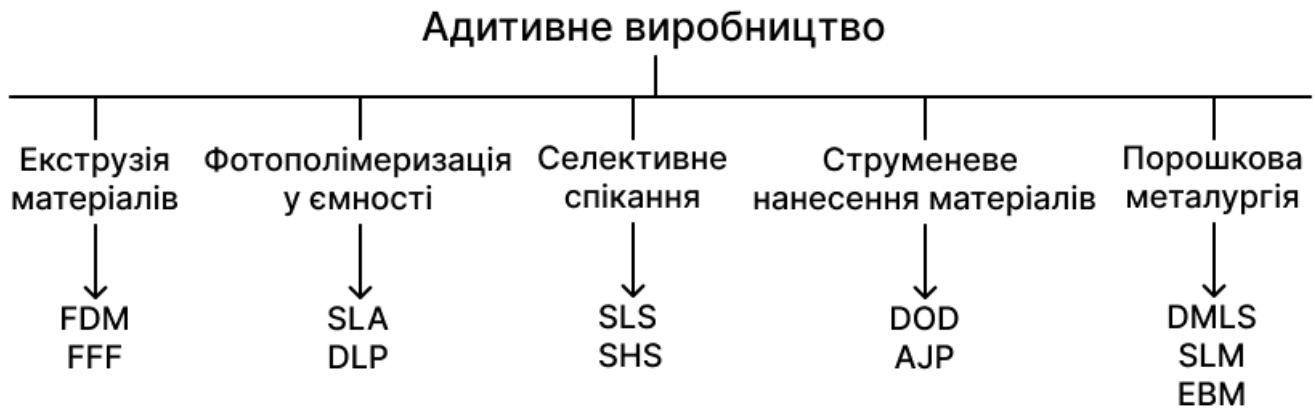


Рисунок 1.9 – Види та методи 3D друку

### 1.3.1 Моделювання методом наплавлення

Технологія FDM, також відома як виготовлення плавлених ниток (FFF), є найпоширенішим методом адитивного виробництва для швидкого виробництва. Ця загальновизнана методика була запатентована в 1989 році Скоттом Крапом, одним із співзасновників компанії Stratasys [54].

Процес адитивного виробництва за допомогою FDM передбачає точне осадження термопластичної нитки. Ця нитка витягується з котушки і проходить через нагріту друкувальну головку, де вона розплавляється до температури, що перевищує температуру плавлення. Потім розплавлену нитку видавлюють на робочу пластину в площині XY, шар за шаром [54], утворюючи твердий об'єкт (як показано на рис. 1.11 а).

Створення моделі відбувається в певній послідовності: обережно наноситься початковий контур шару, а потім точними зигзагоподібними рухами друкуючої головки пластифікованим матеріалом заповнюється внутрішня частина. Після завершення одного шару друкуюча головка піднімається вздовж осі Z, для

нарощування наступного шару. Цей підхід дозволяє виготовляти складні форми з мінімальними підготовчими процесами [54].

Процес виготовлення починається з проектування моделі за допомогою програми CAD. Після чого модель інтегрується в програму, яка надає контроль над різними параметрами процесу, включаючи рух головки, швидкість подачі, товщину шару, щільність заповнення, температуру головки та столу, нарізку, застосування допоміжних опор та багато іншого. Ця програма генерує G-код, який потім завантажується на 3D-принтер для початку створення фізичної моделі [54].

Після завершення процесу друку моделі можуть знадобитися деякі останні «штрихи», такі як: видалення опор і усунення недоліків за допомогою методів постобробки.

Схема порядку 3D-друку методом FDM представлена на рис. 1.10

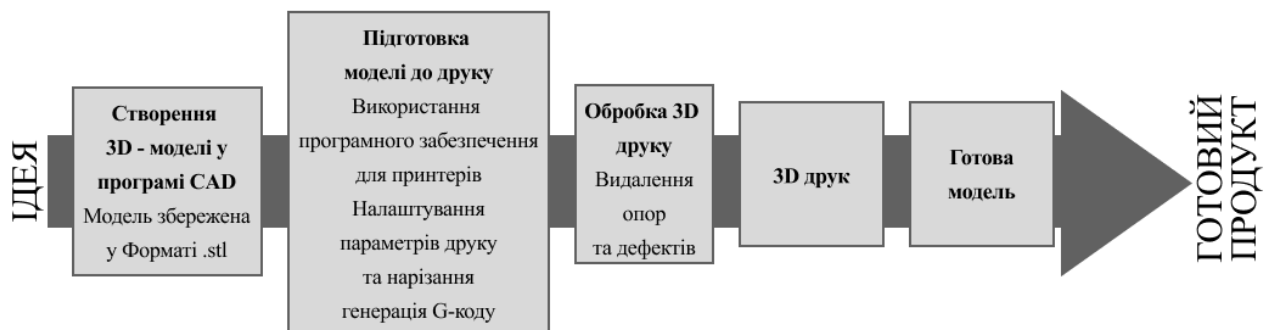


Рисунок 1.10 – Порядок FDM друку [54]

Технологія FDM зазвичай пов'язана з кількома недоліками, які включають [54]:

- ступінчасті шари - це стосується видимих шляхів нанесеного матеріалу, спричинених чіткою відстанню між краями послідовних шарів. Щоб зменшити цей ефект, можна друкувати нижні шари та зменшувати діаметр екструдера. Однак такі заходи можуть подовжити процес друку та збільшити витрати.

- виступ і нависання - під час друку моделі кожен шар будується на попередньому. Це створює проблему, коли модель містить елементи, встановлені

під кутом відносно вертикальної осі ( $45^\circ$ ), оскільки нитка може не мати належної підтримки та може зруйнуватися. Щоб вирішити цю проблему, необхідно створити опори на етапі підготовки моделі, щоб запобігти пошкодженню. Міст, тобто частини моделі з обох кінців, є особливо складним випадком нависання [55]. Таким чином, для довгих звисів необхідно розробити допоміжні опори, які пізніше треба буде видалити під час остаточної обробки моделі. Крім того, модель можна розділити та розмістити на допоміжній платформі таким чином, щоб мости розташовувалися вертикально.

- натягування, також відоме як просочування, — це явище, яке відбувається, коли пластифікована нитка просочується вниз під дією сили тяжіння під час руху екструдера між двома точками. Щоб усунути цю проблему, слід налаштувати відповідні параметри втягування. Втягування передбачає процес втягування нитки назад у сопло, щоб запобігти будь-якому небажаному витoku під час рухів без друку.

- викривлення моделі означає небажане підняття або деформацію країв або кутів моделі над столом. Ця проблема виникає через природну усадку матеріалу та нерівномірний розподіл температури по всій моделі під час процесу друку. Однак існують ефективні рішення, пом'якшення цієї проблеми. Одне з рішень полягає в регулюванні налаштувань температури робочого столу для досягнення більш рівномірного розподілу температури. Ще один корисний спосіб – наклеїти каптонову стрічку на робочу поверхню, яка покращує контакт та запобігає викривленню. Впроваджуючи ці заходи, ми можемо значно зменшити або протидіяти процесу викривлення під час 3D-друку.

- нерівномірність, є властивістю полімерних матеріалів, яка може негативно впливати на якість друку. Під впливом температури сопла під час друку волога всередині матеріалу спричиняє утворення повітряних бульбашок у структурі надрукованої моделі. Однак цю проблему можна зменшити, зберігаючи нитку у відповідних умовах або попередньо просушувати її перед початком процесу друку

[54]. Дотримуючись цих запобіжних заходів, можна звести до мінімуму негативний вплив та підвищити якість друку.

- термін «структурна неоднорідність», як запропоновано авторами [54], відноситься до нерівності, розривності, хвилястості або неоднорідності розміру частинок або недостатньої щільності виготовленого об'єкта [54]. Це характерна особливість процесу FDM друку. Структурна неоднорідність виникає внаслідок вибіркового осадження нитки шар за шаром на поверхні, а також зміни температури та пористості. Щоб пом'якшити цю проблему, можна мінімізувати її, зменшивши відстань між точками, де осаджується нитка під час процесу друку. Це налаштування допомагає досягти більш послідовної та однорідної структури друкованого об'єкта.

- пошкодження моделі головкою принтера, виникає, коли рух сопла недостатньо точний.

Важливо враховувати ці недоліки на етапах проектування та підготовки, щоб отримати задовільні та високоякісні 3D-моделі за допомогою технології FDM.

### 1.3.2 Селективне спікання

Процес селективного спікання характеризується ретельною пошаровою конструкцією з використанням дрібно подрібнених порошків, ретельно розподілених і ущільнених на платформі. Порошок кожного шару змішуються за допомогою точного наведення лазерного променя або сполучною речовиною. Наступні шари поступово накладаються та об'єднуються, поступово формуючи остаточний тривимірний об'єкт (як показано на рис. 1.11 d). Після створення цієї базової структури будь-який надлишок порошку ретельно витягується за допомогою вакууму. Залежно від випадку, для покращення характеристики об'єкта може бути

застосована подальша обробка або деталізація, це може бути покриття, спікання або інфільтрація.

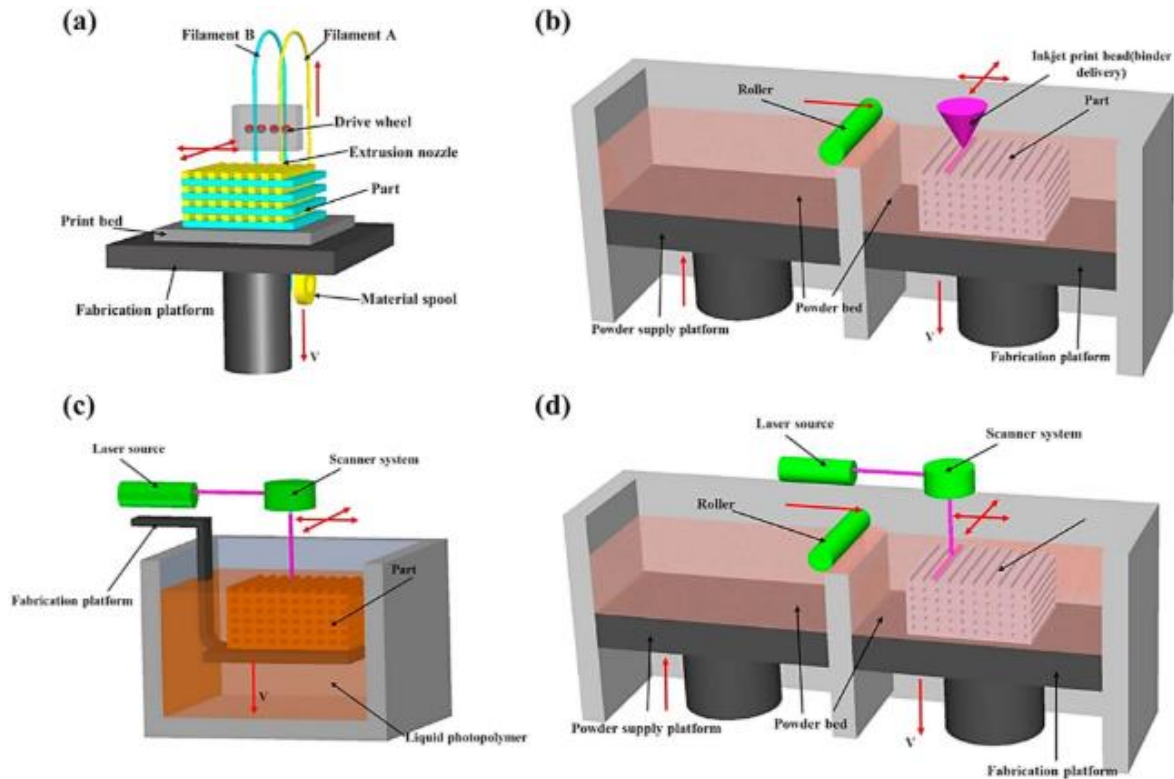


Рисунок 1.11 – Схематичні діаграми чотирьох основних методів адитивного виробництва: (a) fused deposition modelling; (b) inkjet printing; (c) stereolithography; (d) powder bed fusion [50].

Ефективність цього методу залежить від основних факторів, таких як розподіл і ущільнення розмірів порошку, які безпосередньо впливають на щільність надрукованої моделі [56]. Цей метод підходить для використання порошків з низькою температурою плавлення та спікання. Універсальність цього підходу очевидна через селективне лазерне спікання (SLS), яке включає різні полімери, метали та порошки сплавів, тоді як селективне лазерне плавлення (SLM) спеціалізується на певних металах, таких як сталь і алюміній. У SLS порошок не повністю піддається розплавленню, але підвищення температури на поверхні зерен викликає плавлення порошку на молекулярному рівні. А SLM досягає чудових

механічних властивостей завдяки повному плавленню та сплавленню порошків за допомогою лазерного плавлення [57].

Коли використовується рідка зв'язуюча речовина, цю техніку називають тривимірним друком (3DP). Хімічний склад та реологія зв'язуючої речовини, властивості частинок порошку, швидкості осадження, взаємодії між зв'язуючою речовиною і порошком, а також методів постобробки разом мають значний вплив на результати 3DP [56,58]. Зазначимо, що деталі, створені за допомогою плавленого осадження, мають суттєво більшу пористість порівняно з тими, що досягаються за допомогою методів лазерного спікання або плавлення, які можуть друкувати більш щільні конструкції [56].

Потужність лазера та швидкість сканування є основними параметрами, що впливають на процес спікання, з додатковими відомостями про різні типи лазерів та їх вплив можна ознайомитись в роботі Лі та ін. [57]. Переважними рисами порошкового сплаву є його висока роздільна здатність і якість друку, що робить його гарним вибором для виготовлення складних конструкцій. Його універсальне застосування охоплює різні галузі промисловості, включаючи такі різноманітні напрямки, як каркаси клітинної інженерії, аерокосмічні компоненти, решітки та електроніка [50]. Зазначимо, що селективне спікання вдало використовує сам порошковий шар як вбудовану опорну конструкцію, що полегшує проблеми, пов'язані з видаленням опорного матеріалу.

Однак необхідно визнати, що селективне спікання, хоч і дає складні конструкції, має певні недоліки. Швидкість процесу надає обмеження, пов'язані з часом, що супроводжується відносно високими витратами. Крім того, коли додаткова зв'язувальна речовина сплаває порошок, це може спричинити підвищену пористість кінцевого продукту, що може призвести до певних обмежень.

### 1.3.3 Струменевий друк і контурне виготовлення

У сфері адитивного виробництва кераміки струменевий друк став основним методом, який слугує для виготовлення складних і вдосконалених керамічних конструкцій. Зазначено, що його застосування охоплює різноманітні сфери, включаючи створення каркасу тканинної інженерії. У цьому методі стабільна керамічна суспензія, прикладом якої є порошок оксиду цирконію у водному середовищі [59], проходить та осідає через ін'єкційне сопло на спеціальну підкладку. Ці краплі після осадження об'єднуються в безперервну структуру, яка поступово твердіє, досягаючи необхідної міцності, щоб служити базовим шаром для наступних шарів (як показано на рис. 1.11 b).

Швидкість і ефективність цієї техніки додає гнучкості для розробки та виготовлення складних геометрій. Виділяються дві основні категорії керамічних чорнил: чорнила на основі воску та рідкі суспензії. Чорнила на основі воску, наносяться на охолоджену базу, що дозволяє їм швидко застигати. І навпаки, рідкі суспензії тверднуть за рахунок поступового випаровування рідини. Кераміка поділяється за компонентами та залежить від сукупності таких факторів, як розподіл керамічних частинок за розміром, в'язкість, вмісту твердих речовин, швидкості екструзії, розміру сопла і швидкості друку. Від цих факторів залежить кінцева якість друкованих виробів [60].

Струменевий друк має певні обмеження. Підтримка оптимальної працездатності, досягнення задовільної роздільної здатності та забезпечення надійної адгезії між шарами залишаються основними проблемами.

### 1.3.4 Стереолітографія

Серед перших методів адитивного виробництва - стереолітографія (SLA), що була розроблена у 1986 року [61]. Цей метод використовує вплив ультрафіолетового світла (або електронного променя) щоб ініціювати ланцюгову реакцію в шарі смоли або мономеру. УФ-активні мономери, переважно на акриловій або епоксидній основі, піддаються швидкому перетворенню в полімерні ланцюги після їх активації (радикалізація). Після полімеризації викликають затвердіння елементу, в середині в шару смоли, забезпечуючи основу, на якій майбутні шари будуть утримуватись (як показано на рис. 1.11 с). Після завершення, смола, що не прореагувала, ретельно зчищається. Для досягнення бажаних характеристик для окремих друкованих частин необхідно провести постобробку таку як нагрівання або фото-затвердіння.

Введення дисперсії керамічних частинок у мономерах сприяє створенню кераміко-полімерних композитів [60] або, отриманих із полімерів кераміфікованих мономерів, таких як оксикарбід кремнію [62]. Висока роздільна здатність SLA до 10 мкм полягає в створюванні компонентів найвищої якості [58]. Однак SLA не позбавлений недоліків. Його проблема в повільному друці, дороговизні процесу та нажаль обмеженому виборі матеріалів. Окрім цього кінетичний процес реакції та затвердіння є складним. Енергія, що випромінюється від джерела світла, і тривалість, впливають на товщину кожного послідовно нанесеного шару [61].

SLA можна ефективно використовувати для адитивного виробництва складних нанокompозитів [63].

### 1.3.5 Пряме енергетичне осадження

Метод прямого енергетичного осадження (DED) [64] використовують для виробництва високоефективних суперсплавів. Цей метод має декілька назв, відомий як лазерне формування сітки (LENS<sup>TM</sup>), лазерне формування твердого тіла (LSF), виготовлення спрямованого світла (DLF), пряме осадження металу (DMD), електронний промінь AM (EBAM) і дріт + Arc AM (WAAM). Суть DED полягає в використуванні потужного джерела енергії, будь то лазерний або електронний промінь, який фокусується на дрібній ділянці. Одночасно використовується для плавлення вихідного матеріалу, будь то порошок чи дріт. Потім розплавлена суміш ретельно осідає і поглинається в підкладку, що чекає поки лазерний промінь пройде, після чого суміш трансформується у твердий стан [64].

Різниця DED від методу SLM, полягає у відсутності спеціального порошкового шару. У DED не використовується порошковий шар, а вихідна сировина шляхом попереднього плавлення розплавлюється перед її пошаровим осадженням, подібно до дії FDM, але з більшою кількістю енергії для плавлення металів. Ця властивість, дає змогу DED виконувати такі завдання, як ремонт тріщин і модернізація виготовлених деталей [65]. Крім того, DED можна поєднати зі звичайними субтрактивними процесами для механічної обробки.

На практиці DED використовують для титану, інконелю, нержавіючої сталі, алюмінію та споріднених сплавів, переважно для аерокосмічного застосування. Цей метод має особливість – високу швидкість (від 0,5 кг/год для LENS [66] до 10 кг/год для WAAM [67]), також він має широку робочу поверхню, яка може розтягуватися (до 6 м × 1,4 м × 1,4 м для комерційних принтерів) [68]. Проте він поступається малою точністю (0,25мм), і має низьку якість поверхні, та виготовляє менш складні частини в порівнянні з такими методами як SLS або SLM [64]. Таким чином, його

сильні сторони це - створення великих компонентів з невеликої складності, а також їх ремонту.

DED може зменшити час і вартість виробництва, а також забезпечує чудові механічні властивості.

### 1.3.6 Виготовлення ламінованих виробів

Laminated Object Manufacturing (LOM) був одним із перших серед комерційно доступних методів адитивного виробництва. Його принцип базується на пошаровому різанні листів або рулонів різноманітних матеріалів та їх ламінуванню. Шари послідовно розрізаються, за допомогою механічних різців або лазерів. Після цього шари поєднуються «формуй, потім зв'язуй» і навпаки «зв'язуй, потім формуй» [50].

Перший метод корисний для термічного склеювання, в кераміці та металевих виробках, що полегшує внутрішню конструкцію шляхом видалення залишкового матеріалу. Залишки, слугують для підтримки зрештою розчиняючись у процесі обробки і потім можуть бути видалені або перероблені [69]. LOM охоплює широкий спектр матеріалів, від полімерних композитів до кераміки, паперу та металевих виробів. В залежності від виду матеріалу та бажаних властивостей може знадобитися додаткова обробка, наприклад обробка при високій температурі [50].

Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM), з'являється як відгалуження LOM. Він поєднує ультразвукове шовне зварювання металу та фрезерування з ЧПУ, у процесі ламінування [70]. UAM єдиний метод у адитивному виробництві де конструкції створюються під низькими температурами [50]. LOM використовується в еклектичній сфері, виробництві паперу, ливарному виробництві.

На відміну від звичайних методів, він може визначати порожнини всередині структур, на основі вбудованого комп'ютерного забезпечення, а також електронних пристроїв, датчиків та інших функцій. Електронні пристрої також можна друкувати у тому ж процесі ламінуванні UAM [69].

LOM може зменшити вартість інструменту та час виготовлення, також він один з методів який добре підходить для великих конструкцій. Однак і цей метод має певні недоліки: якість поверхні нижча (без подальшої обробки), точність розмірів низька у порівнянні з порошковими методами, також видалення зайвого матеріалу після ламінування займає багато часу відносно порошкових методів, а отже метод не рекомендується для складних форм.

## 2 ТЕХНІЧНЕ ТА МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

### 2.1 Характеристика принтеру

Для виготовлення зразків було використано принтер FDM компанії Profi+. Кінематика принтеру Prusa; Розмір столу – 260x260 мм; Висота – 180 мм; Максимальна температура столу – 120°C; Максимальна температура сопла – 265°C; Камера для друку без підігріву; Напруга столу – 220В; Напруга принтеру – 12В. Зовнішній вигляд принтера зображено на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Принтер Profi+

## 2.2 Досліджувальний матеріал

Для дослідження використовували матеріал: Plexiwire NYLON Filament  $\varnothing 1,75$  ISO1133-1:2011. Зовнішній вигляд матеріалу зображено на рис.2.2.

У галузі інженерії та промисловості нейлонові компоненти часто використовують у випадках, коли необхідна підвищена міцність та стійкість до зношування.

У таблицях 2.1 та 2.2 надані технічні та механічні характеристики нейлону.



Рисунок 2.2 - Матеріал Nylon [71]

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики нейлону

| Технічні характеристики |                    |                                               |                             |                  |
|-------------------------|--------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------|------------------|
| Діаметр<br>нитки,<br>мм | Овальніс<br>ть, мм | Лінійна маса,<br>м/кг (довжина<br>1кг 1,75мм) | Стійкість до<br>згину, рази | Технологія друку |
| 1,75 +/-<br>0,05        | +/-0,02            | 330-350                                       | -                           | FDM              |

Таблиця 2.2 – Механічні характеристики нейлону

| Механічні характеристики      |                     |                            |                                 |                                               |                                          |                               |                                                                               |                                             |
|-------------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Густина,<br>г/см <sup>3</sup> | Темп.<br>Експл., °С | Міцн. на<br>розтяг,<br>МПа | Відн. Вид.<br>при<br>розриві, % | Модуль<br>пружності<br>при<br>розтягу,<br>МПа | Модуль<br>пружності<br>при згині,<br>МПа | Міцність<br>при згині,<br>МПа | Ударна<br>в'язк. без<br>надрізу по<br>Шарпі (2<br>3°С),<br>кДж/м <sup>2</sup> | Водопогл.<br>инання, %<br>24год/23°<br>С, % |
| 1,20                          | -30 -<br>+120       | 78                         | 75                              | 2700                                          | 2600                                     | 70                            | -                                                                             | 3                                           |

### 2.3 Допоміжний матеріал

Як допоміжний матеріал використовували: MonoFilament ELASTAN D100 Ø1,75. Зовнішній вигляд матеріалу зображено на рис. 2.3.

Еластан менш вибагливий у порівнянні з Нейлоном. Він краще тримається на столі. При друці перший шар – це свого роду фундамент для початку роботи, якщо матеріал має поганий контакт зі столом, то це може призвести до різних дефектів при друці, що може вплинути на зовнішній вигляд друкованої моделі.



Рисунок 2.3 - Допоміжний матеріал Elastan [72]

## 2.4 Технологія отримання та геометричні параметри зразків

Для проектування 3D моделі використовувалась програма NX CAD 10, ескіз зразка надано на рис. 2.4

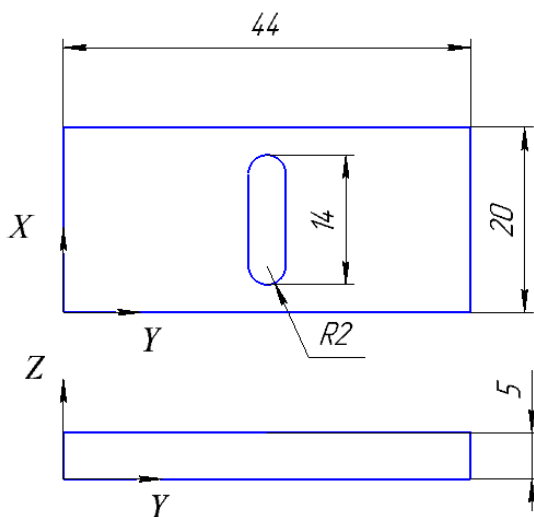


Рисунок 2.4 – Ескіз зразка

## 2.5 Генерування коду

Для нарізки деталі, генерування G-коду, та налаштування параметрів друку використовувалась програма Prusa-Slicer. Кінцевий вигляд майбутньої друкованої моделі у програмі має вигляд зображений на рис. 2.5.

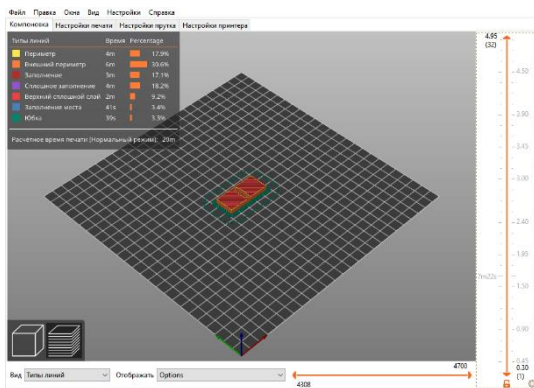


Рисунок 2.5 - Програма Prusa-Slicer

## 2.6 Пристрій для просушування

Так як Nylon швидко та активно вбирає вологу його треба зберігати у герметичних пакетах, але це не завжди допомагає, тому рекомендовано перед початком роботи з матеріалом его просушити. Просушування робили у електропечі «ЕЛЕКТРОТЕРМ» (рис.2.6) 220В з максимальною температурою 250°C. На сайті виробника «Plexiwire» [73] було рекомендовано просушувати матеріал при температурі 80°C впродовж трьох годин. В залежності від стану матеріалу (його вологості) цей час міг зменшуватись. Якщо матеріал ввіврав вологу то при друці він має характерний звук – потріскування, що впливало на стан друку. Матеріал міг відходити від столу через що якість та стан готових виробів мав поганий вид.



Рисунок 2.6 - Електропіч «ЕЛЕКТРОТЕРМ»

## 2.7 Пристрій для вимірювання шорсткості

Для визначення якості поверхневого шару зразків – використовували профілометр 171621 (рис.2.7). Шорсткість вимірювали в залежності від схеми заповнення зразку, через те що при друці утворювалось наплавлення матеріалу на зразках, було прийнято робити виміри уздовж лінії наплавлення ГОСТ 2789-73.



Рисунок 2.7 - Процес визначення шорсткості поверхні

## 2.8 Інструмент для розмірної точності

Перевірку розмірної точності зразків виконували за допомогою штангенциркулю електронного цифрового Digital Caliper (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 - Штангенциркуль електронний цифровий Digital Caliper [74]

## 2.9 Зразки

На рисунку 2.9 показано зовнішній вигляд зразків надрукованих на 3D принтері з різними параметрами друку.



Рисунок 2.9 - Зовнішній вигляд зразків отриманих на 3D принтері

## 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Параметри експериментального дослідження

Для економії часу та ресурсів був проведений дробовий факторний експеримент для вивчення впливу параметрів друку на шорсткість та розмірну точність зразків, виготовлених з інженерного філаменту NYLON. Методика дослідження відповідає теорії планування експерименту для дробових факторних експериментів типу  $2^{10-5}$ . У табл. 3.1 наведена матриця планування експерименту.

Таблиця 3.1 – Матриця планування дробового експерименту

| Standard Run | Design: 2**(10-5) design ([No active dataset]) |                       |                  |                       |                      |                       |                       |                         |                  |                                 |
|--------------|------------------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------|---------------------------------|
|              | Висота шару, мм                                | Швидкість друку, мм/с | Схема заповнення | Густина заповнення, % | Екструзійний множник | Температура екструзії | Температура платформи | Ширина уклад. нитки, мм | Кількість стінок | Кількість суц. нижніх і верхніх |
| 1            | 2                                              | 3                     | 4                | 5                     | 6                    | 7                     | 8                     | 9                       | 10               | 11                              |
| 14           | 0,3                                            | 40                    | концентріч.      | 100                   | 0,9                  | 255                   | 120                   | 0,52                    | 2                | 4                               |
| 24           | 0,3                                            | 80                    | концентріч.      | 25                    | 1,1                  | 255                   | 120                   | 0,49                    | 2                | 2                               |
| 23           | 0,15                                           | 80                    | концентріч.      | 25                    | 1,1                  | 265                   | 100                   | 0,52                    | 4                | 2                               |
| 2            | 0,3                                            | 40                    | прямоліній.      | 25                    | 0,9                  | 255                   | 100                   | 0,49                    | 2                | 4                               |
| 31           | 0,15                                           | 80                    | концентріч.      | 100                   | 1,1                  | 255                   | 100                   | 0,49                    | 2                | 4                               |
| 3            | 0,15                                           | 80                    | прямоліній.      | 25                    | 0,9                  | 255                   | 100                   | 0,49                    | 4                | 2                               |
| 26           | 0,3                                            | 40                    | прямоліній.      | 100                   | 1,1                  | 265                   | 120                   | 0,49                    | 2                | 4                               |
| 29           | 0,15                                           | 40                    | концентріч.      | 100                   | 1,1                  | 265                   | 120                   | 0,52                    | 2                | 2                               |
| 15           | 0,15                                           | 80                    | концентріч.      | 100                   | 0,9                  | 255                   | 120                   | 0,52                    | 4                | 2                               |
| 4            | 0,3                                            | 80                    | прямоліній.      | 25                    | 0,9                  | 265                   | 120                   | 0,52                    | 2                | 2                               |
| 25           | 0,15                                           | 40                    | прямоліній.      | 100                   | 1,1                  | 255                   | 100                   | 0,52                    | 4                | 4                               |

## Продовження таблиці 3.1

| 1  | 2    | 3  | 4               | 5   | 6   | 7   | 8   | 9    | 10 | 11 |
|----|------|----|-----------------|-----|-----|-----|-----|------|----|----|
| 30 | 0,3  | 40 | концент<br>річ. | 100 | 1,1 | 255 | 100 | 0,49 | 4  | 2  |
| 19 | 0,15 | 80 | прямоли<br>йн.  | 25  | 1,1 | 255 | 120 | 0,52 | 2  | 4  |
| 18 | 0,3  | 40 | прямоли<br>йн.  | 25  | 1,1 | 255 | 120 | 0,52 | 4  | 2  |
| 2  | 0,15 | 80 | прямоли<br>йн.  | 100 | 1,1 | 265 | 120 | 0,49 | 4  | 2  |
| 12 | 0,3  | 80 | прямоли<br>йн.  | 100 | 0,9 | 255 | 120 | 0,49 | 4  | 4  |
| 1  | 0,15 | 40 | прямоли<br>йн.  | 25  | 0,9 | 265 | 120 | 0,52 | 4  | 4  |
| 9  | 0,15 | 40 | прямоли<br>йн.  | 100 | 0,9 | 255 | 120 | 0,49 | 2  | 2  |
| 32 | 0,3  | 80 | концент<br>річ. | 100 | 1,1 | 265 | 120 | 0,52 | 4  | 4  |
| 20 | 0,3  | 80 | прямоли<br>йн.  | 25  | 1,1 | 265 | 100 | 0,49 | 4  | 4  |
| 5  | 0,15 | 40 | концент<br>річ. | 25  | 0,9 | 255 | 100 | 0,52 | 2  | 2  |
| 17 | 0,15 | 40 | прямоли<br>йн.  | 25  | 1,1 | 265 | 100 | 0,49 | 2  | 2  |
| 21 | 0,15 | 40 | концент<br>річ. | 25  | 1,1 | 255 | 120 | 0,49 | 4  | 4  |
| 11 | 0,15 | 80 | прямоли<br>йн.  | 100 | 0,9 | 265 | 100 | 0,52 | 2  | 4  |
| 8  | 0,3  | 80 | концент<br>річ. | 25  | 0,9 | 255 | 100 | 0,52 | 4  | 4  |
| 6  | 0,3  | 40 | концент<br>річ. | 25  | 0,9 | 265 | 120 | 0,49 | 4  | 2  |
| 16 | 0,3  | 80 | концент<br>річ. | 100 | 0,9 | 265 | 100 | 0,49 | 2  | 2  |
| 7  | 0,15 | 80 | концент<br>річ. | 25  | 0,9 | 265 | 120 | 0,49 | 2  | 4  |

## 3.2 Вплив параметрів друку на шорсткість поверхні

Результати дослідження впливу режимних параметрів процесу FDM на геометричну точність та якість поверхні надано у додатку А. Статистична обробка

експериментальних даних, виконана на основі дисперсійного аналізу та аналізу діаграм Паретто дозволила встановити найбільш статистично значимі фактори які мають вплив на геометричну точність. Результати дисперсійного аналізу та діаграми Паретто які показують значимість режимних параметрів на формування шорсткості поверхневого шару показано на рисунках 3.1, 3.2.

| Factor                   | SS       | df | MS       | F        | p        |
|--------------------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (3)Схема заповнення      | 36,5479  | 1  | 36,54788 | 23,96017 | 0,000137 |
| (4)Густина заповнення, % | 40,6728  | 1  | 40,67281 | 26,66441 | 0,000078 |
| (5)Екструзійний множник  | 31,4264  | 1  | 31,42643 | 20,60264 | 0,000290 |
| (6)Температура екструзії | 28,6143  | 1  | 28,61432 | 18,75907 | 0,000454 |
| 1 by 2                   | 17,6692  | 1  | 17,66923 | 11,58365 | 0,003382 |
| 1 by 4                   | 47,5894  | 1  | 47,58942 | 31,19882 | 0,000033 |
| 1 by 5                   | 11,9574  | 1  | 11,95742 | 7,83908  | 0,012310 |
| 1 by 10                  | 10,2383  | 1  | 10,23827 | 6,71204  | 0,019040 |
| 2 by 7                   | 67,7301  | 1  | 67,73006 | 44,40269 | 0,000004 |
| 5 by 9                   | 10,7019  | 1  | 10,70190 | 7,01599  | 0,016884 |
| Error                    | 25,9311  | 17 | 1,52536  |          |          |
| Total SS                 | 244,9531 | 27 |          |          |          |

Рисунок 3.1 – Дисперсійний аналіз впливу режимних параметрів FDM на формування шорсткості поверхні зразків

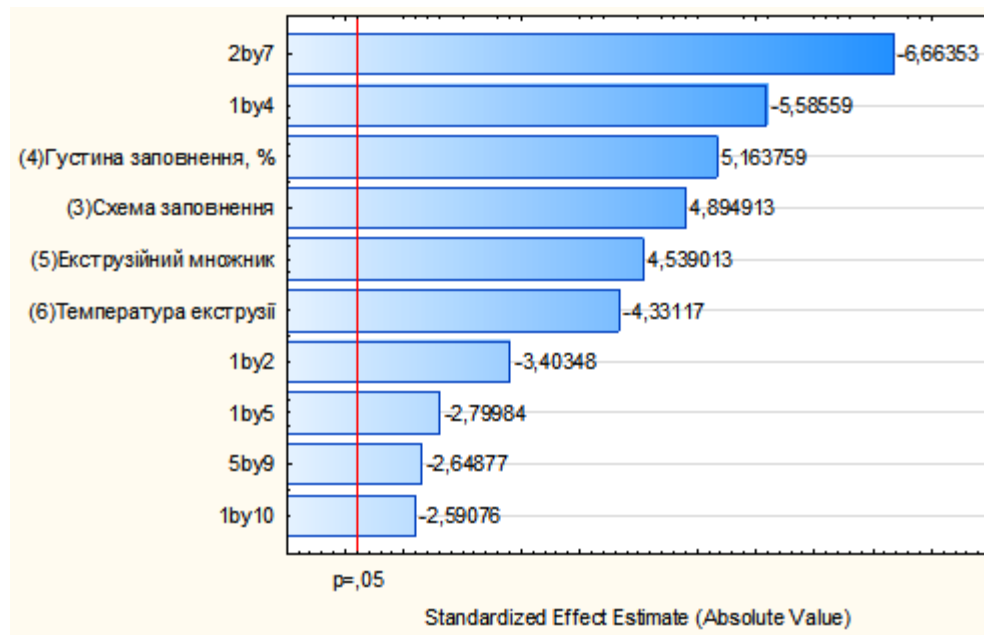


Рисунок 3.2 – Вплив параметрів на шорсткість поверхонь

За даними дисперсійного аналізу та діаграмами Паретто (рис. 3.1, 3.2) встановлено, що на шорсткість поверхні статистично значимий вплив має взаємодія

таких параметрів «2by7» (швидкість друку та температура платформи). «1by5» (висота шару та екструзійний множник), «5by9» (екструзійний множник та кількість стінок) та «1by10» (висота шару та кількість суцільних стінок) мають менше значення для різних цільових функцій. Слід відмітити, що для досягнення максимальної ефективності процесу FDM необхідно застосовувати поєднання декількох режимних параметрів. І мають сенс знаходження раціонального поєднання тільки всіх значимих режимних параметрів, дослідження окремих параметрів при нехтуванні іншими не мають сенсу. Статистична обробка даних виконується на основі заданої математичної моделі, оцінка її якості виконується побудовою графіку передбачуваних та спостережуваних значень для функції відгуку (рис. 3.3.).

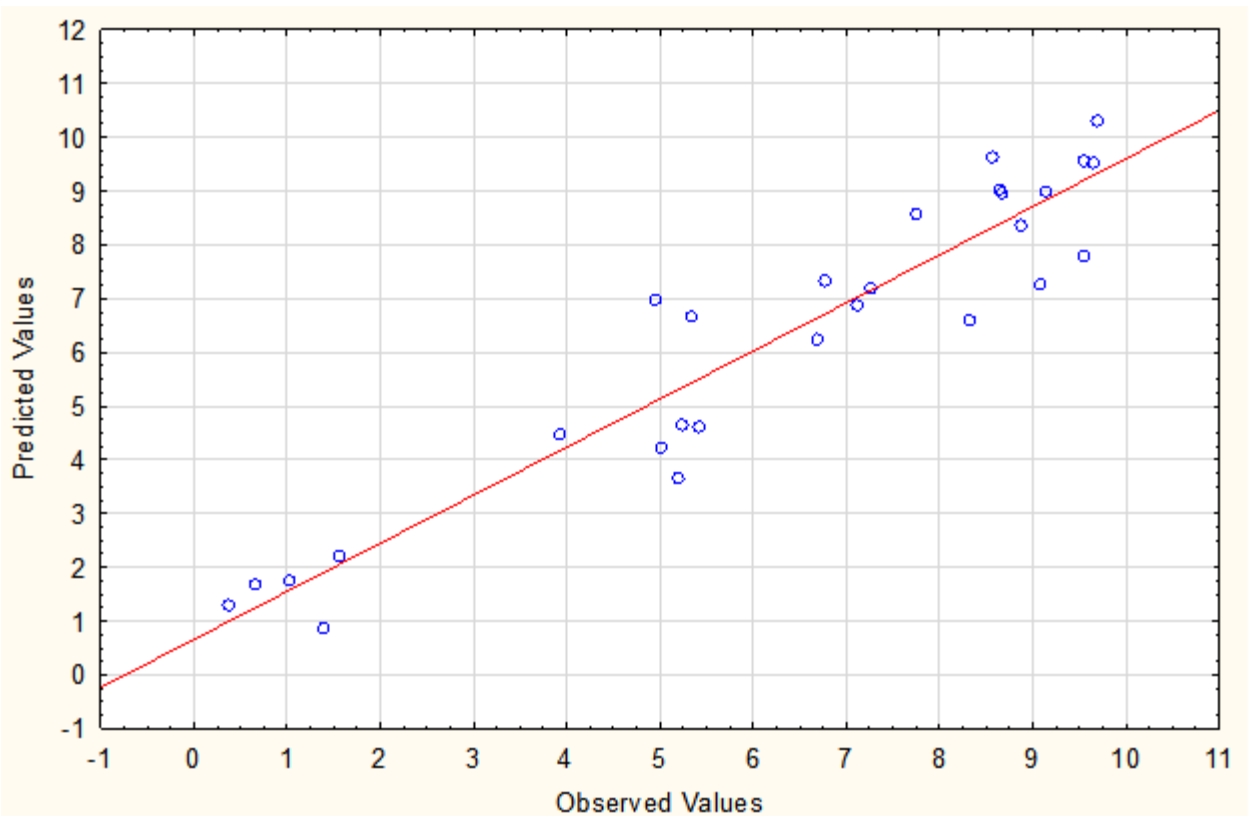


Рисунок 3.3 - Спостережені та передбачені значення

Оскільки точки на графіку розташовуються поряд з червоною лінією, то можна зробити висновок щодо використаної моделі з точки зору статистичної

обробки вірно описує вплив досліджуваних факторів на функцію відгуку та її можна використовувати для прогнозування впливу параметрів друку на шорсткість моделі з синтетичного поліаміду, отриманих FDM.

На основі даних експериментальних досліджень та їх статистичної обробки побудована графічні залежності, які показують вплив режимних параметрів FDM на формування шорсткості у поверхневому шарі (рис. 3.4 – 3.13).

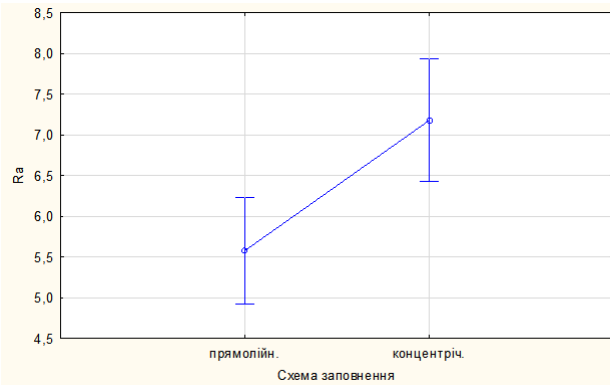


Рисунок 3.4 – Залежність шорсткості від схеми заповнення

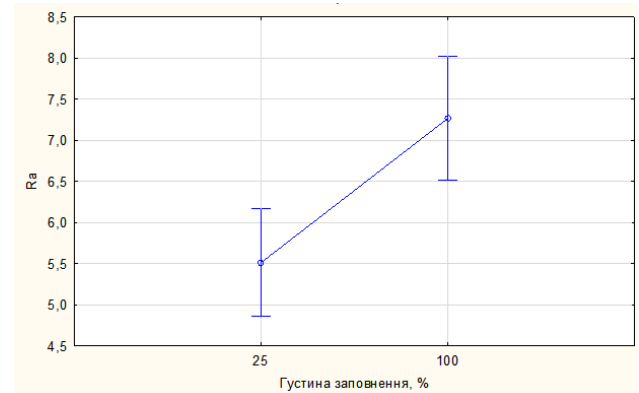


Рисунок 3.5 – Залежність шорсткості від густини заповнення

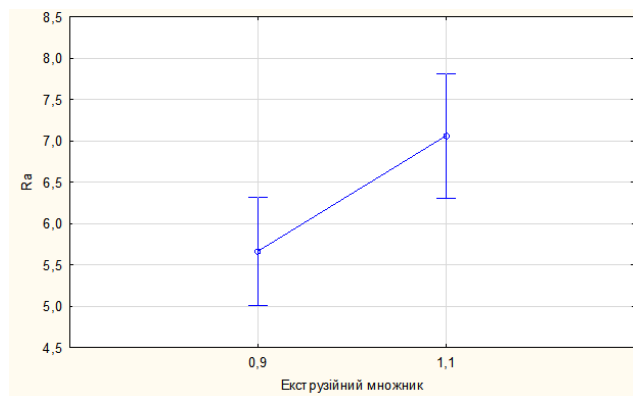


Рисунок 3.6 – Залежність шорсткості від екструзійного множника

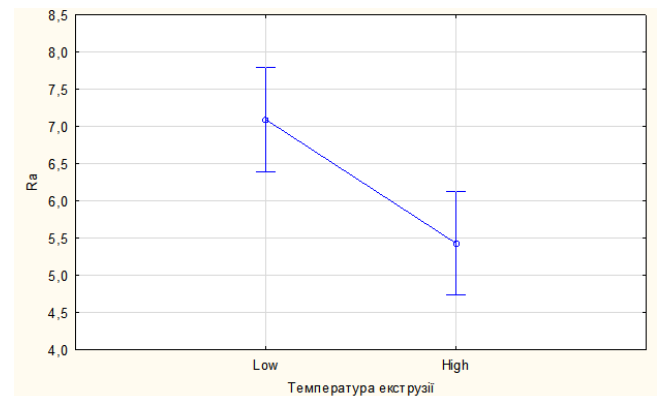


Рисунок 3.7 – Залежність шорсткості від температури екструзії

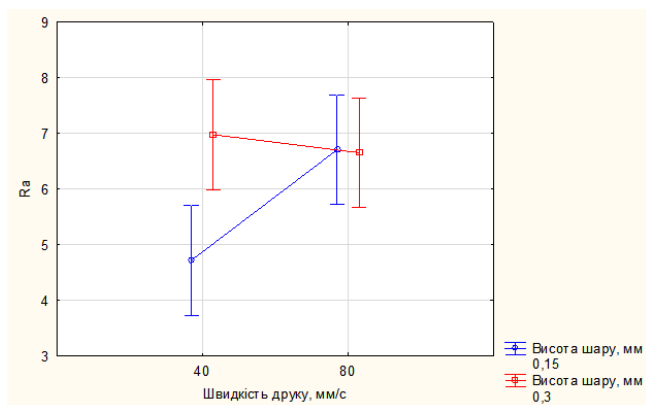


Рисунок 3.8 – Залежність шорсткості від швидкості друку та висоти шару

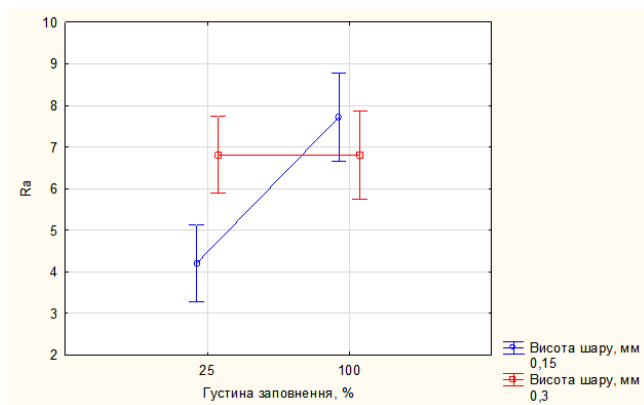


Рисунок 3.9 – Залежність шорсткості від густини заповнення та висоти шару

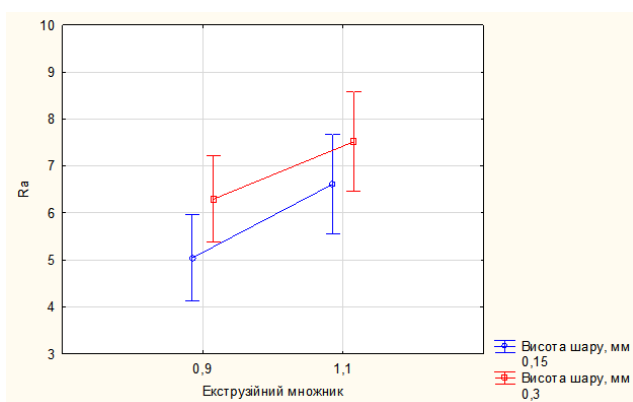


Рисунок 3.10 – Залежність шорсткості від екструзійного множника та висоти шару

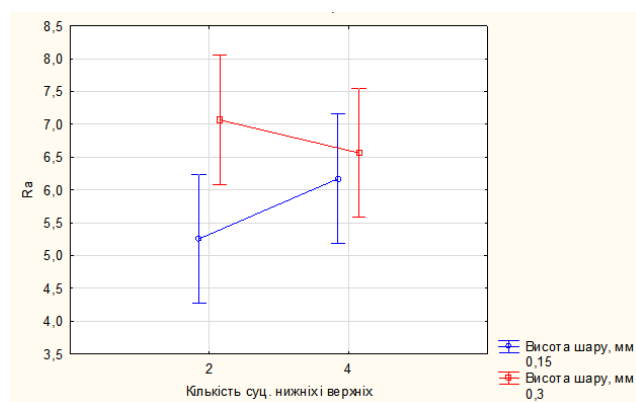


Рисунок 3.11 – Залежність шорсткості від кількості суц. нижніх і верхніх стінок та висоти шару

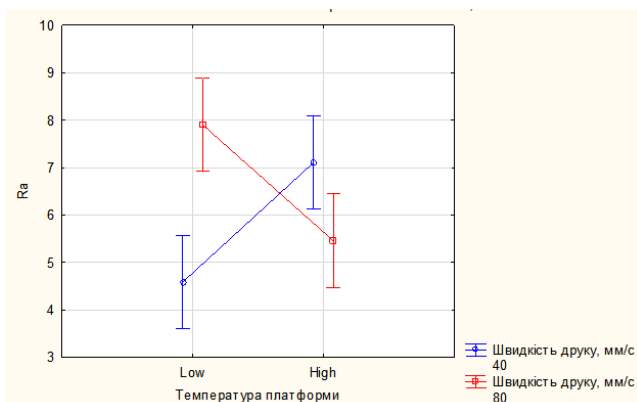


Рисунок 3.12 – Залежність шорсткості від темп. платформи та швидкості друку

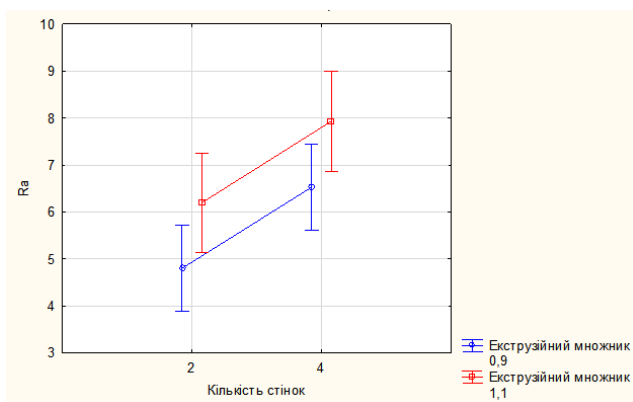


Рисунок 3.13 – Залежність шорсткості від кількості стінок та екструзійного множника

Аналіз графічних залежностей які показано на рисунках 3.4 – 3.13 показує різний вплив режимних параметрів на шорсткість для різних рівнів варіювання. До зменшення шорсткості призводить прямолінійна схема заповнення, менший екструзійний множник, вища температура екструзії, менша густина заповнення, та мала кількість суцільних стінок. Висота шару та швидкість друку мають неоднозначний вплив на шорсткість.

### 3.3. Вплив параметрів друку на розмірну точність

Для розширення сфери застосування процесу FDM при виробництві відповідальних деталей функціональних виробів визначальний вплив має геометрична точність розмірів, які можна отримати на 3D принтері. Вплив режимних параметрів друку на розмірну точність встановлювали порівнянням реального розміру з номінальним після друку.

#### 3.3.1 Вплив параметрів друку на точність довжини зразка

Дисперсійний аналіз дозволив встановити статистично значимі фактори, які мають вирішальний вплив на точність отримання розмірів при друку. Результати дисперсійного аналізу показано на рисунку 3.14.

| Factor                   | SS       | df | MS       | F        | p        |
|--------------------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (2)Швидкість друку, мм/с | 0,158203 | 1  | 0,158203 | 78,1422  | 0,000000 |
| (3)Схема заповнення      | 0,044253 | 1  | 0,044253 | 21,8582  | 0,000358 |
| (4)Густина заповнення, % | 0,158203 | 1  | 0,158203 | 78,1422  | 0,000000 |
| (5)Екструзійний множник  | 0,322003 | 1  | 0,322003 | 159,0490 | 0,000000 |
| (6)Температура екструзії | 0,014028 | 1  | 0,014028 | 6,9290   | 0,019698 |
| (7)Температура платформи | 0,016653 | 1  | 0,016653 | 8,2256   | 0,012401 |
| (9)Кількість стінок      | 0,085078 | 1  | 0,085078 | 42,0232  | 0,000014 |
| 1 by 2                   | 0,100128 | 1  | 0,100128 | 49,4569  | 0,000006 |
| 1 by 3                   | 0,025878 | 1  | 0,025878 | 12,7821  | 0,003045 |
| 1 by 4                   | 0,019503 | 1  | 0,019503 | 9,6333   | 0,007774 |
| 1 by 5                   | 0,018528 | 1  | 0,018528 | 9,1517   | 0,009086 |
| 1 by 8                   | 0,021528 | 1  | 0,021528 | 10,6335  | 0,005688 |
| 1 by 9                   | 0,011628 | 1  | 0,011628 | 5,7436   | 0,031072 |
| 2 by 4                   | 0,073153 | 1  | 0,073153 | 36,1330  | 0,000032 |
| 2 by 5                   | 0,014028 | 1  | 0,014028 | 6,9290   | 0,019698 |
| 3 by 6                   | 0,050403 | 1  | 0,050403 | 24,8959  | 0,000198 |
| 4 by 5                   | 0,239778 | 1  | 0,239778 | 118,4351 | 0,000000 |
| Error                    | 0,028344 | 14 | 0,002025 |          |          |
| Total SS                 | 1,401322 | 31 |          |          |          |

Рисунок 3.14 - Дисперсійний аналіз впливу режимних параметрів 3D друку на розмірну точність

З точки зору візуалізації краще вплив факторів показує діаграма Паретто, результати аналізу показані на рисунку 3.15.

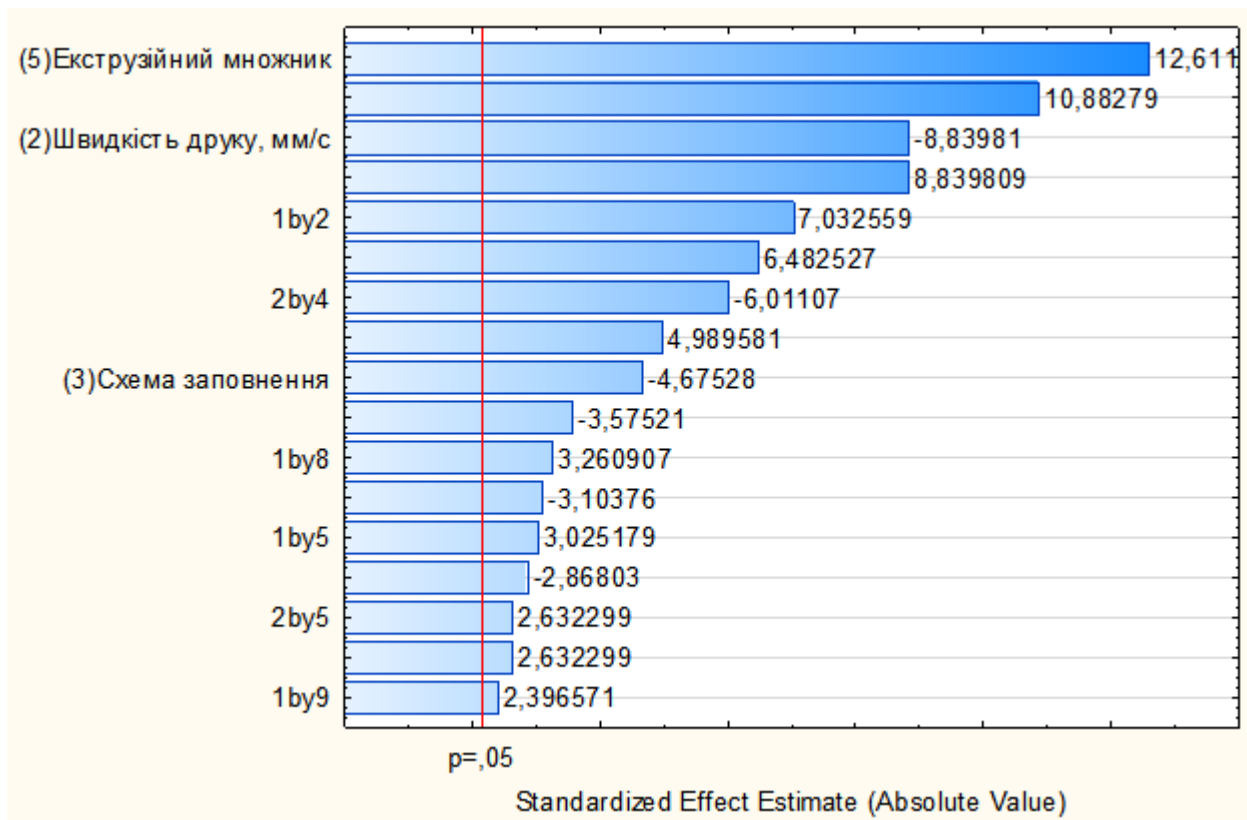


Рисунок 3.15 - Вплив параметрів друку на розмірну точність довжини

За діаграмами Паретто (рис. 3.15) встановлено, що на розмірну точність найбільший статистично значимий вплив має екструзійний множник. «2by5», «1by9» мають різне значення для різних цільових функцій.

Наскільки добре обрана статистична модель описує встановлені залежності визначали за допомогою графіку передбачуваних та спостережуваних значень (рис. 3.16).

Оскільки точки на графіках розташовуються поряд з червоною лінією, то було зроблено висновок, що моделі якісні і їх можна використовувати для прогнозування впливу параметрів друку на розмірну точність моделі з синтетичного поліаміду, отриманих технологією пошарового наплавлення.

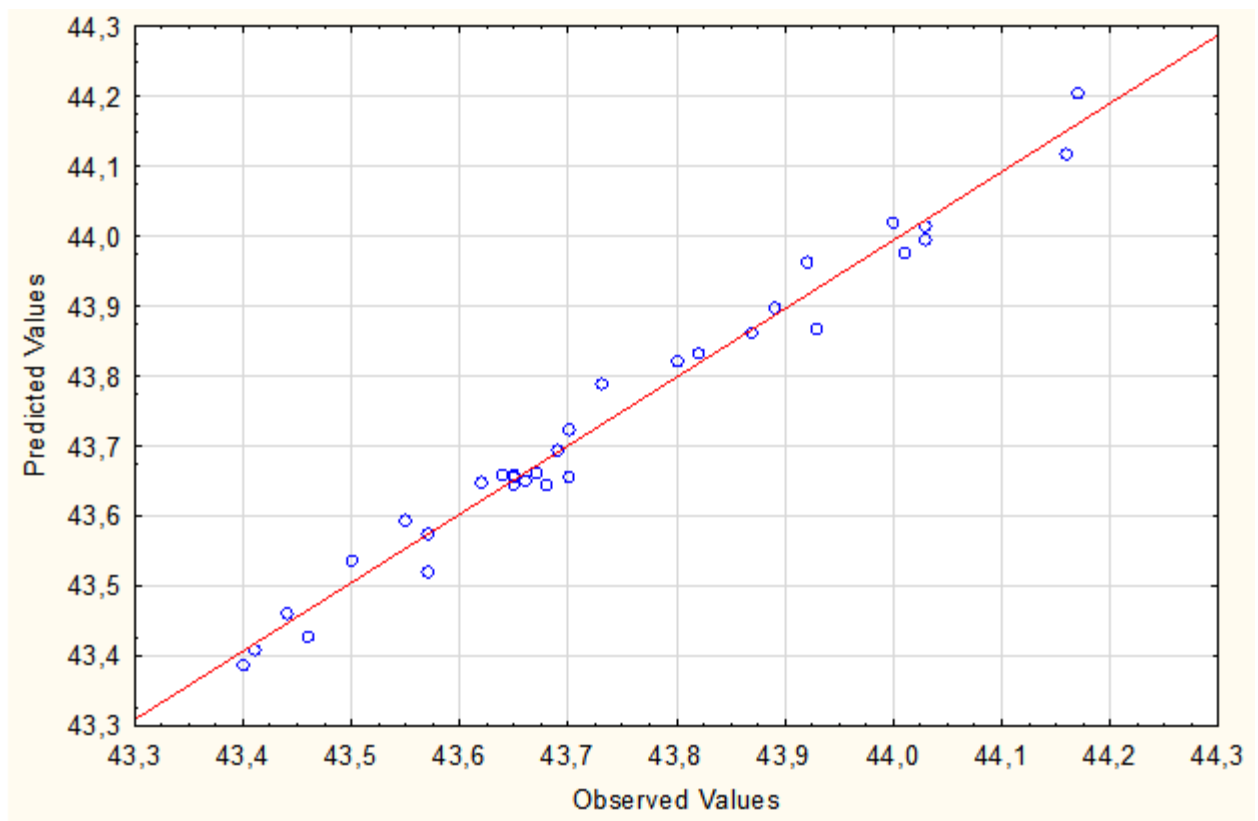


Рисунок 3.16 - Спостережені та передбачені значення

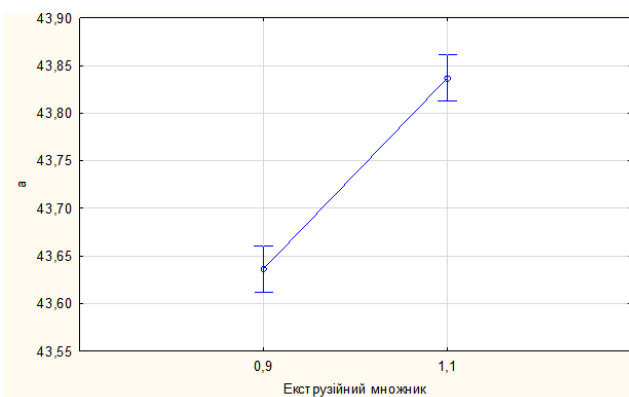


Рисунок 3.17 - Залежність розмірної точності від екструзійного множника

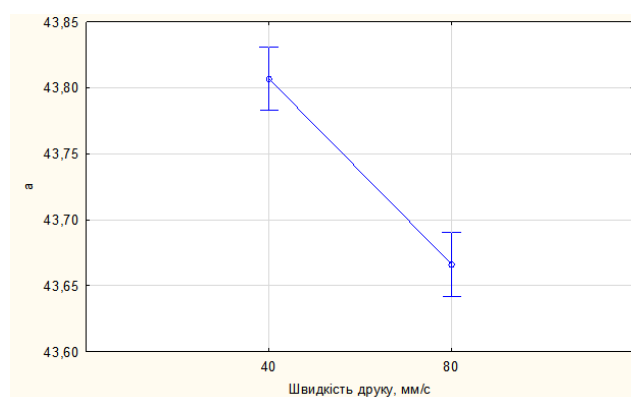


Рисунок 3.18 - Залежність розмірної точності від швидкості друку

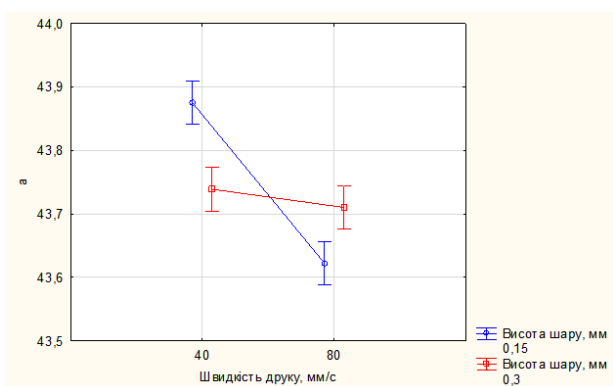


Рисунок 3.19 - Залежність розмірної точності від швидкості друку та висоти шару

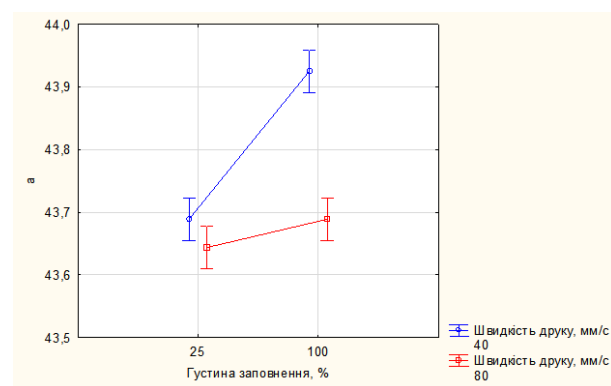


Рисунок 3.20 - Залежність розмірної точності від густини заповнення та швидкості друку

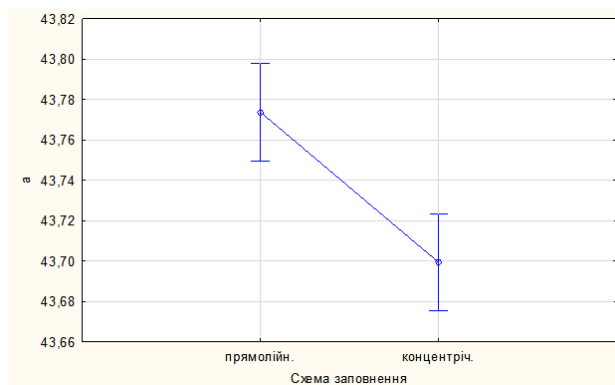


Рисунок 3.21 - Залежність розмірної точності від схеми заповнення

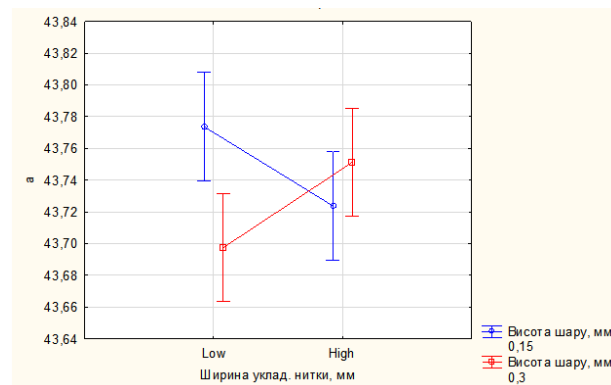


Рисунок 3.22 - Залежність розмірної точності від ширини укладки нитки та висоти шару

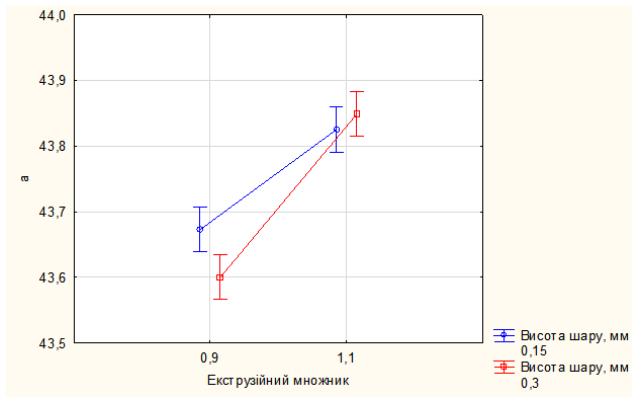


Рисунок 3.23 - Залежність розмірної точності від екструзійного множника та висоти шару

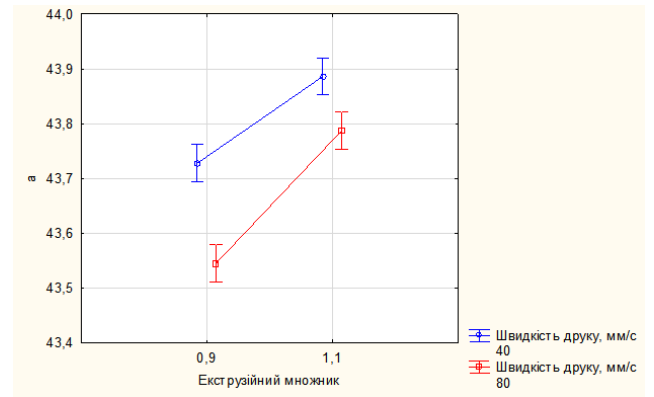


Рисунок 3.24 - Залежність розмірної точності від екструзійного множника та швидкості друку

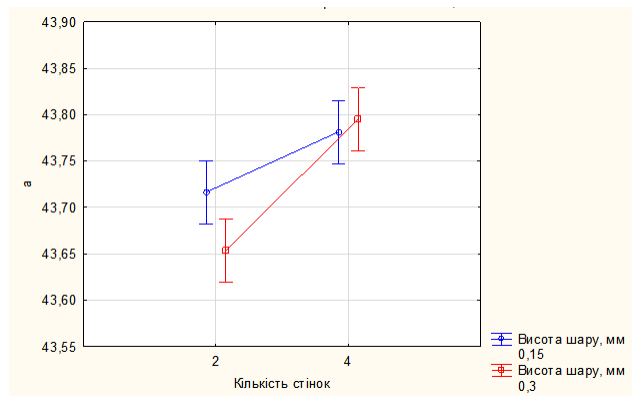


Рисунок 3.25 - Залежність розмірної точності від кількості стінок та висоти шару

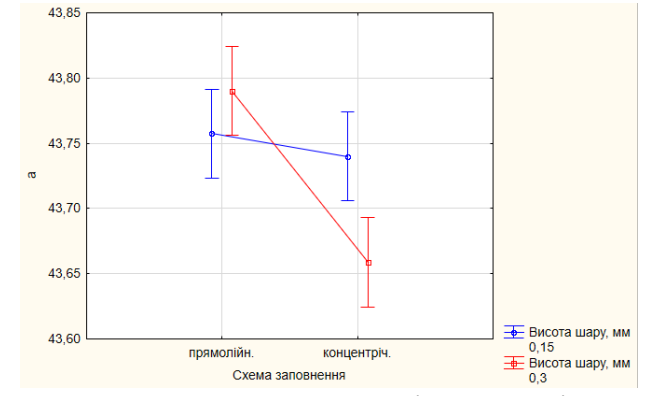


Рисунок 3.26 - Залежність розмірної точності від схеми заповнення та висоти шару

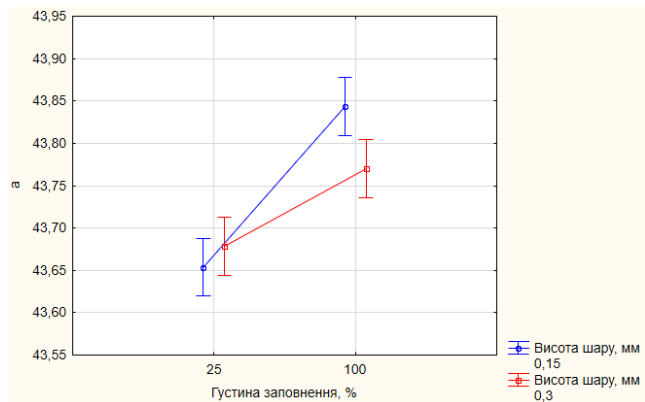


Рисунок 3.27 - Залежність розмірної точності від густини заповнення та висоти шару

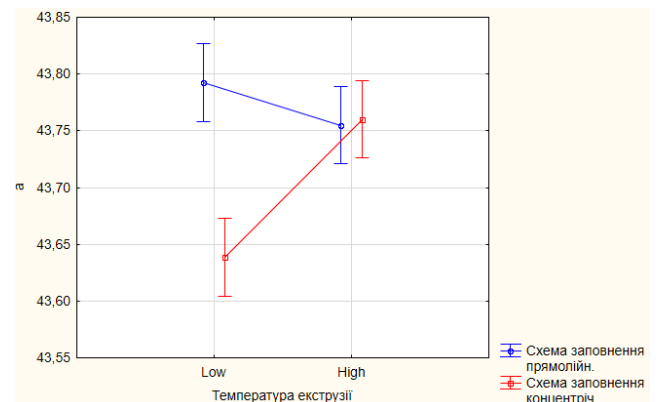


Рисунок 3.28 - Залежність розмірної точності від температури екструзії та схеми заповнення

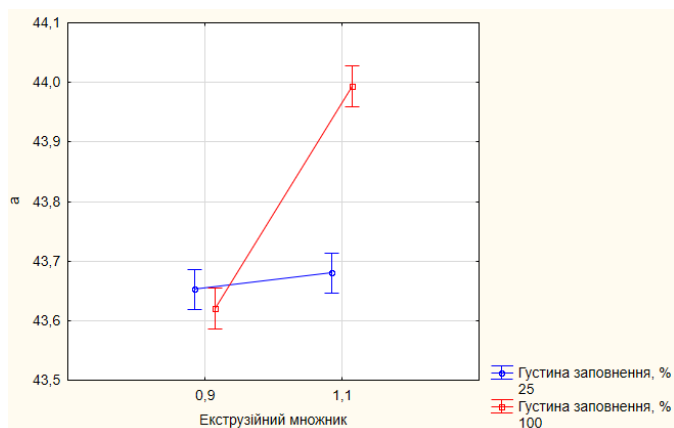


Рисунок 3.29 – Залежність розмірної точності від екструзійного множника та густини заповнення

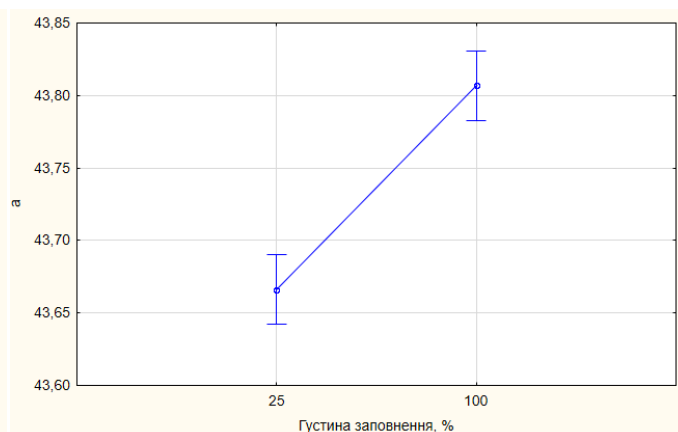


Рисунок 3.30 – Залежність розмірної точності від густини заповнення

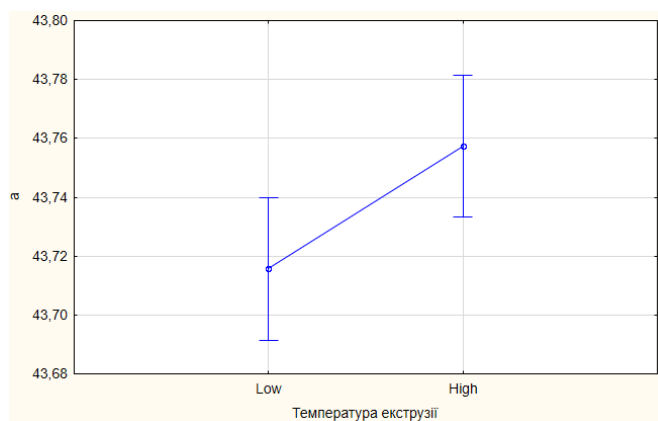


Рисунок 3.31 – Залежність розмірної точності від температури екструзії

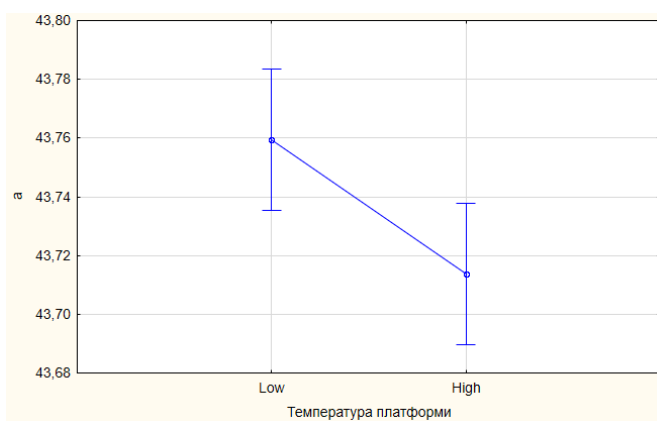


Рисунок 3.32 – Залежність розмірної точності від температури платформи

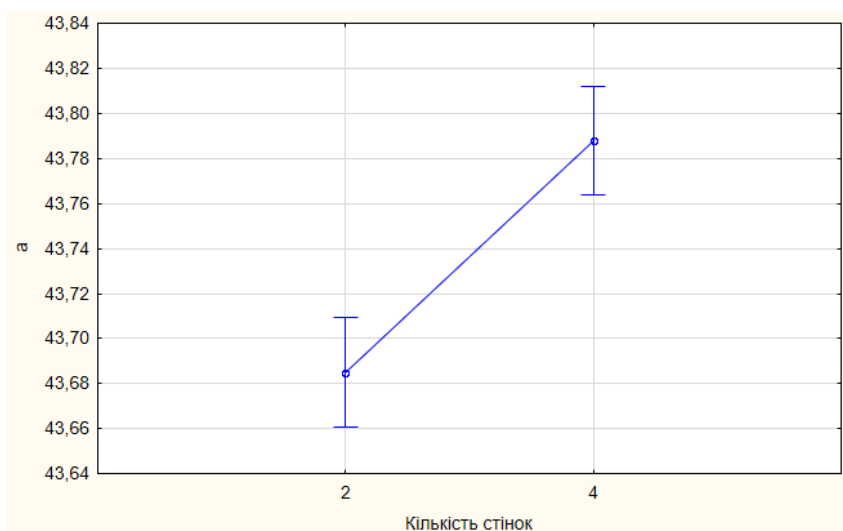


Рисунок 3.33 – Залежність розмірної точності від кількості стінок

Для досягнення розмірної точності (рис. 3.17) параметр екструзійного множника повинен бути 1,1, а швидкість друку повинна бути 40 мм/с (рис. 3.18), залежність цих двох параметрів можна побачити на рис. 3.24, також найбільш точний розмір було отримано. На рис. 3.19 ми бачимо що при висоті шару 0,15 мм отриманий розмір буде більш наближений до бажаного, а на рис. 3.22 бачимо залежність висоти шару та ширини укладки нитки, та на рис 3.27 залежність висоти шару і густини заповнення, також можемо поглянути на рис. 3.20 залежність швидкості друку та густини заповнення, тому можемо зробити висновок що при ширини укладки нитки 0,49 та густині заповнення 100% ми зможемо отримати найбільш точний розмір. На рис. 3.21 можемо побачити що більш задовільна схема заповнення – прямолінійна, а висота шару 0,3 мм (рис.3.26). На рис. 3.23 та рис. 3.25 можна побачити залежність розміру від висоти шару та екструзійного множника, чи залежність висоти шару та кількості стінок на отримання бажаного розміру, і таким чином зробити висновок що при кількості стінок 4 буде отримано найбільш точний розмір. При температурі екструзії 265°C (рис.3.31) та температурі платформи 100°C (рис. 3.32) точність розміру був найбільш точним, на рис. 3.28 можемо побачити вплив температури екструзії та схеми заповнення на розмірну точність.

### 3.3.2 Вплив параметрів друку на точність ширини зразка

Дисперсійний аналіз дозволив встановити статистично значимі фактори, які мають вирішальний вплив на точність ширини отриманої при друку. Результати дисперсійного аналізу надано на рисунку 3.34.

| Factor                   | SS       | df | MS       | F        | p        |
|--------------------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (2)Швидкість друку, мм/с | 0,085078 | 1  | 0,085078 | 5,58462  | 0,026561 |
| (4)Густина заповнення, % | 0,298378 | 1  | 0,298378 | 19,58585 | 0,000179 |
| (5)Екструзійний множник  | 1,076778 | 1  | 1,076778 | 70,68082 | 0,000000 |
| 1 by 4                   | 0,121278 | 1  | 0,121278 | 7,96082  | 0,009445 |
| 2 by 4                   | 0,275653 | 1  | 0,275653 | 18,09415 | 0,000277 |
| 3 by 4                   | 0,065703 | 1  | 0,065703 | 4,31282  | 0,048701 |
| 4 by 5                   | 0,294528 | 1  | 0,294528 | 19,33313 | 0,000193 |
| Error                    | 0,365625 | 24 | 0,015234 |          |          |
| Total SS                 | 2,583022 | 31 |          |          |          |

Рисунок 3.34 - Дисперсійний аналіз впливу режимних параметрів 3D друку на розмірну точність ширини зразка

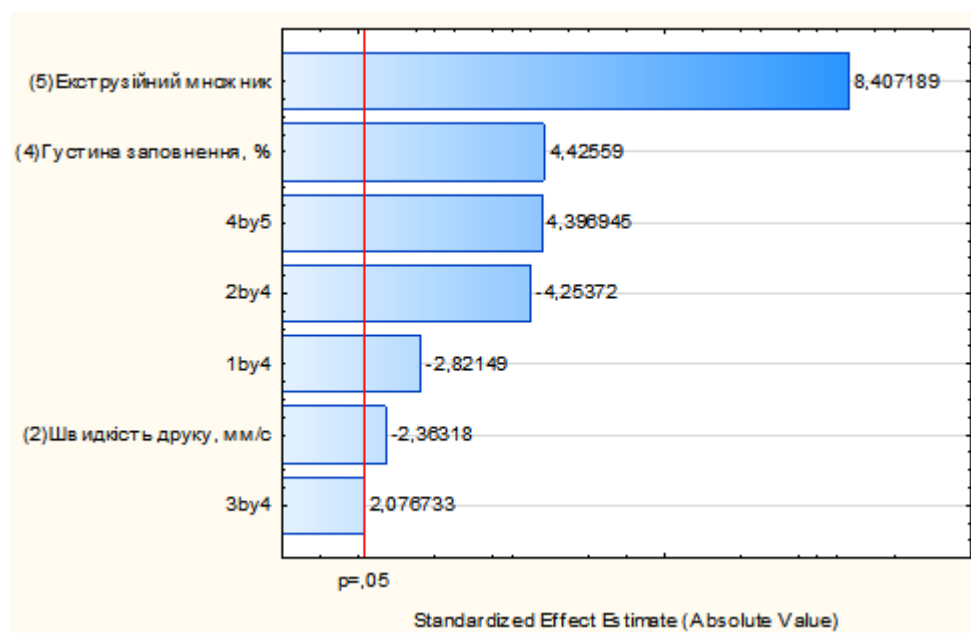


Рисунок 3.35 – Вплив параметрів друку на розмірну точність поверхні ширини зразку

За діаграмами Паретто (рис. 3.35) встановлено, що на розмірну точність ширини зразків найбільший статистично значимий вплив має екструзійний множник.

Наскільки добре обрана статистична модель описує встановлені залежності визначали за допомогою графіку передбачуваних та спостережуваних значень (рис. 3.36).

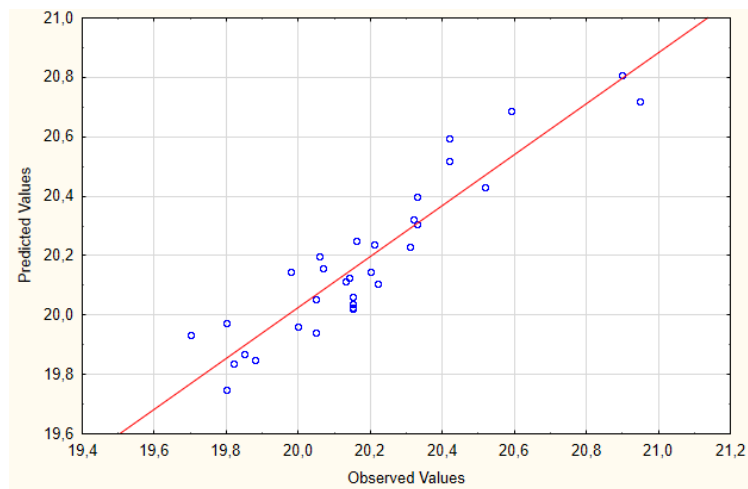


Рисунок 3.36 - Спостережені та передбачені значення

Більшість точок на графіку розташовані біля червоної лінії, тому зробивши висновок що моделі можна використовувати для прогнозування впливу параметрів друку на розмірну точність моделі.

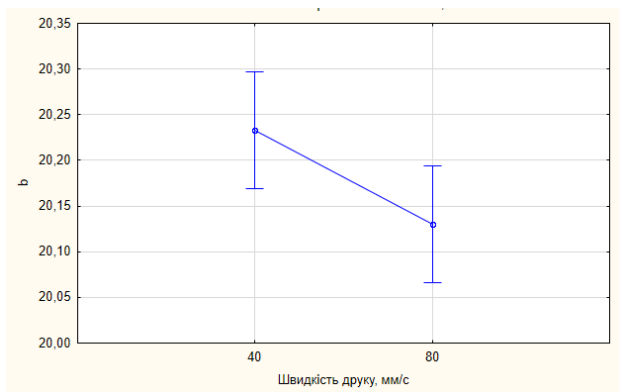


Рисунок 3.37 - Залежність розмірної точності від швидкості друку

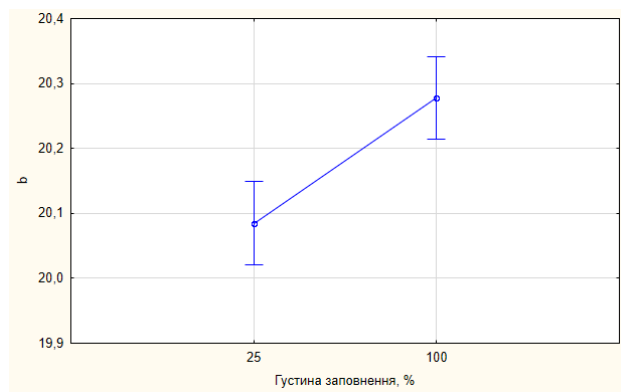


Рисунок 3.38 – Залежність розмірної точності від густини заповнення

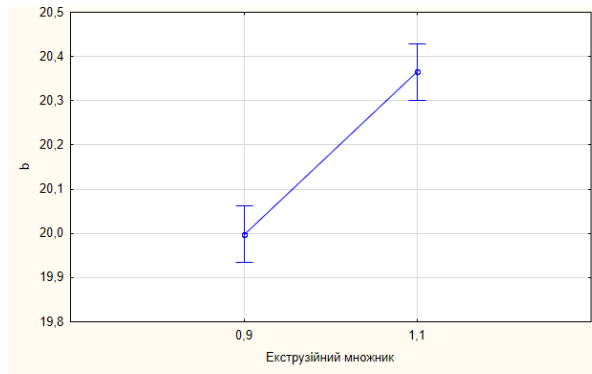


Рисунок 3.39 – Залежність розмірної точності від екструзійного множника

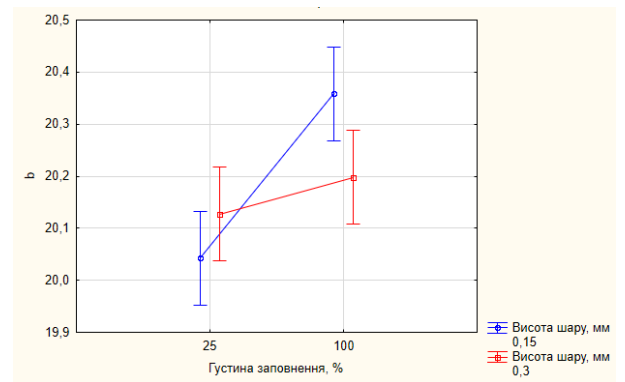


Рисунок 3.40 – Залежність розмірної точності від густини заповнення та висоти шару

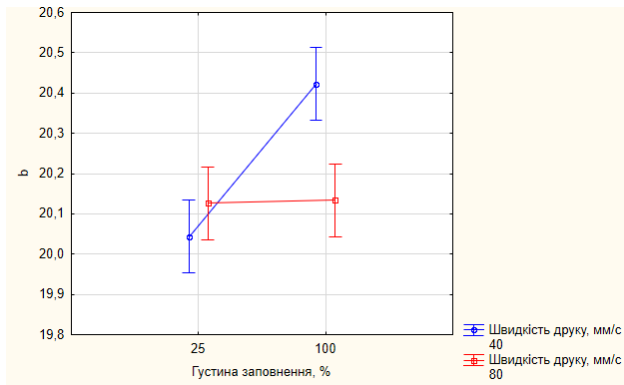


Рисунок 3.41 – Залежність розмірної точності від густини заповнення та швидкості друку

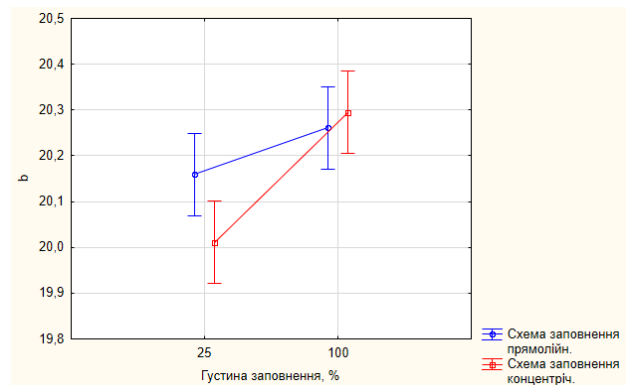


Рисунок 3.42 – Залежність розмірної точності від густини та схеми заповнення

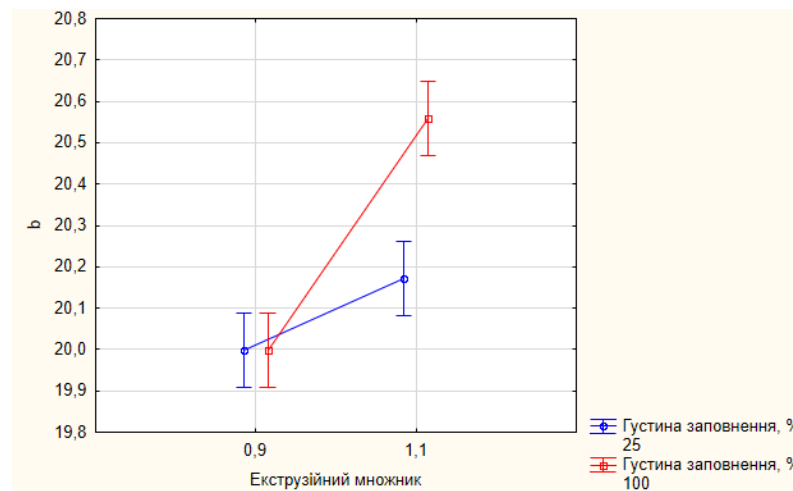


Рисунок 3.43 – Залежність розмірної точності від екструзійного множника та густини заповнення

Виходячи з графіків (рис. 3.37-3.43) можна зробити висновки що впливає на розмірну точність ширини зразків. Швидкість друку, чим більше тим точніший розмір. При густини заповнення 25% вихідний розмір буде найбільш приближений до заданого. При нижчому параметру екструзійного множника зразки мали точніший розмір. Залежність густини та висоти шару говорить про те що заповнення у 25% і при низькій висоті шару має більш приближені до бажаного розміру, а ось залежність густини та швидкості друку показує що при швидкості друку 80 мм/с різниці від густини заповнення майже немає. Що до схеми заповнення то концентрична більш краща за прямолінійну. Густина заповнення при екструзійному множнику 0,9 немає різниці.

### 3.3.3 Вплив параметрів друку на точність висоти зразка

У цьому розділі розглянемо як параметри друку впливають на точність висоти зразків. За допомогою дисперсійного аналізу встановлюємо статистично значимі фактори що впливають на заданий розмір надано на рис. 3.44.

| Factor                   | SS       | df | MS       | F        | p        |
|--------------------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (1)Висота шару, мм       | 0,312050 | 1  | 0,312050 | 42,0215  | 0,000001 |
| (4)Густина заповнення, % | 0,300313 | 1  | 0,300313 | 40,4409  | 0,000001 |
| (5)Екструзійний множник  | 0,775013 | 1  | 0,775013 | 104,3653 | 0,000000 |
| 3 by 7                   | 0,042050 | 1  | 0,042050 | 5,6626   | 0,024954 |
| 4 by 5                   | 0,198450 | 1  | 0,198450 | 26,7238  | 0,000021 |
| Error                    | 0,193075 | 26 | 0,007426 |          |          |
| Total SS                 | 1,820950 | 31 |          |          |          |

Рисунок 3.44 – Дисперсійний аналіз впливу режимних параметрів 3D друку на розмірну точність

Наглядно діаграма Паретто показує (рис. 3.45) які параметри мають вплив більше за інших

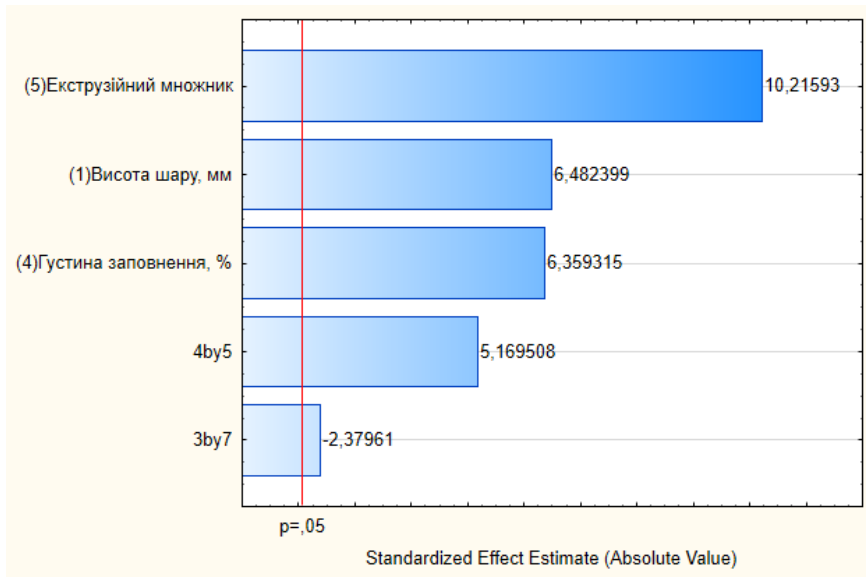


Рисунок 3.45 - Вплив параметрів друку на розмірну точність поверхні

Отже, екструзійний множник має вплив на точність більш за все, трохи менше за нього але не малозначимі є висота шару та густина заповнення.

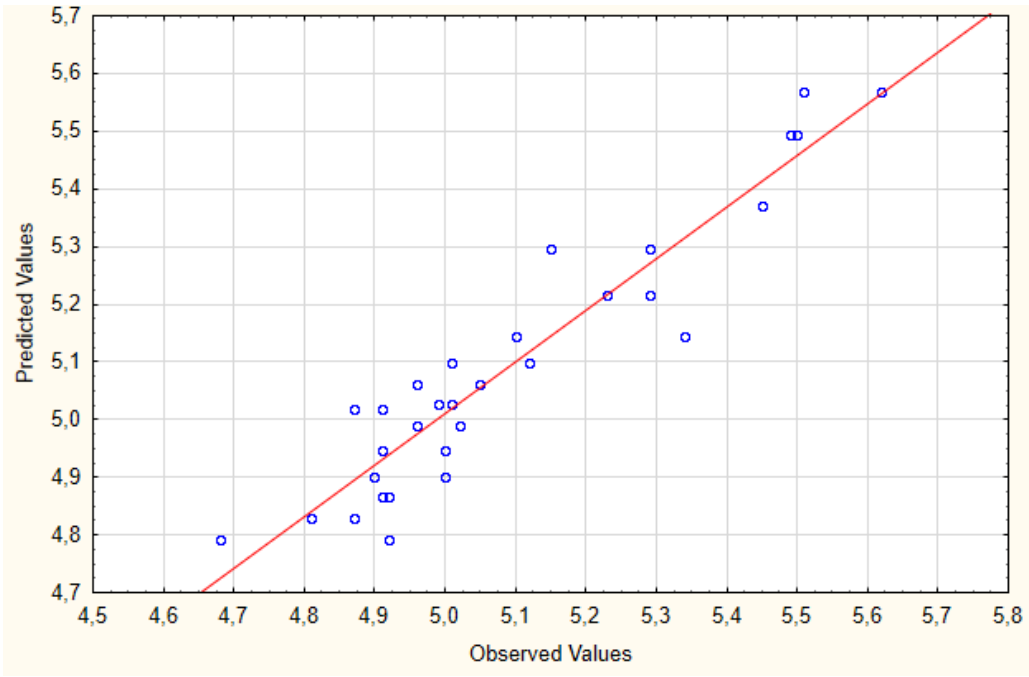


Рисунок 3.46 - Спостережені та передбачені значення

Більшість точок на графіку (рис. 3.46) приближені до червоної лінії, значить що моделі можна використовувати для прогнозування впливу заданих параметрів друку на розмірну точність зразків зроблених технологією FDM.

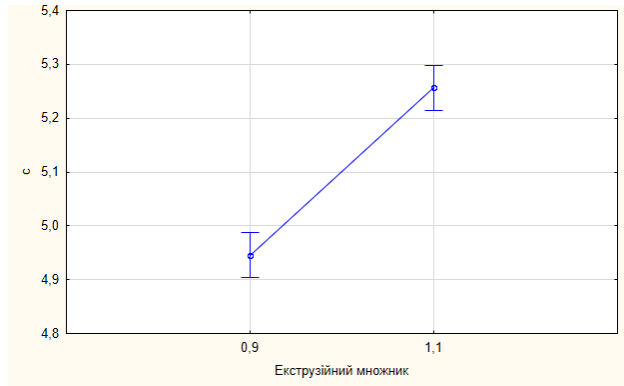


Рисунок 3.47 – Залежність розмірної точності від екструзійного множника

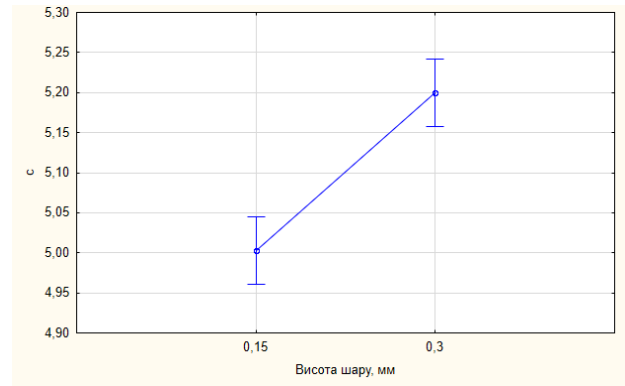


Рисунок 3.48 – Залежність розмірної точності від висоти шару

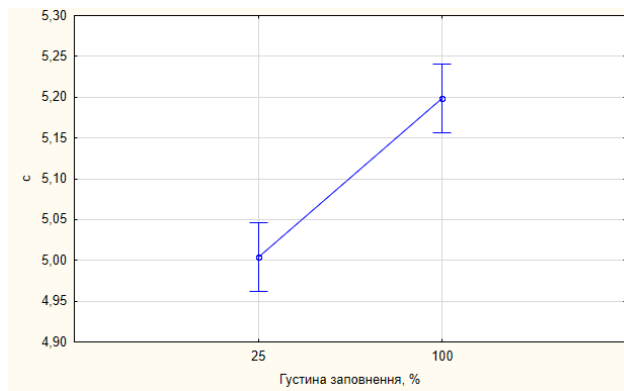


Рисунок 3.49 – Залежність розмірної точності від густини заповнення

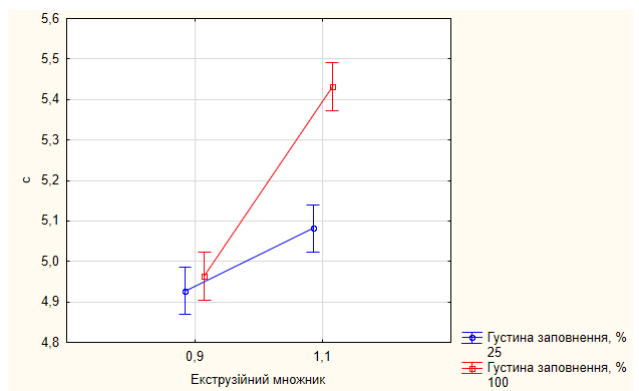


Рисунок 3.50 – Залежність розмірної точності від екструзійного множника та густини заповнення

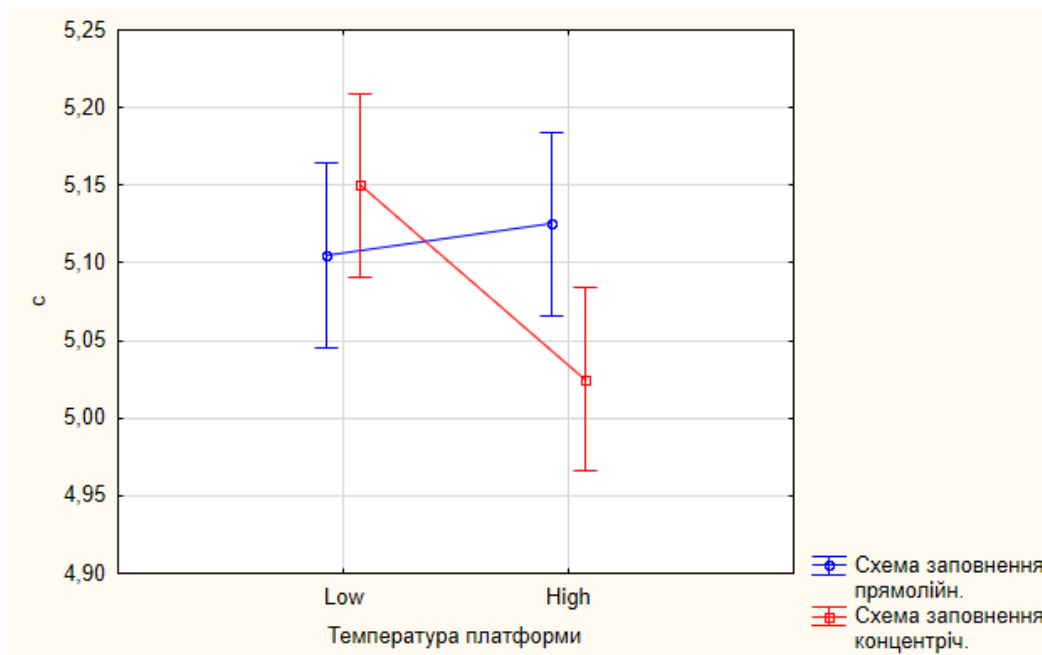


Рисунок 3.51 – Залежність розмірної точності від температури платформи та схеми заповнення

Переглянувши графіки на рис. 3.47-3.51 можна зробити такі висновки: при екструзійному множнику 0,9 густина заповнення має незначний вплив, низька висота шару більш доцільна, а при високій температурі платформи та концентричній схемі заповнення розмірна точність віще.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Безпека дослідницьких робіт

При виконанні дослідницької роботи було проаналізовано умови роботи дослідницької лабораторії університету, та визначені основні потенційні небезпеки що можуть виникнути при дослідницькій роботі, наприклад:

1) Існує ймовірність отримати травми пов'язані з електричним струмом, у випадку несправності принтеру та електрошафи при експлуатації

2) Через те що, принтер знаходиться на висоті 20см, що пов'язано з вимогами експлуатації обладнання. Ймовірність падіння внаслідок: погіршення уваги, перешкоди, слизької поверхні, хвороби та поганого самопочуття, слабкості, незручне взуття, погіршення рівноваги, екстрені ситуації, відволікання, емоційне напруження.

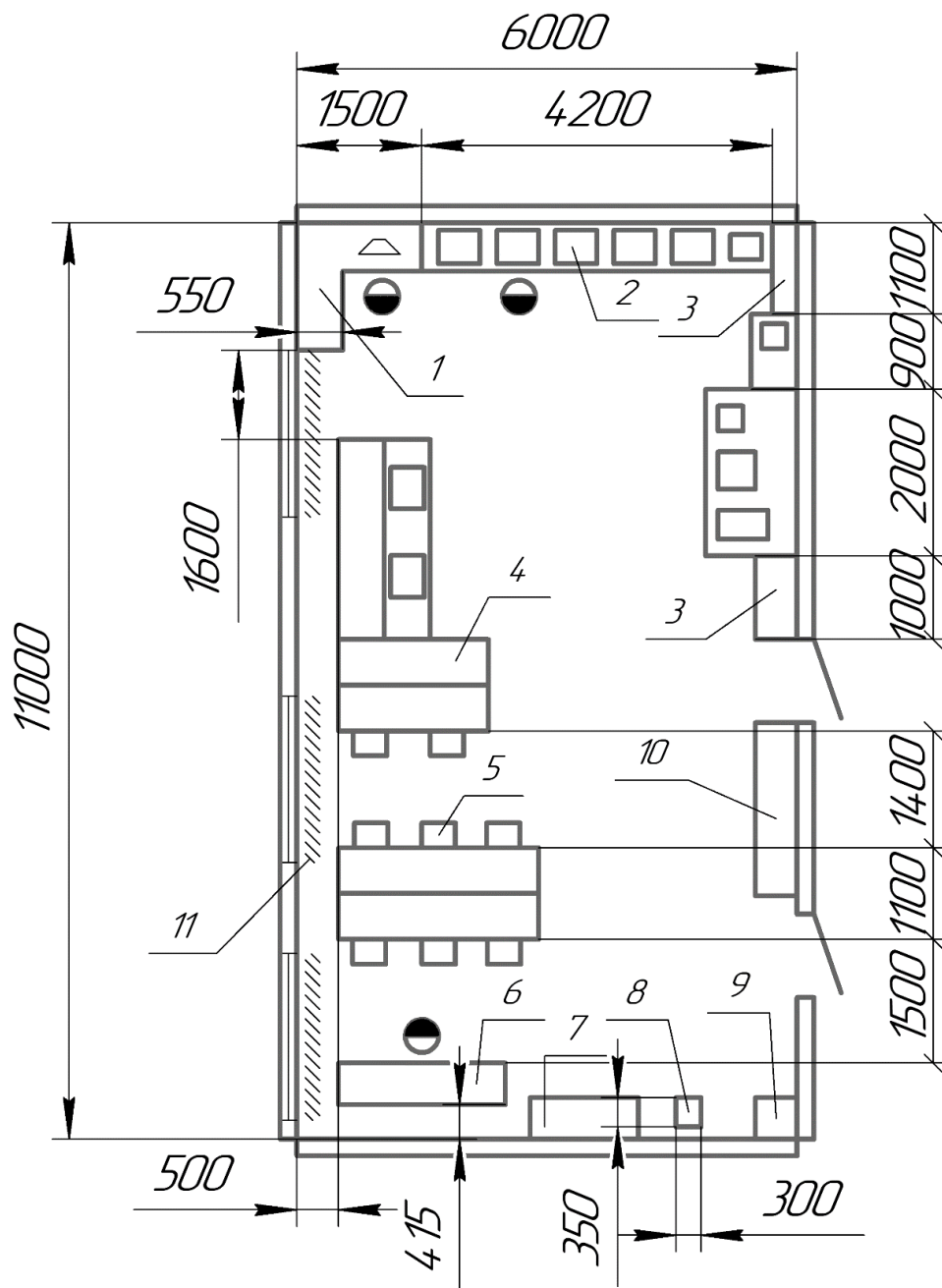
3) Отримання опіків від гарячих елементів принтеру та електрошафи, пластику та електрошафи;

4) Отримання травм від гострих кутів принтеру та електрошафи або виробу при недотримання правил експлуатації;

5) Виділення шкідливих газів при плавленні пластику можуть супроводжуватись головним болем, роздратуванням дихальних шляхів, тощо;

6) Матеріали для 3D друку можуть містити хімічні речовини які при контакті зі шкірою можуть визвати алергічну реакцію;

7) Через те, що принтер має рухомі частини вони також можуть бути небезпечними при невірній взаємодії.



1- комп'ютеризоване робоче місце з ВДТ; 2-3D принтер; 3-шафа відкритого типу; 4-стіл; 5-стілець; 6- токарний верстат; 7-шафа закритого типу; 8-електрошафа; 9-шліфувальний верстат; 10-робочій стіл; 11- сонцезахисні жалюзі.

Рисунок 4.1 - План дослідницького приміщення з комп'ютеризованими робочими місцями що відповідає вимогам ДБН В.2.2-28:2010 [75]

На рисунку 4.1 зображено план дослідницького приміщення. У цій лабораторії працює та обслуговує декілька пристроїв один працівник.

Для запобігання травматизму викликаних під час робіт слід проводити заходи організаційного та технічного характеру:

- Проведення навчання з правил електробезпеки, перевірка рівня засвоєння знань та атестація персоналу на відповідність другій або третій групі з електробезпеки відповідно до встановлених вимог згідно НПАОП 0.00-4.12-05 [76].

- З урахуванням того, що електроживлення обладнання в приміщенні з ПК здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц. Згідно вимог «ПУЕ» [77], Електротехнічне обладнання у приміщенні з комп'ютерами характеризується як електричні установки, які працюють з напругою до 1000 В. Отже, згідно вимог глави 1.7 «ПУЕ» [77], Опір контуру захисного заземлення електрообладнання приміщення з комп'ютерами в будь-яку пору року не перевищує – 4 Ом.

Плани з пожежної безпеки для роботи в лабораторії з ПК та ВДТ розробляються відповідно до встановлених вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні».

Відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [78] при виникненні пожежі в лабораторії в якій знаходиться ПК з ВДТ та багато 3D принтерів при евакуації передбачено два виходи з однієї сторони приміщення – вхідні двері. Також лабораторія обладнана автоматичною системою гасіння та первинними засобами пожежогасіння – вуглекислотний вогнегасник відповідно до «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників».

Також слід дотримуватись правил безпеки та експлуатації обладнання, а саме [79,80]:

- 1) Експлуатація 3D-принтера має на увазі вплив шкідливих та небезпечних факторів на користувача, таких як випаровування пластику, температура та шум. Тому необхідно мати робоче місце в приміщенні з природною або штучною вентиляцією;

2) Використання 3D-принтера рекомендується лише у стандартних мережах змінного струму напругою 220 В;

3) Заборонено використовувати 3D-принтер у разі виявлення пошкоджень мережевого шнура, штепсельної вилки або самого принтера. Також заборонено вмикати 3D-принтер, якщо він зазнавав ударів;

4) Використання цього принтера заборонено у приміщеннях з високою вологістю та поганим освітленням. Для захисту пластику на катушці від прямих сонячних променів необхідно використовувати сонцезахисні пристрої, такі як плівка, штори, жалюзі та ін;

5) Контакт із нагрітими та рухомими елементами 3D принтера разом із мережевим шнуром та кабелем суворо заборонено;

6) Уникайте розміщення легкозаймистих предметів біля 3D принтера, оскільки випадкові іскри можуть спричинити спалах;

7) Не допускайте введення рук у небезпечні зони 3D принтера. Користувач повинен виявляти особливу обережність під час роботи з пристроєм;

8) Не допускайте роботи у стомленому чи у нетрезвому стані;

9) Через те, що платформа принтера виходить за передні та задні межі нижньої панелі під час друку, не рекомендується розташовувати 3D принтер так, щоб задня або передня частина знаходилися біля стіни або інших об'єктів;

10) Не можна наближатися до працюючого 3D принтера в одязі, який може випадково потрапити до області друку;

11) Строго заборонено торкатися 3D принтера під час процесу друку та при нагрітому екструдері, щоб уникнути опіків та пошкоджень шкіри;

12) Заборонено торкатися працюючих вентиляторів для запобігання можливим травмам;

13) Під час друку категорично заборонено переміщувати 3D принтер;

14) Заборонено залишати 3D принтер увімкненим без нагляду;

15) Забороняється розміщувати сторонні предмети на або в 3D принтері;

16) Завжди вимикайте 3D-принтер після завершення роботи;

17) Використовуйте лише вимикачі, щоб увімкнути або вимкнути 3D принтер.

Не допускається вимкнення шляхом витягування вилки з розетки;

18) Використання електрошафи призводить до нагрівання його відкритих для доступу частин. Будьте обережні та утримуйтеся від доторкання до нагрівальних елементів усередині шафи;

19) Використовуйте датчик температури, який відповідає рекомендованим параметрам для цієї шафи;

16) Засоби відключення повинні бути вбудовані в стаціонарну електропроводку відповідно до норм підключення електромережі;

17) Не слід закривати електршафу декоративними дверцятами, щоб уникнути перегріву.

## 5 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 5.1 Бюджет наукового дослідження

При складанні бюджету наукового дослідження розраховуються витрати, необхідні для проведення всіх етапів роботи, та визначити раціональний метод дослідження.

Рівняння умови що визначає витрати на матеріали для дурку (M) [81, стр 12]:

$$M = G \cdot C_T \quad (1)$$

Де, G - витрати матеріалу на партію виробів, г;

$C_T$  - ціна одиниці виміру маси матеріалу, грн/г;

Так як для друку зразків використовували два різних матеріали:

Нейлон – як основний, та еластан – як допоміжний матеріал для першого шару, розраховуємо витрати на кожен матеріал.

Розраховуємо витрати на еластан:

Вага допоміжного матеріалу – 25,6г

На сайті продавця ціна за еластан вказана 695 грн/500 г, розраховуємо ціну

1 г:

$$C_{ел} = \frac{695}{500} = 1,39 \text{ грн/г}$$

$$M_{ел} = 25,6 \cdot 1,39 = 35,58 \text{ грн}$$

Розраховуємо витрати на нейлон:

Загальна вага всіх зразків – 118г, з них 25,6г еластан. Отже загальна вага використанного нейлону становить – 92,4г

Ціна на сайті продавця за нейлон вказана 760 грн/825 г, розраховуємо ціну 1г:

$$C_{т.н} = \frac{760}{825} = 0,92 \text{ грн/г}$$

Отже:

$$M_n = 92,4 \cdot 0,92 = 85,1 \text{ грн}$$

Розраховуємо витрати на електроенергію ( $S_e$ ) [81, стр 15]:

$$S_e = \frac{N_{п} \cdot t_{друку} + N_{пе} \cdot t_{пр}}{\eta} \cdot C_e \quad (2)$$

де  $N_{п}$  - встановлена потужність принтеру, кВт

$t_{друку}$  – час друку

$N_{пе}$  - встановлена потужність печі, 0,65 кВт

$t_{пр}$  – час просушування матеріалу

$\eta$  - коефіцієнт корисної дії обладнання (0,85)

$C_e$  - вартість 1 кВт×год електроенергії (2,64грн\*кВт)

Розраховуємо годинну норму споживання електроенергії принтером, так як стіл має напругу 220В, а сам принтер 12В то:

$$N_{п} = \frac{220 + 12}{1000} = 0,232 \text{ кВт}$$

Розраховуємо час друку зразків:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{друку}} &= 20 + 9 + 16 + 14 + 24 + 16 + 20 + 34 + 26 + 8 + 38 + 21 + 13 + \\
 &+ 14 + 18 + 12 + 36 + 14 + 22 + 13 + 25 + 34 + 13 + 10 + 20 + 20 + \\
 &+ 26 + 20 + 10 + 15 + 13 + 14 \\
 &= 608 \text{ хв}
 \end{aligned}$$

Переводимо хв в год:

$$t_{\text{друку}} = 608 \text{ хв} = 608/60 = 10,13 \text{ год}$$

Через те що нейлон вбирає вологу – матеріал перед початком роботи потрібно просушувати впродовж 3х годин. Друкування всіх 32 зразків зайняло 8 днів.

Розраховуємо час просушування:

$$t_{\text{пр}} = 8 \cdot 3 = 24 \text{ год}$$

$$S_e = \frac{0,232 \cdot 10,13 + 0,65 \cdot 24}{0,85} \cdot 2,64 = 55,75 \text{ грн}$$

Витрати на обслуговування та ремонт обладнання ( $S_p$ ) [81, стр 16]:

$$S_p = \frac{(\Pi_{\text{пр}} + \Pi_{\text{п}}) \cdot K_p \cdot C_p}{N} \quad (3)$$

де  $\Pi_{\text{пр}}$  - залишкова вартість обладнання (принтеру), грн

$\Pi_{\text{п}}$  - залишкова вартість обладнання (печі), грн

$K_p$  - коефіцієнт відрахувань до ремонтного фонду ( $K_p \approx 0,02 \dots 0,04$ );

$C_p$  – кількість обладнання

$N$  – програма випуску

$$S_p = \frac{(30000 + 2000) \cdot 0,03 \cdot 1}{32} = 30$$

Підсумок витрат:

$$\sum \text{Ц} = M_E + M_H + S_e + S_p \quad (4)$$

Де  $M_E$  – витрати на еластан

$M_H$  – витрати на нейлон

$S_e$  – витрати на електроенергію

$S_p$  – витрати на обслуговування та ремонт обладнання

$$\sum \text{Ц} = 35,58 + 85,1 + 55,75 + 30 = 206,43 \text{ грн}$$

Отже всього на дослідження було витрачено 204,6 грн. Ціна одного зразку:

$$\text{Ц} = \frac{206,43}{32} = 6,45 \text{ грн}$$

Таблиця 5.1 – Бюджет наукового дослідження

| Найменування факторів та їх велечина |                                |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| Програма випуску N                   | 32 шт                          |
| Модель принтеру                      | FDM компанії Profi+            |
| Модель печі                          | ЕЛЕКТРОТЕРМ                    |
| Матеріал                             | Plexiwire NYLON Filament Ø1,75 |
| Допоміжний матеріал                  | MonoFilament ELASTAN Ø1,75     |

Продовження таблиці 5.1

| Найменування факторів та їх велечина |               |
|--------------------------------------|---------------|
| Вартість матеріалу                   | 0,92 грн/г    |
| Вартість допоміжного матеріалу       | 1,39 грн/г    |
| Час друку                            | 10,13 год     |
| Час просушування                     | 24 год        |
| Ціна принтеру                        | 30000 грн     |
| Ціна печі                            | 2000 грн      |
| Потужність принтеру                  | 0,232 кВт*год |
| Потужність печі                      | 0,65 кВт*год  |
| Загальна сума витрат                 | 206,43 грн    |
| Вартість одного зразку               | 6,45 грн      |

Висновок: У розділі виконано розрахунок бюджету наукової роботи. Було розраховано витрати на основні та допоміжні матеріали, розраховані витрати на електроенергію. Підраховали загальний час на друк зразків та витрачений час на просушування матеріалу перед початком роботи. Розраховали витрати на обслуговування та ремонт обладнання.

Загальна сума витрат на проведення наукового дослідження склала 206,43 грн. Вартість одного зразку склала 6,45 грн.

## ВИСНОВКИ

Виконано оцінку впливу режимів FDM на шорсткість та розмірну точність зразків.

Задовільні режими друку при яких досягалась найбільша точність друку, відхилення від заданого розміру становить 0,4% та забезпечує шорсткість Ra 8,32 мкм. Такі значення були досягнені при параметрах: висота шару 0,15 мм, швидкість друку 40 мм/с, концентрична схема заповнення, густина заповнення 100%, екструзійний множник 0,9, температура екструзії 265°C, температура платформи 100°C, ширина укладки нитки 0,49 мм, кількість стінок 4, кількість суцільних нижніх і верхніх стінок 4.

Також якщо взяти попередні параметри друку але замінити густину заповнення на 25%, екструзійний множник на 1,1, температуру екструзії взяти 255°C, а температуру платформи 120°C, то ми отримаємо відхилення від заданого розміру 0,37%, а шорсткість отримаємо Ra 8,65 мкм.

У результаті дослідження було встановлено як впливають режимні параметри друку на шорсткість та геометричну точність поверхні і визначено раціональне поєднання режимних параметрів при яких досягається мінімальна шорсткість та вища якість поверхні. Таким чином було визначено що при прямолінійній схемі заповнення шорсткість має менше значення, а при густині заповнення 25%, екструзійному множнику 0,9, температурі екструдера 265°C, швидкості друку 40 мм/с, висоті шару 0,15 мм, кількості суцільних стінок 2 та температурі платформи 100°C значення шорсткості зменшується. Якщо збільшити температуру платформи і швидкість друку то значення шорсткості буде збільшуватись, також до цього призводить збільшення висоти шару і густини заповнення та підвищення значення екструзійного множника чи зменшення температури екструдера – все це має

негативний вплив на шорсткість поверхні. Всі інші параметри майже не впливали на шорсткість поверхні.

Точність довжини зразка забезпечується за рахунок екструзійного множника 1,1, швидкості друку 40 мм/с, густині заповнення 100%, прямолінійної схеми заповнення, ширини укладки нитки 0,49 мм, кількості стінок 4 та температури платформи 100°C – при цих параметрах ми отримали найбільш наближене значення довжини, але якщо їх підвищувати то значення довжини буде збільшуватись, а якщо навпаки зменшувати ці параметри то і значення довжини може мати менше значення від потрібного. Також параметри висоти шару та температури екструзії мали неоднозначне значення. Всі інші параметри майже не мали вплив на довжину зразка.

Точність ширини зразка забезпечувалась за рахунок екструзійного множника 0,9, висоти шару 0,15 мм і концентричної схеми заповнення, у цьому випадку також при підвищенні цих параметрів значення ширини збільшувалась, а якщо зменшити то і значення ширини може бути меншим від бажаного. Неоднозначне значення мали параметри швидкості і густини заповнення. Інші параметри майже не мали вплив на ширину зразка.

Висота зразка забезпечувалась за рахунок висоти шару 0,15 мм, температури платформи 120°C і концентричній схемі заповнення та екструзійного множника 0,9. Неоднозначне значення що до густини заповнення. Ці параметри при їх збільшенні сприяли і збільшенню отриманого значення висоти і навпаки при зменшенні цих параметрів значення висоти мали менші значення від номінального розміру. Інші параметри друку мали незначний вплив на отримання бажаного значення висоти.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ASTM F2792-12a, Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2012.
2. Shahrubudin, Nurhalida, Te Chuan Lee, and R. J. P. M. Ramlan. "An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications." *Procedia Manufacturing* 35 (2019): 1286-1296.
3. W. Yuanbin, Blache, & X. Xun, "Selection of additive manufacturing processes," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23, No. 2, pp. 434-447, 2017.
4. L. Ze-Xian, T.C. Yen, M. R. Ray, D. Mattia, I.S. Metcalfe, & D. A. Patterson, "Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques," *Journal of Membrane Science*, Vol 523, No.1, pp. 596-613, 2016.
5. <https://www.3dnatives.com/en/powder-binding100420174/#!>
6. A. M. T. Syed, P. K. Elias, B. Amit, B. Susmita, O. Lisa, & C. Charitidis, "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," *Materials today*, Vol. 1, pp. 1-16, 2017.
7. M. Lang, "An overview of laser metal deposition," A publication of the Fabricators & Manufacturers Association, 2017. [Online]. Available: <https://www.thefabricator.com/article/additive/an-overview-of-laser-metal-deposition>. [Accessed 2019].
8. Alojaly H. M., Hammouda A., Benyounis K. Y. Review of recent developments on metal matrix composites with particulate reinforcement. – 2023.
9. M. D. Ugur, B. Gharehpapagh, U. Yaman, & M. Dolen, "The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0," *Procedia Manufacturing*, Vol. 11, pp. 545-554, 2017.
10. A. Muller, & S. Karevska, "How will 3D printing make your company the strongest link in the value chain?", *EY's Global 3D printing Report 2016*, 2016. [Online].

Available: [https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-3d-printing-report-2016-fullreport/\\$FILE/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report.pdf](https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-3d-printing-report-2016-fullreport/$FILE/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report.pdf). [Accessed 2019].

11. [www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion](http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion)

12. J. W. Stansbury, & M. J. Idacavage, “3D Printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities,” *Dental Materials*, Volume 32, pp. 54-64, 2016.

13. L. Y. Yee, S.E.T. Yong, K.J.T. Heang, K.P. Zheng, Y. L. Xue, Y. Y. Wai, C. H. T. Siang, & L. Augustinus, “3D Printed Bio-models for Medical Applications,” *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23, No. 2, pp. 227-235, 2017.

14. C. Silbernagel, “Additive Manufacturing 101-4: What is material jetting?,” Canada Makers, 2018. [Online]. Available: <http://canadamakes.ca/what-is-material-jetting/>. [Accessed 2019].

15. [https://www.researchgate.net/figure/Material-Jetting-process-scheme\\_fig5\\_339830433](https://www.researchgate.net/figure/Material-Jetting-process-scheme_fig5_339830433)

16. [https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-the-Powder-Bed-Fusion-manufacturing-process-Distributors-of-PBF-machines-use\\_fig5\\_336745862](https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-the-Powder-Bed-Fusion-manufacturing-process-Distributors-of-PBF-machines-use_fig5_336745862)

17. S.K. Tiwari, S. Pande, S. Agrawal, & S. M. Bobade, “Selection of selective laser sintering materials for different applications,” *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21, No.6, pp.630-648, 2015.

18. C. L. Ventola, “Medical Application for 3D Printing: Current and Projected Uses,” *Medical Devices*, Vol. 39, No.10, pp. 1-8, 2014.

19. Buschmann B. et al. Additive manufacturing of wood composite panels for individual layer fabrication (Ilf) //Polymers. – 2021. – T. 13. – №. 19. – C. 3423.

20. S. Vikayavenkataraman, Y.H.F. Jerry, & F.L. Wen, “3D Printing and 3D Bioprinting in Pediatrics,” *Bioengineering*, Vol. 4, No.63, pp. 1-11, 2017.

21. Z. Low, Y.T. Chua, B.M. Ray, D. Mattia, I.S. Metcalfe, & D.A. Patterson, "Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques," *Journal of Membrane Science*, Vol. 523, No.1, pp. 596-613, 2017.
22. <https://ebrary.net/158106/engineering/photopolymerization#aftercont>
23. P. Reddy, "Digital Light Processing (DLP)," Think 3D. 2016. [Online]. Available: <https://www.think3d.in/digital-light-processing-dlp-3dprinting-technology-overview/>. [Accessed 2019].
24. <https://monofilament.com.ua/>
25. D.J. Horst, C.A. Duvoisin, & R.A. Viera, "Additive manufacturing at Industry 4.0: a review," *International Journal of Engineering and Technical Research*, Vol. 8, No.8, pp. 1-8, 2018.
26. J.H. Martin, B. D. Yahata, J. M. Hundley, J. A. Mayer, T. A. Schaedler, & T. M. Pollock, "3D Printing of high-strength aluminium alloys," *Nature*, Vol. 549, No. 7672, pp. 356-369, 2017.
27. L. Hitzler, F. Alifui-Segbaya, P. William, B. Heine, M. Heitzmann, W. Hall, M. Merkel, & A. Ochner, "Additive manufacturing of cobalt based dental alloys: analysis of microstructure and physicommechanical properties," *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 8, pp. 1-12, 2018.
28. L. E. Murr, "Frontiers of 3D Printing/Additive Manufacturing: from Human Organs to Aircraft Fabrication," *Journal of Materials Sciences and Technology*, Vol. 3, No. 10, pp. 987-995, 2016.
29. T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee, J. W. Elmer, J. O. Milewski, A. M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, & W. Zhang, "Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties," *Progress in Materials Science*, Vol. 92, pp. 112-224, 2018.

30. E. Uhlmann, R. Kersting, T. B. Klein, M. F. Cruz, & A. V. Borille, "Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components," *Procedia CIRP*, Vol. 35, pp. 55-60, 2015.
31. F. Trevisan, F. Calignano, A. Aversa, G. Marchese, M. Lombardi, S. Biamino, D. Ugues, & D. Manfredi, "Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications," *Journals Indexing & Metrics*, Vol. 16, No. 2, 2018.
32. M. A. Caminero, J. M. Chacon, I. Garcia-Moreno, & G. P. Rodriguez, "Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling," *Composite Part B: Engineering*, Vol. 148, pp. 93-103, 2018.
33. J. R.C. Dizon, A. H. E. Jr, Q. Chen, R. C. Advincula, "Mechanical characterization of 3d-printed polymers," *Additive Manufacturing*, Vol. 20, pp. 44-67, 2018.
34. W. Xin, J. Man, Z. Zuowan, G. Jihua, & H. David, "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective," *Composites Part B*, Vol. 110, pp. 442-458, 2017.
35. F. Baldassarre, & F. Ricciardi, "The Additive Manufacturing in the Industry 4.0 Era: The Case of an Italian FabLab," *Journal of Emerging Trends in Marketing and Management*, Vol. 1, No.1, pp. 1-11, 2017.
36. D. Owen, J. Hickey, A. Cusson, O. I. Ayeni, J. Rhoades, D. Yifan, W. Limmin, P. Hye-Yeong, H. Nishant, P. P. Raikar, Yeon-Gil, & Z. Jing, "3D printing of ceramic components using a customized 3D ceramic printer," *Progress in Additive Manufacturing*, Vol 1, pp. 1-7, 2018
37. A. Zocca, P. Lima, & J. Günster, "LSD-based 3D printing of alumina ceramics," *Journal of Ceramic Science and Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 141-148, 2017.
38. R. Gmeiner, U. Deisinger, J. Schonherr, & B. Lenchner, "Additive manufacturing of bioactive glasses and silicate bioceramics," *Journal of Ceramics Science and Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 75-86, 2015.

39. T. Lanko, S. Panov, O. Sushchyns'ky, M. Pylypenko, & O. Dmytrenko, "Zirconium Alloy Powders for manufacture of 3D printed particles used in nuclear power industry," *Problems of Atomic Science and Technology*, Vol. 1, No. 113, pp. 148-153, 2018
40. T. Xueyuan, & Y. Yuxi, "Electrospinning preparation and characterization of alumina nanofibers with high aspect ratio," *Ceramics International*, Vol. 41, No. 8, pp. 9232–9238, 2017.
41. W. Haoa, Y. Liua, H. Zhouc, H. Chenb, T D. Fangb, "Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composite.", *Polymer Testing*, Vol. 65, pp. 29–34, 2018.
42. T. P. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, & J. Naveen, "Glass fiber-reinforced polymer composites – a review," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 33, No.13, pp. 1-14, 2014.
43. Z. Liu, L. Zhang, E. Yu, Z. Ying, Y. Zhang, X. Liu, & W. Eli, "Modification of Glass Fiber Surface and Glass Fiber Reinforced Polymer Composites Challenges and Opportunities: From Organic Chemistry Perspective," *Current Organic Chemistry*, Vol. 19 No.11, pp. 991-1010, 2015.
44. L. Jian-Yuan, A. Jia, & K. C. Chee, "Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials," *Applied materials today*, Vol 7, pp. 120-133, 2017.
45. H. J. Van, "Additive manufacturing of shape memory alloy," *Shape memory and superelasticity*, Vol. 4, No. 2, pp. 309-312, 2018
46. Y. Yang, Y. Chen, Y. Wei, & Y. Li, "3D Printing of shape memory polymer for functional part fabrication," *The International Jurnal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 84, No. 9, pp. 2079-2095, 2015.
47. L. Lili, M. Yuanyuan, C. Ke, & Z. Yang, "3D Printing Complex Egg White Protein Objects: Properties and Optimization," *Food and Bioprocess Technology*, Vol. 1, pp 1-11, 2018.

48. P. Singh, & A. Raghav, "3D Food Printing: A Revolution in Food Technology," *Acta Scientific Nutritional Health*, Vol. 2, No.2, pp. 1-2, 2018.
49. A. Goulas, & R. J. Friel, "3D printing with moondust," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 22, No.6, pp. 864-870, 2016.
50. Ngo, Tuan D., et al. "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges." *Composites Part B: Engineering* 143 (2018): 172-196.
51. Bhushan B, Caspers M. An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication. *Microsyst Technol* 2017;23(4):1117–24
52. Mao M, He J, Li X, Zhang B, Lei Q, Liu Y, Li D. The emerging Frontiers and applications of high-resolution 3D printing. *Micromachines* 2017;8(4):113.
53. Changhai R, Jun L, Shaorong X, Yu S. A review of non-contact micro- and nanoprinting technologies. *J Micromech Microeng* 2014;24(5):053001.
54. Bryll, Katarzyna, et al. "Polymer composite manufacturing by FDM 3D printing technology." *MATEC Web of Conferences*. Vol. 237. EDP Sciences, 2018.
55. Suwanprateeb J., Sanngam R., Suvannapruk W. & Panyathanmaporn T. Mechanical and in vitro performance of apatite-wollastonite glass ceramic reinforced hydroxyapatite composite fabricated by 3D-printing. *J Mater Sci Mater Med* 20, 1281–1289 (2009). [PubMed]
56. Utela B, Storti D, Anderson R, Ganter M. A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP). *J Manuf Process* 2008;10(2):96–104.
57. Lee H, Lim CHJ, Low MJ, Tham N, Murukeshan VM, Kim Y-J. Lasers in additive manufacturing: a review. *Int J Precis Eng Manuf-Green Technol* 2017;4(3):307–22.
58. Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective. *Compos B Eng* 2017;110:442–58.

59. Dou R, Wang T, Guo Y, Derby B. Ink-jet printing of Zirconia: Coffee staining and line stability. *J Am Ceram Soc* 2011;94(11):3787–92.
60. Travitzky N, Bonet A, Dermeik B, Fey T, Filbert-Demut I, Schlier L, Schlördt T, Greil P. Additive manufacturing of ceramic-based materials. *Adv Eng Mater* 2014;16(6):729–54.
61. Melchels FPW, Feijen J, Grijpma DW. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials* 2010;31(24):6121–30.
62. Eckel ZC, Zhou C, Martin JH, Jacobsen AJ, Carter WB, Schaedler TA. Additive manufacturing of polymer-derived ceramics. *Science* 2016;351(6268):58–62.
63. Manapat JZ, Chen Q, Ye P, Advincula RC. 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. *Macromol Mater Eng* 2017;302(9). 1600553-n/a
64. Gibson I, Rosen D, Stucker B. Directed energy deposition processes. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. New York, NY: Springer New York; 2015. p. 245–68.
65. LASERTEC 65 3D: Additive Manufacturing in Milling Quality. <http://us.dmgmori.com/blob/354972/caef73fe2f4d3e0baff239006d465164/pl0us-lasertec-65-3dpdf-data.pdf>.
66. Optomec LENS 850–R, additive Manufacturing metal solution - Multistation SAS. <http://www.multistation.com/LENS-850-R-system-for-the-repair-and-fabrication-of-large-metal-components>. 5/11/2017
67. Williams SW, Martina F, Addison AC, Ding J, Pardal G, Colegrove P. Wire+ arc additive manufacturing. *Mater Sci Technol* 2016;32(7):641–7
68. Largest Metal 3D Printer Available | Industrial 3D Printing | Sciaky. <http://www.sciaky.com/largest-metal-3d-printer-available>. 23/10/2017.
69. Gibson I, Rosen D, Stucker B. Sheet lamination processes. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. New York, NY: Springer New York; 2015. p. 219–44.

70. Li J, Monaghan T, Nguyen TT, Kay RW, Friel RJ, Harris RA. Multifunctional metal matrix composites with embedded printed electrical materials fabricated by ultrasonic additive manufacturing. Compos B Eng 2017;113:342–54.

71. <https://3dreams.com.ua/product/nylon-%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA-plexiwire-825-%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC/>

72. <https://monofilament.com.ua/ua/products/inzhinernye-plastiki/elastan/elastan-zheltyj>

73. <https://shop.plexiwire.com.ua/nylon-filament/nylon-natural-400/>

74. <https://www.aveopt.com.ua/product/shtangencirkul-elektronnyj-s-lcd-displeem-digital-caliper-150mm/>

75. ДБН В.2.2-28:2010 Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення . [На заміну СНиП 2.09.04-87 ; чинний від 2011-10-01]. К. : Міненбуд України, 2011. 31 с.

76. НПАОП 0.00-4.12-05.Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. [На заміну ДНАОП 0.00-4.12-99, ДНАОП 0.00-8.01-93]. К. : Держнагляд охорони праці, 2005. 26с.- (Нормативно-правовий акт охорони праці)

77. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86 ; чинний з 2017-08-21]. К. : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

78. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [На заміну ДБН В.1.1.7-2002 ; чинний від 2017-06-01]. К. : Мінрегіон України, 2017. 47 с. (Державні будівельні норми).

79. <https://cncmachines.com.ua/>

80. <http://www.gorenje.ua>

81. Методичні рекомендації для дипломного проектування “Оцінка економічної ефективності технічних рішень” для студентів зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх

форм навчання / Укл. Г.В. Пухальська - Запоріжжя: НУ«Запорізька політехніка»,  
2023 - 43 с.

## ДОДАТОК А

Дані досліджень впливу режимних параметрів процесу FDM на параметри якості та геометричну точність зразків

Таблиця А1 - Протокол дослідження шорсткості

| №  | Ra, мкм |      |      |      |
|----|---------|------|------|------|
|    | I       | II   | III  | Сер. |
| 1  | 1,52    | 1,61 | 1,56 | 1,56 |
| 2  | 5,05    | 4,99 | 4,99 | 5,01 |
| 3  | 5,24    | -    | -    | 5,24 |
| 4  | 0,98    | 1,05 | 1,05 | 1,03 |
| 5  | 1,35    | 1,4  | 1,44 | 1,40 |
| 6  | 9,7     | 9,66 | 9,7  | 9,69 |
| 7  | 0,34    | 0,97 | -    | 0,66 |
| 8  | 9,66    | 9,61 | 9,68 | 9,65 |
| 9  | 4,9     | 4,96 | 4,99 | 4,95 |
| 10 | 3,8     | 3,85 | 3,85 | 3,83 |
| 11 | 9,54    | 9,54 | 9,53 | 9,54 |
| 12 | 5,24    | 5,18 | 5,17 | 5,20 |
| 13 | 8,35    | 8,29 | 8,31 | 8,32 |
| 14 | 8,68    | 8,58 | 8,42 | 8,56 |
| 15 | 8,21    | 9,87 | 7,83 | 8,64 |
| 16 | 6,48    | 8,57 | 6,72 | 7,26 |
| 17 | 0,35    | 0,45 | 0,27 | 0,36 |
| 18 | 9,83    | 9,42 | 9,38 | 9,54 |
| 19 | 7,89    | 6,11 | 6,05 | 6,68 |
| 20 | 5,56    | 5,63 | 5,07 | 5,42 |
| 21 | 8,54    | 7,51 | 9,93 | 8,66 |
| 22 | 8,86    | 3,16 | 4    | 5,34 |
| 23 | 9,79    | 8,79 | 8,63 | 9,07 |
| 24 | 8,89    | 8,49 | 9,24 | 8,87 |
| 25 | 7,25    | 7,51 | 8,53 | 7,76 |
| 26 | 6,77    | -    | -    | 6,77 |
| 27 | 6,41    | 7,81 | -    | 7,11 |
| 28 | 8,79    | 9,31 | 9,35 | 9,15 |
| 29 | -       | -    | -    | -    |
| 30 | -       | -    | -    | -    |
| 31 | -       | -    | -    | -    |
| 32 | -       | -    | -    | -    |

Зразки 29-32 не враховувались при аналізі результатів через те що вимірювання шорсткості неможливо було провести.

Таблиця А2 – Протокол вимірювання відхилення реального розміру від номінального

| №  | а – довжина, мм | в – ширина, мм | с – товщина, мм |
|----|-----------------|----------------|-----------------|
| 0  | 44              | 20             | 5               |
| 1  | 43,70           | 20,05          | 4,92            |
| 2  | 43,66           | 20,15          | 5,02            |
| 3  | 43,67           | 20,15          | 4,92            |
| 4  | 43,65           | 20,20          | 4,96            |
| 5  | 43,68           | 19,88          | 4,91            |
| 6  | 43,64           | 19,80          | 4,96            |
| 7  | 43,57           | 19,70          | 4,68            |
| 8  | 43,65           | 20,05          | 5,06            |
| 9  | 43,87           | 20,07          | 4,90            |
| 10 | 43,80           | 20,15          | 4,99            |
| 11 | 43,46           | 19,85          | 4,87            |
| 12 | 43,55           | 19,80          | 5,01            |
| 13 | 44,03           | 20,16          | 5,00            |
| 14 | 43,44           | 20,14          | 5,01            |
| 15 | 43,40           | 20,00          | 4,81            |
| 16 | 43,41           | 19,82          | 5,12            |
| 17 | 43,69           | 20,13          | 4,91            |
| 18 | 43,82           | 20,21          | 5,23            |
| 19 | 43,57           | 20,06          | 4,91            |
| 20 | 43,89           | 20,32          | 5,34            |
| 21 | 43,70           | 20,15          | 5,00            |
| 22 | 43,62           | 19,98          | 5,29            |
| 23 | 43,65           | 20,22          | 4,87            |
| 24 | 43,50           | 20,31          | 5,10            |
| 25 | 44,17           | 20,95          | 5,29            |
| 26 | 43,92           | 20,42          | 5,62            |
| 27 | 43,93           | 20,52          | 5,45            |
| 28 | 44,03           | 20,33          | 5,50            |
| 29 | 44,16           | 20,90          | 5,15            |
| 30 | 44,01           | 20,59          | 5,51            |
| 31 | 43,73           | 20,42          | 5,45            |
| 32 | 44,00           | 20,33          | 5,49            |