

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний

(повне найменування факультету)

Технологія машинобудування

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

другий (магістерський)

(ступінь вищої освіти)

на тему «Покращення функціональних властивостей виробів,
отриманих FDM, за допомогою термічної обробки»

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

Спеціальності 131 Прикладна механіка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Технології машинобудування

ЦИПЛАКОВ В.С.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ТУМАРЧЕНКО Л.О.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент ШИРОКОБОКОВ В.В.

(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)

ЦИПЛАКОВА Владислава Сергійовича

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Покращення функціональних властивостей виробів, отриманих FDM, за допомогою термічної обробки»

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) 14.12.2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) дослідити властивості деталей з нейлону, надрукованих методом FDM після термічної обробки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Загальне 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 - 8

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	19.09.2023	
2	Підготовка зразків до друку	11.10.2023	
3	Друк зразків	13.10.2023	
4	Проведення термічної обробки	20.10.2023	
5	Вимірювання розмірної точності	25.10.2023	
6	Випробування на міцність	03.11.2023	
7	Аналіз отриманих даних	08.11.2023	
8	Охорона праці	12.11.2023	
9	Економічний розрахунок	16.11.2023	
10	Оформлення пояснювальної записки	26.11.2023	
11	Нормоконтроль	02.12.2023	
12	Рецензія	05.12.2023	
13	Захист дипломного проєкту	14.12.2023	

Студент(ка)

_____ Владислав ЦИПЛАКОВ _____
 (підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ Лариса ТУМАРЧЕНКО _____
 (підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 90 с., 4 табл., 64 рис., 1 дод., 59 джерел.

3D ПРИНТЕР, FDM, ЕКСТРУДЕР, АДТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ,
ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ТОЧНІСТЬ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Об'єкт дослідження – термічна обробка деталей отриманих методом FDM

Мета дослідження – дослідити властивості деталей з нейлону, надрукованих методом FDM після термічної обробки.

Метод дослідження – експериментальний, науково-дослідний.

В магістерській роботі виконано оцінку впливу термічної обробки на міцність та розмірну точність зразків, обрано обладнання, було проаналізовано вплив різних параметрів термообробки, розглянуто види матеріалів які використовують для 3D друку, проаналізовано методи які покращують функціональні властивості деталей з нейлону, передбачені заходи щодо безпечної роботи у науковій лабораторії, і розроблено бюджет для проведення наукового дослідження.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць вимірювання, скорочень....	7
Вступ.....	9
1 Загальні положення.....	10
1.1 Нейлон.....	10
1.1.1 Види та властивості.....	10
1.1.2 Нейлон у 3-D друці.....	11
1.2 3D-друк: відкриття нового технологічного рубежу.....	12
1.3 Моделювання плавленого осадження термопластичних полімерів.....	17
1.4 Порівняльний аналіз ABS, PLA, та високотехнологічних полімерів у світі 3D-друку.....	19
1.4.1 Поліамід/нейлоновий полімер.....	19
1.4.2 Полімер полієфірефіркетон.....	20
1.4.3 Поширені дефекти полімерів, надрукованих FDM, і армованих волокном композитів.....	22
1.5 Методи обробки для подолання або мінімізації дефектів полімерів FDM для друку та FRC.....	30
1.5.1 Процес хімічної обробки.....	30
1.5.2 Процес лазерного обробки.....	33
1.5.3 Процес термічної обробки: відпал.....	35
1.6 3D - друк полімерами.....	38
1.7 Метали та сплави в адитивному виробництві.....	43
1.8 Порівняльний аналіз різноманітних матеріалів для 3D-друку.....	43
2 Технічне та методичне забезпечення.....	47
2.1 Характеристика принтеру.....	47
2.2 Матеріал дослідження.....	47
2.3 Характеристика печі для термообробки.....	48

2.4 Геометричні параметри зразків.....	51
2.5 Створення G-коду.....	51
2.6 Інструмент для контролю розміру.....	52
2.7 Надруковані зразки з нейлону.....	53
2.8 Випробувальна машина.....	53
3 Результати досліджень.....	56
3.1 Параметри експериментального дослідження.....	56
3.2 Вплив параметрів термічної обробки на геометрію зразків.....	58
3.3 Вплив параметрів термічної обробки на міцність зразків.....	66
4 Охорона праці.....	74
4.1 Безпека дослідницьких робіт.....	74
5 Економічний розділ.....	79
5.1 Бюджет наукового дослідження.....	79
Висновки.....	83
Перелік джерел посилання.....	84
Додаток А Дані досліджень властивостей деталей з нейлону, надрукованих методом FDM після термічної обробки.....	90

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ, СКОРОЧЕНЬ

XRD – (X-ray diffraction) рентгенівська дифракція

DSC – (differential scanning calorimetry) диференціальна скануюча калориметрія

PA – (polyamide) поліамід

MJF – (multi jet fusion) багатоструменевий синтез

FDM – (Fused deposition modelling) моделювання методом наплавлення

SLS – (selective laser sintering) селективне лазерне спікання

OEM – (original equipment manufacturer) виробник оригінального обладнання

GAGR – (compound annual growth rate) річний темп зростання

AM – (additive manufacturing) адитивне виробництво

LOM – (laminated object manufacturing) виготовлення ламінованих виробів

FRC – (fibre-reinforced composites) армовані волокном композити

ABS – (acrylonitrile butadiene styrene) акрилонітрилбутадієнстирол

PLA – (polylactic acid) полімолочна кислота

PMC – (polymer matrix composites) полімерно-матричні композити

CF – (carbon fibre) вуглецеве волокно

GF – (glass fibre) скловолокно

PCC – (polymer ceramic composites) полімерно-керамічні композити

KF – (kevlar) кевлар

PEEK – (polyether ether ketone) поліетер ефір кетон

ASA – (acrylonitrile styrene acrylate) акрилонітрил стирол акрилат

PETG – (polyethylene terephthalate glycol-modified) поліетилентерефталат, модифікований гліколем

PC – (polycarbonate) полікарбонат

TRE – (thermoplastic elastomers) термопластичні еластомери

- SEM – (scanning electron microscope) скануючий електронний мікроскоп
- PP – (polypropylene) поліпропілен
- PVA – (polyvinyl acetate) полівінілацетат
- PMMA – (Polymethyl methacrylate) поліметилметакрилат
- SHS – (Selective heat sintering) вибіркоче термічне спікання
- FFF – (Fused Filament Fabrication) виготовлення плавлених ниток
- EFF – (free-forming of ceramics) вільне формування кераміки
- FDC – (deposition modelling of ceramics) моделювання осадження кераміки
- RP – (rapid prototyping) швидке прототипування
- CSL – (ceramic stereolithography) керамічна стереолітографія
- DED – (direct energy deposition) пряме внесення енергії
- FGM - (functionally graded materials) функціонально сортовані матеріали

ВСТУП

Нейлон – термопластичний полімер, який володіє відмінними властивостями для таких галузей промисловості, як машинобудування, аерокосмічна промисловість та медицина завдяки своїй високій міцності, стійкості до температур, високій зносостійкості та низькому коефіцієнту тертя. З нейлону можна створювати як жорсткі, так і гнучкі моделі.

Зараз FDM-технологія вважається однією з найперспективніших у сфері адитивного виробництва, оскільки вона не потребує великих витрат порівняно з іншими технологіями адитивного виробництва, має досить високу якість друку та широкий вибір різних матеріалів. Однак через те, що створені моделі за допомогою FDM осаджуються шар за шаром, вони мають знижені механічні властивості. Цей недолік можна покращити за допомогою постобробки, зокрема термообробки. Після повторного нагрівання матеріалу шари пластику знову розплавляються та зплавляються один з одним, що зміцнює зв'язок між ними та покращує загальну міцність виробу. Також термообробка сприяє зменшенню залишкових напружень.

Саме для цього є актуальним визначити, як термообробка впливає на механічні властивості та геометричні розміри і безпосередньо визначити, при яких режимах краще проводити термообробку деталей з нейлону, виготовлених за допомогою FDM-друку.

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1 Нейлон

1.1.1 Види та властивості

Нейлон, відомий представник серед поліамідів, синтезується за допомогою лужно-каталізованої аніонної полімеризації з розкриттям кільця капролактаму. Цей синтетичний підхід надає нейлону високу комерційну позицію завдяки його вражаючим характеристикам: високій молекулярній масі, значній механічній міцності та винятковій здатності до самозмащення [1].

Його універсальне застосування поширюється на виробництво шестерень, підшипників і блоків ковзання, знаходячи особливу придатність для виготовлення великомасштабних виробів, які не піддаються звичайним методам виробництва, таким як лиття під тиском або пресування. Примітно, що останнім часом домінування нейлону призвело до витіснення ним традиційних металевих матеріалів, таких як мідь, алюміній, сталь і залізо, у різних областях, що сприяло зниженню споживання металу та витрат енергії [2].

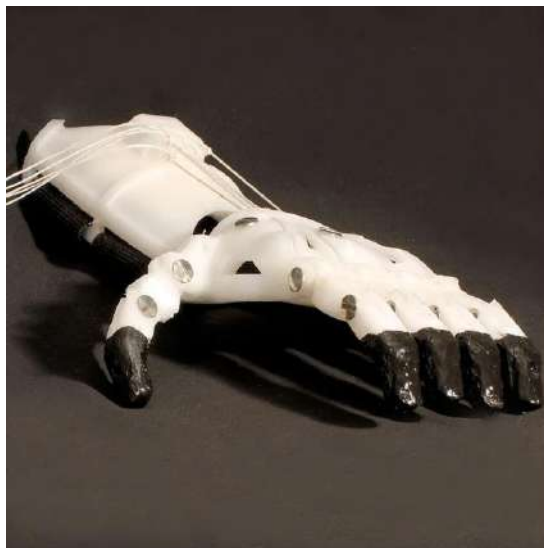


Рисунок 1.1 – Виріб з нейлону [3]

Поведінка кристалізації, впливає на властивості напівкристалічних полімерів. Серед них нейлон 6 — високочисталічний полімер — демонструє свої

механічні характеристики, пов'язані з його кристалічністю, морфологією кристалів і структурним складом. Різноманітні умови кристалізації створюють спектр кристалічних структур у нейлоні 6. Вони охоплюють стабільні кристалічні форми α і γ та проміжні фази, такі як β , δ , складчасті α , псевдогексагональні γ та гексагональні δ кристали. Дослідження Рамеша підкреслили варіації в поведінці кристалізації нейлону 6 в ізотермічних умовах при температурах від 140°C, 180°C до 240°C [4].

Вважається, що посттеплова обробка виробів з нейлону 6 посилює кристалічність і полегшує перетворення кристалічних форм, що призводить до підвищених механічних властивостей разом із підвищеною кристалічністю [1].

Отже, термічна обробка відкриває шляхи для наповнення нейлону 6 покращеними характеристиками, такими як твердість, міцність на розрив і пластичність. Тим не менш, існує мало інформації щодо наслідків післятермічної обробки для структури та властивостей нейлону 6 [5].

1.1.2 Нейлон у 3-D друці

Поліамід (РА), який зазвичай називають нейлоном, стає все більш значущим матеріалом у сфері 3D-друку. Його важливість впливає з таких характеристик, як підвищена міцність на розрив, відмінні трибологічні характеристики та помітна еластичність. Тим не менш, важливо зазначити, що друкована продукція демонструє певний ступінь чутливості до вологи [6]. Ця термопластична речовина доступна у формі нитки або порошку, залежно від використовуваної техніки 3D-друку, такої як багатоструменевий синтез (MJF), моделювання осадження плавленням (FDM) і вибіркоче лазерне спікання (SLS).

Класифікація РА виходить за межі його хімічного складу, зосереджуючись на кількості атомів вуглецю (n), присутніх у структурі. Серед широко доступних РА на ринку є РА11, РА12 і РА6, причому останній часто використовується в

FDM через його значну гнучкість і стійкість до ударів і стирання. Однак варто зазначити, що нейлон потребує попереднього нагрівання (близько 80°C) друкарської форми, щоб зменшити проблеми з адгезією та запобігти вбиранню вологи, що інакше могло б погіршити якість друку. Температура екструзії знаходиться в діапазоні 220–250 °C, залежно від конкретного типу нейлону [7].

З іншого боку, PA12, також відомий як нейлон 12, є переважаючим вибором для застосувань SLS. Його популярність пояснюється економічною ефективністю та узгодженням з довжиною хвилі лазера, який зазвичай використовується в більшості 3D-принтерів SLS. У результаті PA12 займає понад 95% поточної частки ринку. Механічні властивості поліамідів, спечених лазером, такі як модуль пружності та міцність на розтяг, демонструють чудову ізотропію, схожу на ті, що досягаються за допомогою лиття під тиском. Однак виникає розбіжність в аспекті подовження при розриві, яке залишається дещо нижчим [8].

Медичний сектор також отримує переваги від використання ПА завдяки його міцним механічним властивостям, сумісності з тканинами людини, хімічній стабільності, вражаючим характеристикам зносу та ковзанню, а також помітній міцності. Ці переваги роблять ПА не тільки незамінним у процесах розробки та виробництва оригінального обладнання (ОЕМ), але й роблять його поширеним вибором у різних біомедичних застосуваннях [9]. Для тих, хто прагне глибше зрозуміти хімічну структуру нейлону, повна інформація доступна в іншому місці [10].

1.2 3D-друк: відкриття нового технологічного рубежу

Сфера адитивного виробництва (АМ) постійно змінюється завдяки постійному розвитку сфери 3D-друку. Ця технологія відкриває двері для створення складних, легких конструкцій, що часто недосяжно за допомогою традиційних технологій виробництва. Вплив 3D-друку має місце в різних

секторах, від виробництва прототипів до досліджень і навіть виробництва механічних деталей, як показано на рисунку 1.2.

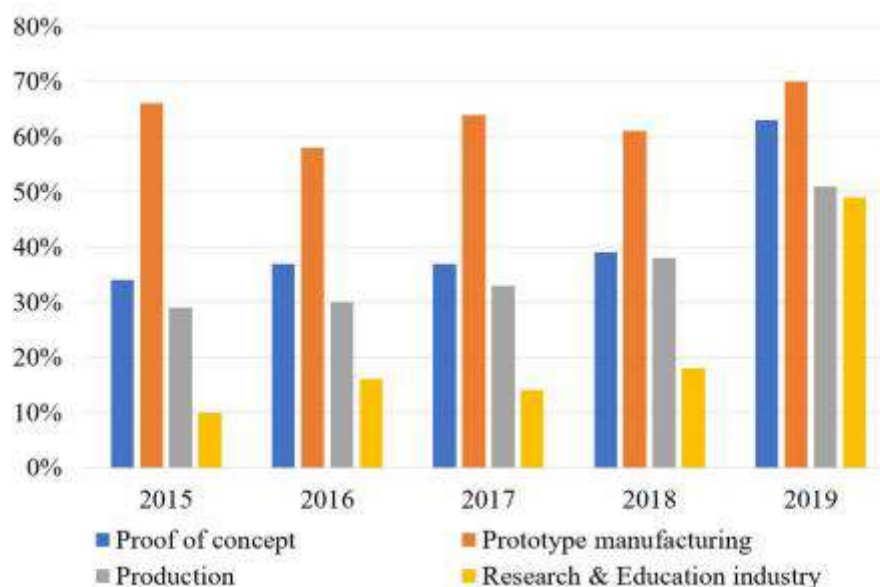


Рисунок 1.2 - Відсотковий розподіл адитивного виробництва (AM) з 2015 по 2019 роки у виробництві прототипів, виробництві, дослідницькій та освітній галузі та виробництві механічних частин [11]

Розповсюдження AM протягом 2015 - 2019 років відкриває великі можливості у 3D-друці. Оскільки протягом цього періоду він домінував у виробництві прототипів, його проникнення у реальне виробництво залишається порівняно невеликим. З появою різних напрямків AM-технологій їхній вплив охопив такі галузі, як медицина, аерокосмічна, машинобудування, харчова та машинобудівна галузі. Це підкріплюється цілою низкою переваг — від матеріалізації складних конструкцій до економічності, швидкого часу виконання [12–14].

У медичній сфері великий потенціал 3D-друку з розвитком створення тканин, органів і клітинних структур [15,16]. В машинобудуванні 3D-друку скорочує тривалість обробки інструментів і знижує витрати на виробництво прототипів, за допомогою індивідуальних компонентів, призначених для висококласного малосерійного виробництва [17,18]. Аерокосмічна галузь

особливо потребує легкі конструкції, пластичної геометрії, що зменшує споживання палива та втрати матеріалів [19,20].

Зростання 3D-друку в різних галузях можна побачити за допомогою статистики. Заглиблюючись у статистичні дані 2018 року, можна побачити багатообіцяючий шлях попереду. Дані свідчать про те, що до початку 2026 року в медичній, машинобудувальній, аерокосмічній та харчовій галузях промисловість складе 18,2%, 29,07%, 22,17% і 32,05% відповідно. Ці прогнози, зображені на рисунку 1.3, демонструють вплив, який привів 3D-друк у промисловості.

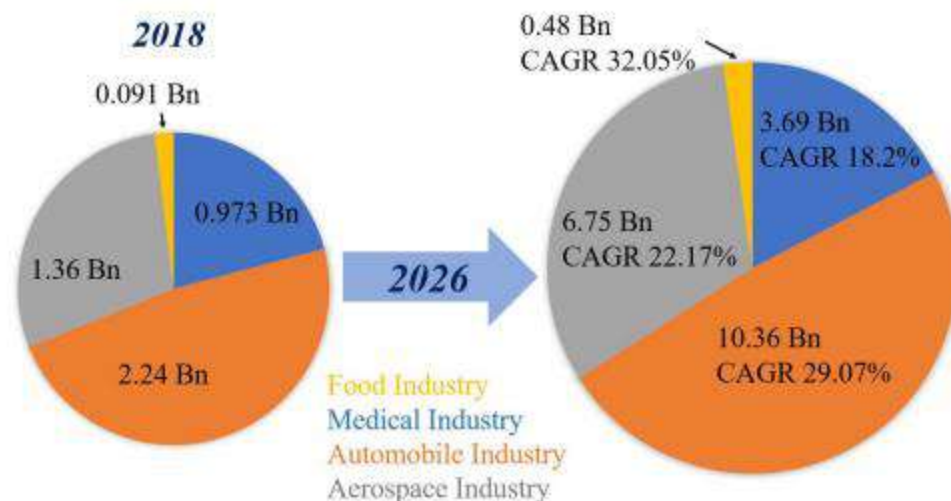


Рисунок 1.3 - Зведений річний темп зростання (CAGR) 3D-друку в харчовій, медичній, аерокосмічній та автомобільній промисловості з 2018 по 2026 рік [21].

Аддитивне виробництво (AM) — це сфера, з таким видом матеріалів: полімерів, металів, кераміки та композитів. Форми цих матеріалів — від напіврідких до рідких і порошкоподібних — нерозривно пов'язані з конкретним методом 3D-друку, який використовується [21]. Починаючи з 1980-х років різкий попит у обробній промисловості породив низку методів 3D-друку: стереолітографія (SLA), селективне лазерне спікання (SLS), виготовлення ламінованих об'єктів (LOM), прямий запис за допомогою розчинника (SC-DW) і моделювання плавленого осадження (FDM).

Стереолітографія (SLA) стала першим методом 3D-друку, що формує конструкцію структур (моделей) через організоване затвердіння полімерів, що твердіють під дією УФ-світла. Цей процес відбувається за допомогою керованого ультрафіолетового лазерного променя, який шар за шаром формує модель шляхом затвердіння смоли [22]. Примітно, що SLA має чудову якість обробки поверхні, встановлюючи еталон для інших методів 3D-друку.

Вибіркове лазерне спікання (SLS), метод, що бере свій початок у технології порошкового шару, використовує лазерний промінь для проходження заздалегідь визначених шляхів, спікання порошку для створення бажаної твердої форми [21].

У виробництві ламінованих об'єктів (LOM) моделі формуються за допомогою лазера або механічної точності перед тим, як з'єднувати шари разом. Крім того, аркуші можна спочатку розшарувати, а потім виточити в потрібні форми. Економічна природа та потенціал для вишуканої обробки поверхні роблять LOM привабливою перспективою [14].

Прямий запис із розчинника (SC-DW) розкриває процес, коли розчинний полімер поєднується зі швидким випаровуванням розчинника, створюючи складні структури за температури навколишнього середовища [21].

Моделювання плавненого осадження (FDM) за допомогою нагрітого сопла переводить термопластичну нитку в напіврозплавлений стан, формуючи структури шляхом пошарового осадження [21].

У AM моделювання плавненого осадження (FDM) викликало хвилю досліджень. На рисунку 1.4 показано ілюстрації дослідницьких публікацій, зосереджених на FDM з 2009 по 2019 рік. У межах цієї шкали відчутний зростаючий інтерес до армованих волокном композитів (FRC) у сфері FDM. Незважаючи на те, що полімерному друку FDM приділено значну увагу, FRC заохочують до подальших досліджень.

Домінування FDM висуває нові вимоги, сприяючи синергії між галузями та їх далекоглядними потребами. Такі лідери галузі, як Stratasys, Ultimaker, Markforged та інші, невпинно вдосконалюють принтери, тоді як світила програмного забезпечення, такі як Autodesk і Siemens PLM Software, розробляють

САПР, адаптовані до цих інновацій. Проте, незважаючи на цей прогрес, постійні виклики все ще виникають — проблеми, пов'язані з друком, забезпеченням якості та узгодженістю, потребують вирішення через приховані дефекти чи недосконалість надрукованих зразків.

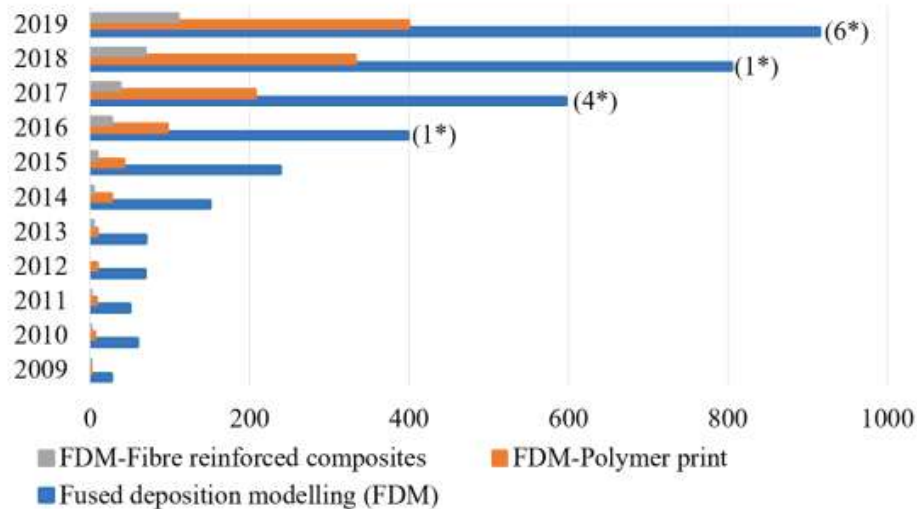


Рисунок 1.4 - Кількість публікацій з FDM, FDM-полімерних відбитків та композитів, армованих FDM-волокном, з 2009 до 2019 року. Число в дужках вказує кількість оглядових статей з композитів, армованим FDM-волокном. Дані отримані з Web of Science [21].

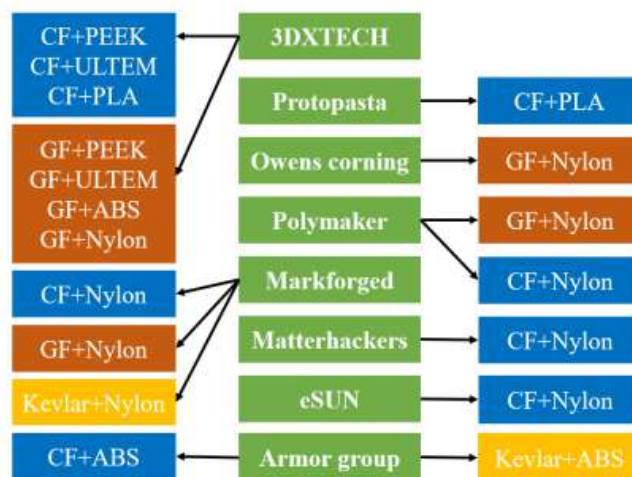


Рисунок 1.5 - Виробники ниток FDM та принтерів (середній стовпець) та пов'язані з ними композитні вироби, армовані волокном. Основні армуючі волокна включають вуглецеве волокно (CF), скловолокно (GF) і кевлар (KF), а популярними матрицями є полієфірефіркетон (PEEK), акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS), полімолочна кислота (PLA) та нейлон [21].

1.3 Моделювання плавленого осадження термопластичних полімерів

У сфері адитивного виробництва моделювання плавленого осадження (FDM) стає надійною технікою, що демонструє швидку еволюцію та широке застосування порівняно з іншими адитивними методами [22]. Основна суть процесу FDM міститься в спрощеній блок-схемі, зображеній на рисунку 1.6. Однак на траєкторію цієї методики впливає вимога до матеріалів з нижчими температурами плавлення. Ці атрибути в поєднанні з обмеженнями розмірів і появою злегка грубої текстури поверхні підкреслюють нюанси атрибутів FDM [21].

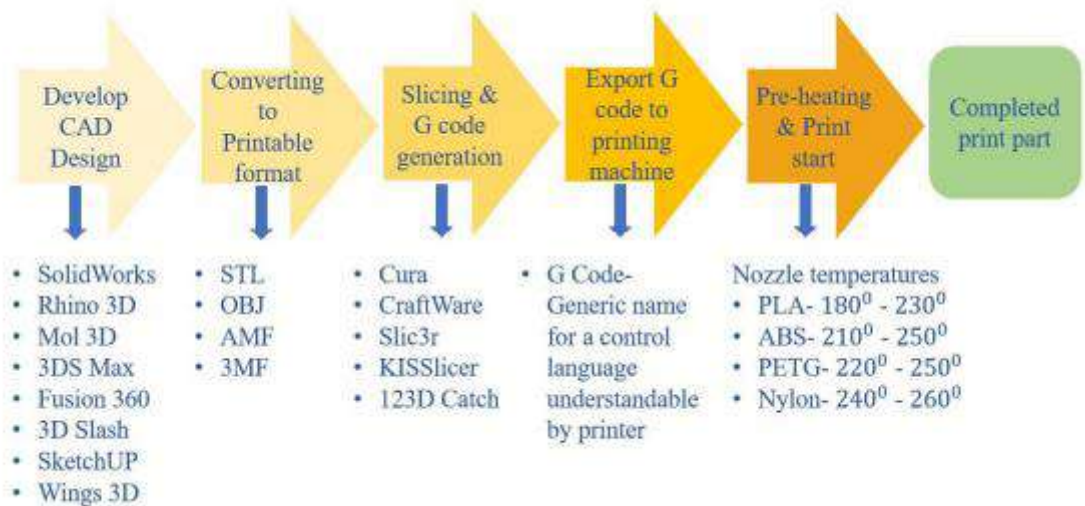


Рисунок 1.6 - Спрощена блок-схема процесу FDM, включаючи різні типи програмного забезпечення, що використовується в галузі 3D-друку. (STL-файл стереолітографії, OBJ-файл 3D-об'єкта Wavefront, файл AMF-Additive manufacturing, 3MF-формат виробництва 3D) [21].

Тим не менш, FDM компенсує свої обмеження, використовуючи низку переваг. Головними серед них є підвищена надійність, велика кількість економічно життєздатних варіантів ниток, а також зниження потреби в обслуговуванні та початкових інвестиційних витратах.

Методологія FDM охоплює полімери, композити з полімерною матрицею (PMC), біокомпозити, полімерно-керамічні композити (PCC), нанокомпозити та основну частину нашого дослідження — композити, армовані волокнами (FRC) [23]. Значний набір часто використовуваних полімерів, включаючи ABS (акрилонітрилбутадієнстирол), PLA (полімолочна кислота), нейлон/поліамід, ASA (акрилонітрилстиролакрилат), PET (поліетилентерефталат), PETG (поліетилентерефталат, модифікований гліколем) і PC (полікарбонат). Полімери підвищеної продуктивності, такі як PEEK (поліефірефіркетон), PEKK (поліефіркетонкетон), ULTEM (поліефірімід) і останнє доповнення, термопластичні еластомери (TPE), сприяють розширенню асортименту матеріалів FDM [23]. Калейдоскоп армуючих матеріалів, починаючи від ВНТ (вуглецевих нанотрубок) і графену до міді, залізних наповнювачів, а також безперервних і коротких вуглецевих, скляних і кевларових волокон, доповнює багатогранну універсальність FDM.

У складі армованих волокнами композитів, ABS, PLA і нейлон є широко поширені матричні матеріали. Їх вибір впливає з їх нижчих температур плавлення. Хоча ці полімери можуть демонструвати дещо знижену міцність і функціональні властивості в чистому вигляді, вони чудово підходять для створення концептуальних або прототипних зразків. Під час дослідницьких заходів [23] ретельно розглядали поведінку цих полімерів під час друку, ретельно вирівнювали нитки на мікроструктурному рівні та піддавали полімерні компоненти, надруковані FDM, ретельному дослідженню під навантаженнями на розтяг, згин і удар, щоб оцінити їхню механічну міцність.

У сфері армованих волокнами композитів ABS, PLA і нейлон продовжують служити опорними матеріалами. Їх вибір ґрунтується на їх здатності плавитися при нижчих температурах. Хоча ці матеріали не є міцними за своєю чистою полімерною формою, вони володіють відмінною здатністю виготовлення концептуальних або прототипних зразків. Цей аспект спонукав до серйозних досліджень, щоб розшифрувати їх поведінку при друці, заглибитися в мікроструктурне вирівнювання ниток і ретельно вивчити механічну стійкість

полімерних компонентів, надрукованих FDM, у той час, як вони долають різні проблеми, пов'язані з навантаженням на розтяг, згин і удар.

1.4 Порівняльний аналіз ABS, PLA, та високотехнологічних полімерів у світі 3D-друку

1.4.1 Поліамід/нейлоновий полімер

У порівняльній оцінці відносно ABS і PLA, нейлон демонструє чудову хімічну стійкість і підвищену міцність на розрив, підкріплену вищим модулем Юнга [24]. Сфера нейлонових компонентів, надрукованих FDM, відкриває низку переваг, включаючи виражену міцність на розтягування та ударну міцність, похвальну стійкість і мінімальну схильність до повзучості. Крім того, механічні характеристики матеріалу зростають у високотемпературному середовищі, пояснюють це явище посиленними міжшаровими зв'язками при підвищених температурах [25]. Внутрішня гідрофільна природа нейлону потребує ретельного розгляду, оскільки поглинання вологи негативно впливає на механічну міцність. На жаль, дослідження, що з'ясовують механічні властивості нейлону та його взаємодію з різними параметрами, залишаються дещо обмеженими порівняно з ABS та PLA [25,26]. Подібно до ABS і PLA, спостерігається помітна тенденція поверхонь: зменшення товщини шару збільшує міцність на розрив, що пояснюється підвищеною когезією між шарами [21]. У сфері 3D-друку поліамід 12 (PA 12) є найкращим варіантом нейлону.

Кристалічні властивості нейлону підкріплюють його чудові функціональні властивості, включаючи усадку під формою, а також стійкість до хімічних речовин, зносу та температури. Цей універсальний матеріал займає свою нішу в різних галузях, включаючи побутову, аерокосмічну та автомобільну сферу [21].

1.4.2 Полімер полієфірефіркетон

Окрім полімерів, які раніше були описані, 3D-друк формує окремий набір матеріалів, визнаних високоефективними або інженерними полімерами. Яскравим прикладом серед них є полієфірефіркетон (PEEK), що входить до категорії поліарилетеркетону (PAEK). PEEK, безбарвний напівкристалічний органічний термопластичний полімер, використовується в інженерії — літальних апаратів, ракет, гоночних автомобілів і компонентів дронів [28]. Незважаючи на його важливість, дослідження механічних властивостей PEEK залишається обмеженим, зосереджуючись на таких параметрах, як орієнтація друку, розміри сопла, швидкість друку та екструзії, температура сопла та щільність заповнення [21]. Завдяки своїм внутрішнім якостям PEEK знаходить застосування в медичній сфері з підвищеною надійністю, охоплюючи інженерію кісткової тканини, ортопедичні імплантати, протезування суглобів, спинальні імплантати, системи протезування та стоматологію [21].

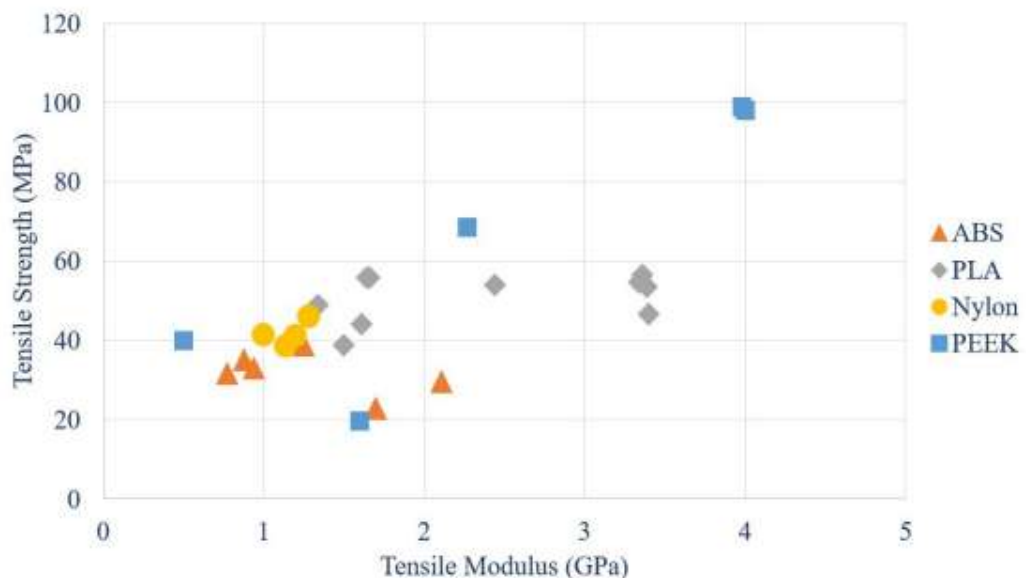


Рисунок 1.7 - Міцність на розрив у порівнянні з модулями пружності зразків з ABS, PLA, нейлону та PEEK, надрукованих за допомогою FDM [21].

Аналіз діаграми розсіювання, яка порівнює міцність на розрив із модулем для ABS, PLA, нейлону та PEEK, показує чіткі тенденції, проілюстровані на рисунку 1.7. Діаграма підкреслює значну перевагу PEEK з точки зору міцності на розрив, помітно перевершуючи PLA, ABS та нейлон .

Незважаючи на успіхи, досягнуті завдяки високоефективним полімерам, полімери продовжують демонструвати механічні властивості, які відстають від альтернативних методологій виробництва. В якості інноваційного рішення дослідники намагаються доповнити чисті полімерні композиції матеріалами з чудовою функціональністю, щоб посилити механічну якість.

1.4.3 Поширені дефекти полімерів, надрукованих FDM, і армованих волокном композитів

Комплексний аналіз багатьох дослідницьких спроб підкреслює однозначне визнання певних недоліків полімерів, надрукованих FDM, і композитів, армованих волокнами. Ці обмеження, стійкі до простого тонкого налаштування параметрів друку, справляють прямий вплив на механічну міцність і якість поверхні виготовлених компонентів. Ці недоліки можна коротко описати як викривлення форми, що виникає внаслідок залишкових напруг, що виникають через нерівномірні температурні градієнти, наявність мікропустот як у матриці, так і в нитках, нерівномірний розподіл волокон у армованих волокнами термопластичних нитках, неоптимальна адгезія волокна до матриці, а прояв шорсткості поверхні пояснюється ефектом сходів. Поглиблене дослідження Озтан та ін. [29] ретельно досліджували ці недоліки у армованих волокнами композитах, надрукованих FDM, використовуючи аналіз зображень SEM. Результати показали, що найбільш виражені недоліки охоплювали шорсткість поверхні та пористість на друкованому об'єкті, а також нерівний зв'язок між волокном і матрицею. Мікроскопічний огляд, детально описаний на рисунку 8,

демонструє грубу текстуру, яка є результатом поділу нейлонових ниток лінійним способом, поряд із видимими проміжками, вкрапленими між цими лініями. Крім того, мікропори спостерігалися на поверхні друкованих компонентів PLA. Дослідження також підкреслило труднощі в досягненні оптимального вливання нейлонової смоли в пучки вуглецевого волокна, а також неідеальний зв'язок між вуглецевими волокнами та нейлоною матрицею, оскільки було виявлено, що волокна вийшли з матриці. Відповідно, Папон та ін. [30] погоджується з розгалуженням пустот, неоптимальної адгезії волокна до матриці та проміжків, що впливають на в'язкість руйнування армованих волокнами композитів. Прояв пористості або порожнеч може бути пов'язаний з різними джерелами, починаючи від утворення, викликаного друком, і закінчуючи внутрішніми порожнечами в нитці, особливо поширеними в нитках, армованих волокном. Порожнечі, спричинені друком, можуть виникнути через захоплення повітря в матриці, проміжки між кульками та шарами, нерівномірний розподіл матриці та різницю діаметрів ниток.

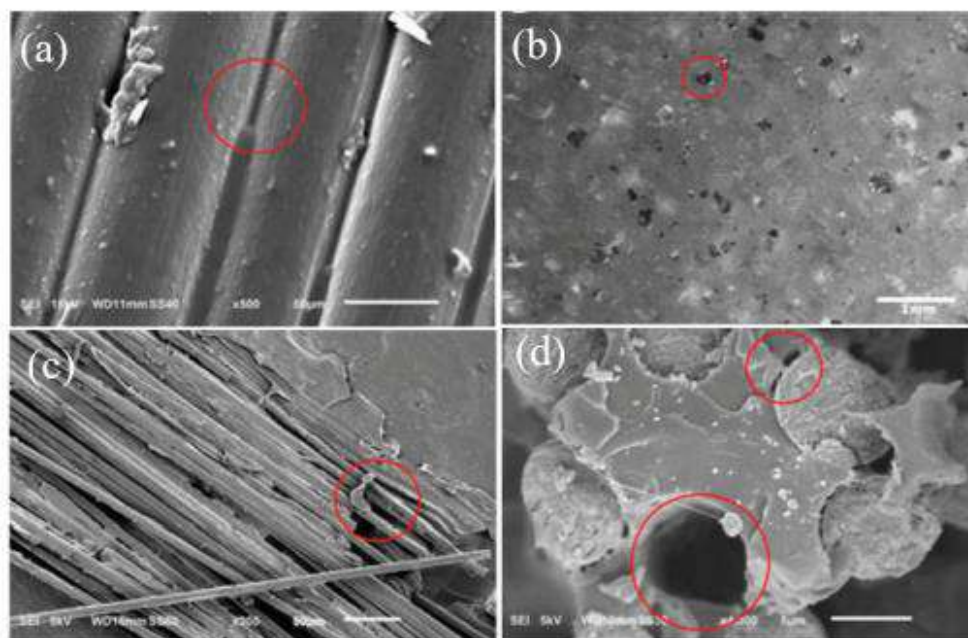


Рисунок 1.8 - (a) Шорсткість поверхні нейлонового зразка. (b) Мікропори на поверхні зразка PLA. (c) Погане вливання смоли у волокна. (d) Вирив волокна з матриці [29].

Безсумнівно, певний ступінь утворення пустот у FDM є внутрішньою ознакою через саму природу цього процесу друку. Порожнечі між шарами мають відносно більші розміри і залежать від таких параметрів, як повітряний зазор і товщина шару. І навпаки, внутрішні порожнечі в нитці та матриці набагато менші, і контроль над ними шляхом маніпулювання параметрами друку є складним [31]. Сукупні результати досліджень підкреслюють, що проміжки між шарами, які каталізують руйнування через відшарування, можна зменшити шляхом мінімізації товщини шару [21]. Глибока візуалізація на рисунку 1.9 а,б чітко пояснює вплив товщини шару на утворення пустот, підтверджуючи, що зменшена товщина шару корелює з мінімізованою кількістю пустот між шарами.

Товщина шару зазвичай знаходиться в діапазоні 0,05–0,4 мм, спектр, який перевершує найтоншу товщину шару, досягнуту за допомогою SLS (0,08 мм), хоча й не досягає найтоншої висоти шару SLA (0,025 мм). Однак важливо визнати, що хоча менша товщина шару зменшує вміст пустот, вона ненавмисно збільшує час виробництва. Це збільшення часу виробництва є результатом збільшення кількості шарів, необхідних для завершення деталі. Мікроскопічні дослідження виявили наявність пустот розміром менше 16,4 мкм у екструдованих нитках, що значно впливає на загальний відсоток пористості в надрукованому об'єкті. Ці різноманітні порожнечі разом служать початковими точками руйнування під час навантаження. Напруга, зосереджена в цих областях, навантажених порожнечами, сприяє передчасному руйнуванню зразка, особливо впливаючи на поперечні властивості, головним чином залежні від міцності матриці [21].

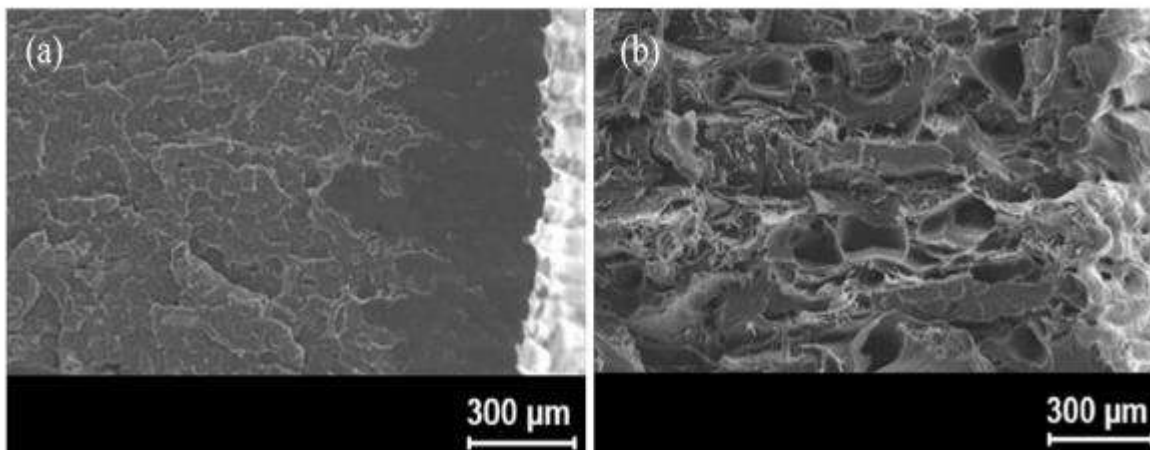


Рисунок 1.9 - (а) Поперечний переріз друку ABS з товщиною шару 0,06 мм. (б) поперечний переріз ABS з товщиною шару 0,17 мм. Збільшення товщини шару викликало багато пустот [21].

Глибокі дослідження, проведені експертами, висвітлюють значну присутність порожнеч поблизу місць виникнення тріщин, одночасно виявляючи низький опір поширенню тріщин у цих багатих порожнечами зонах. Ці мікроскопічні порожнечі, суттєво підкріплюють неоптимальні характеристики міцності, що спостерігаються у компонентах, виготовлених за допомогою процесу FDM. Крім механічних наслідків, пористість компонентів, надрукованих FDM, кидає пляму на їхній потенціал для ефективного ущільнення. Численні емпіричні висновки сходяться, ілюструючи неефективність цих компонентів у обмеженні рідин і газів, тим самим обмежуючи їхню корисність для герметизації [21].

Введення волокон у чисту полімерну матрицю значно збільшує загальну міцність друкованого компонента. Однак це покращення пов'язане з розширеною наявністю пустот у мікроструктурі надрукованого об'єкта. Складна взаємодія термопластичної нитки та армуючих волокон сприяє нерівномірному розподілу волокон, що призводить до локальних ділянок пористості всередині насиченої волокнами матриці.

Кабір та ін. [21] ретельно розрізали поперечні перерізи ниток, армованих вуглецевим волокном (CF) і скловолоконном (GF), згодом відкриваючи ділянки,

багаті волокнами, а також області, багаті матрицею. На жаль, у регіонах, багатих волокнами, неадекватне просочення матриці спричиняє ескалацію пористості. Як показано на рисунку 1.10, поперечний переріз нитки, посиленої CF, оголює присутність багатих порожнечами областей, виділених жовтим кольором.

Зокрема, Соете та ін. підтвердили, що розгортання послідовних шарів вуглецевого волокна корелювало з розширенням значних пустотних областей, що характеризуються складною, неправильною геометрією. Цей зсув був особливо помітним при переході від деталей, надрукованих чистим полімером. У цьому контексті порожнечі в першу чергу були обмежені проміжками між кульками, як показано на рисунку 11а. Поява армуючих волокон призвела до помітного збільшення пористості на багатьох гранях компонента — між пучками волокон, усередині пучків волокон, а також на початку та в кінці процесу друку. Ця еволюція графічно показана на малюнку 11b. Крім того, варто зазначити, що ці заповнені порожнечами зони діють як каталізатори для швидкого виникнення та поширення тріщин серед шарів волокна. Під навантаженням на розтяг механізми руйнування армованих волокном композитів, надрукованих FDM, в основному характеризуються руйнуванням волокна. Аналіз поверхні руйнування цих зразків показує, що висмикування волокна також сприяє загальній динаміці руйнування [21].

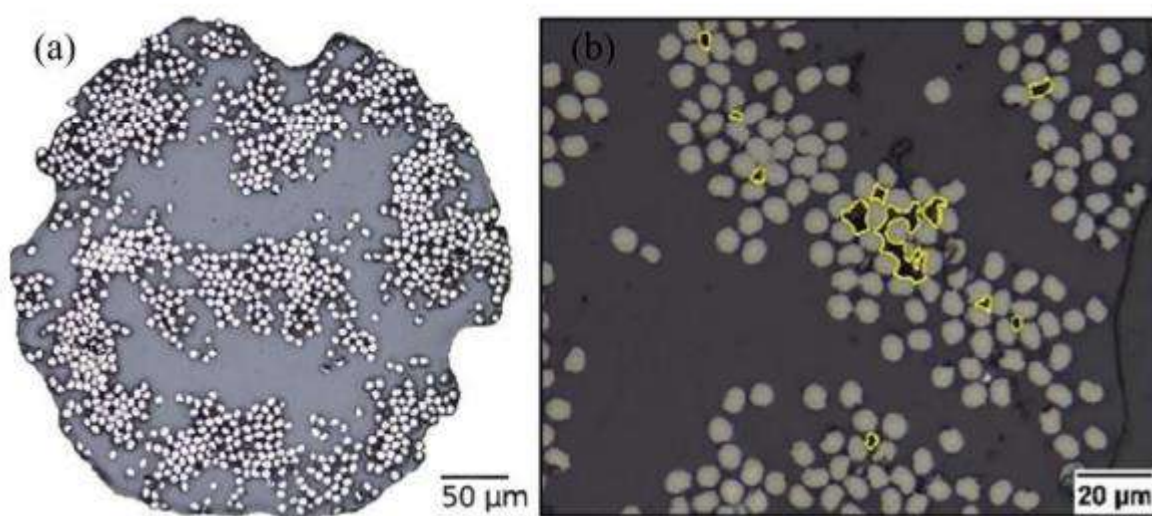


Рисунок 1.10 - (a) Поперечний переріз безперервної армованої CF нитки.
(b) Збільшене зображення, що представляє порожнечі між волокнами [21].

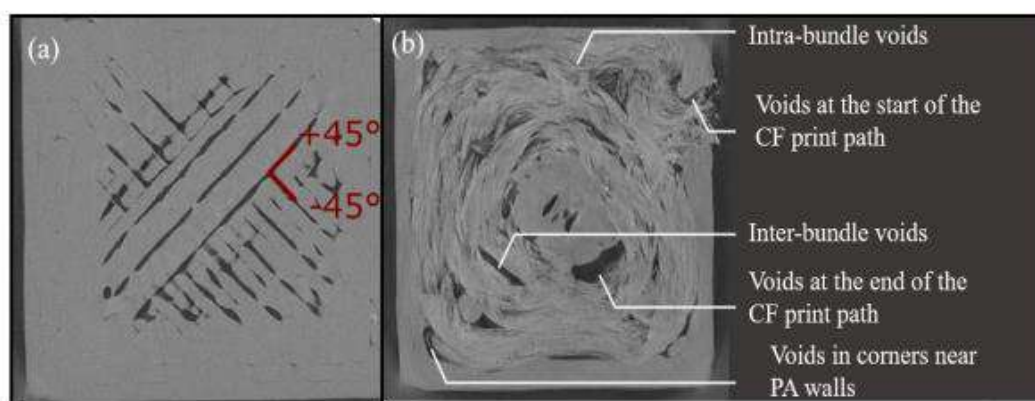


Рисунок 1.11 - (а) Пористість між кульками PLA. (б) Підвищена пористість у пучках CF, всередині пучка CF, на початку та в кінці відбитка CF та біля стінок PLA [21].

У сфері армованих волокнами композитів (FRC) міцність зв'язку, що з'єднує волокна з матрицею, значною мірою визначає динаміку продуктивності. Основна проблема виникає у висмикуванні волокон, коли погане з'єднання супроводжує від'єднання волокон від матриці. Підвищення міцності цього зв'язку вимагає якісного покриття волокон матеріалом матриці. Важливою передумовою є сприятливе з'єднання волокон матрицею; недолік у цьому випадку зумовлений слабким зв'язком через недостатнє насичення [21]. Ця вразливість є ще одним явним недоліком процесу FDM.

Крихка поверхня FRC-зразків, надрукованих методом FDM, демонструє помітні порожнечі, що є результатом витягування волокна. Крім того, цей рисунок розриву вказує на те, що волокна від'єдналися з мінімальними помітними пошкодженнями, завданими матриці. Аналіз поперечного перерізу матриці PLA, зміцненої вуглецевими волокнами, наведено на рисунку 1.12a,b, тоді як кріорозбиті поверхні поліпропілену (PP), армованого 15% CF і 20% CF, візуально зображені на рисунку 12c,d. Додаючи до гами потенційних дефектів у відбитках, оброблених FDM, явна шорсткість поверхні виділяється як основна проблема. Ця шорсткість, яка помітно проявляється як ефект паралельної лінії та ефект сходів через стратифіковане осадження послідовних шарів, особливо

помітна на похилих і вигнутих поверхнях. Характерна шорсткість поверхні нейлону, ABS і PLA, виготовлених за допомогою процесу FDM, зображена на рисунках 1.13а-с [21].

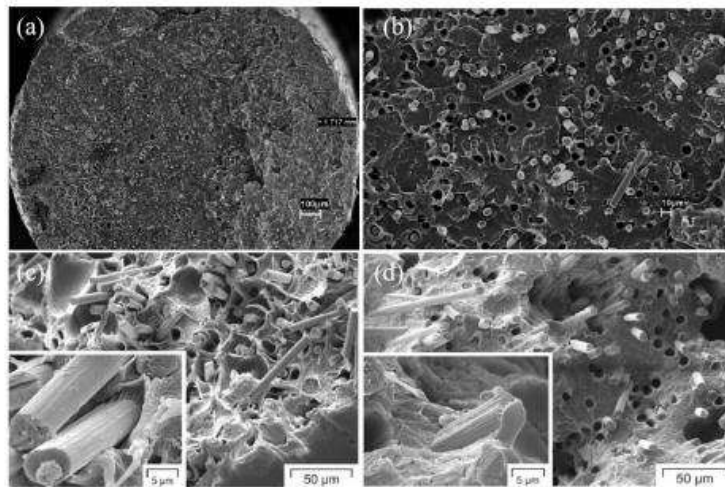


Рисунок 1.12 - (а) Поперечний переріз нитки PLA, армованої CF. (б) Збільшений поперечний переріз нитки PLA, армованої CF. (с) Поверхня кріорозлому 15% CF армованого PP композиту. (д) Кріо-розбита поверхня PP-композиту, армованого 20% CF (а, б, с, д) [21].

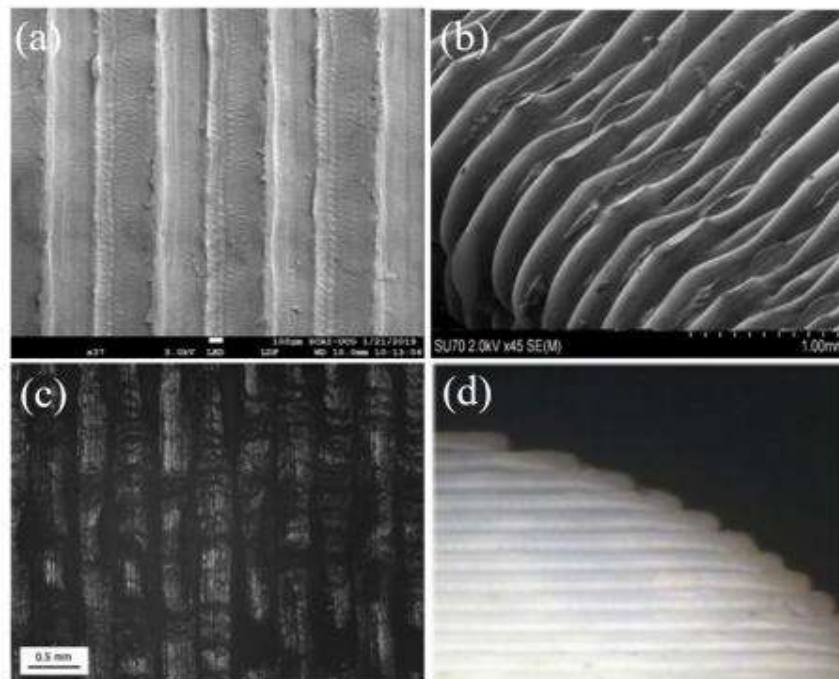


Рисунок 1.13 - (а) Шорсткість поверхні нейлонового FDM зразка. (б) Шорсткість поверхні зразка ABS FDM. (с) Шорсткість поверхні зразка PLA FDM. (д) Ефект сходів на вигнутих поверхнях, надрукованих FDM [21].

Поява ефекту лінії під час напилення ниток викликає характерну шорсткість на фінішних поверхнях виготовлених деталей. Це явище особливо помітно в вигнутих структурах, як показано на рисунку 1.13d. Результуючий ефект сходів, який пояснюється процесом стратифікованого розміщення шарів, ще більше підкреслює цю шорсткість, слугуючи чітким розмежуванням між виробленими FDM деталями та деталями, обробленими або формованими [21].

Процес FDM викликає внутрішнє накопичення напруги в виготовленій частині. Ця напруга є наслідком швидких і циклічних температурних коливань, яка має нерівномірні градієнти температури по всій частині. Цей термічний розрив породжує залишкову напругу, яка спотворює форму. Оскільки кожна щойно екструдована нитка швидко охолоджується після контакту з попередньо затверділим шаром, відбувається локальне переплавлення, сприяючи нерівномірному нагріванню та охолодженню. Як наслідок, виникають неоднорідні градієнти температури, сприяючи різним рівням напруги як у щойно нанесеному, так і в попередніх шарах. Цей профіль напруги справляє відчутний вплив на форму та розміри кінцевої деталі. Виникає спектр деформацій, включаючи поперечну та поздовжню усадку, прогин, скручування та кутову деформацію. Викривлення можуть спричинити розшарування шару та викривлення, коли контури деталі деформуються від кутів і від'єднуються від друкарської платформи [21].

Щоб пом'якшити викривлення форми, необхідне стратегічне поєднання втручань, що охоплює вибір оптимальної температури сопла, більш поступову швидкість друку, включення кута растру 45° та збільшення товщини шару [32, 33]. Вирішення проблеми з викривленням передбачає застосування таких тактик, як нанесення клею на друкарську платформу, використання грубого боросилікатного скла на друкарській платформі, розгортання каптонової стрічки — суміші поліамідної плівки та силіконового клею — і обробка друкарської платформи сполуками на основі полівінілацетату (PVA). Поміщення принтера в ізоляційний корпус, регулювання щільності заповнення та адаптація нижнього

шару деталі для протидії навантаженню є додатковими стратегіями, які використовуються для зменшення викривлення [21].

У відповідь на вищезазначені недоліки матеріалізувався ряд методів, які слугують для попередження або пом'якшення цих обмежень. Розрізняючи втручання перед процесом і після процесу, ці обробки можуть бути реалізовані або до етапу друку, або після кульмінації виготовлення деталей.

1.5 Методи обробки для подолання або мінімізації дефектів полімерів FDM для друку та FRC

1.5.1 Процес хімічної обробки

У сфері адитивного виробництва хімічна обробка відіграє ключову роль у покращенні як якості поверхні друківаних компонентів, так і міжфазного зв'язку між матрицею та волокном. Ацетон стає переважаючим хімічним елементом для пом'якшення шорсткості поверхні, який часто вводять шляхом занурення або впливу гарячих чи холодних парів ацетону. Занурення, завдяки своїй швидкості, дає такі переваги, як скорочення витрат часу та відсутність шкідливих викидів, що відрізняє його від обробки холодною парою. Крім того, занурення економічна ефективніше, на відміну від аналога з нагрітою парою [21].

Дослідження [21] виявили значне зменшення шорсткості поверхні на 97,2% для надруківаних на ABS компонентів, занурених у розчин ацетону, завдяки чому поверхня стала значно блискучою. Однак це підвищення супроводжувалося падінням міцності на розрив на 42,58%, що пояснюється взаємодією між розчином і ниткою. Jayanth та ін. [34] підтвердили ці висновки, досліджуючи зразки ABS, оброблені розчинами ацетону та дихлоретану.

Останній продемонстрував чудовий ефект згладжування поверхні, що призвело до зменшення шорсткості поверхні в діапазоні від 60% до 91%. Хоча обидві обробки спричинили зниження міцності на розрив приблизно на 48%

порівняно з необробленими зразками, очевидно, що покращення гладкості поверхні було помітним.

SEM-зображення, як показано на рисунках 14a–f, зображують зміну морфології поверхні зразків ABS після обробки. Поступове зменшення растрових ліній підкреслює трансформаційний вплив хімічної обробки, що завершується більш гладкою текстурою поверхні. Додаткові дослідження, зокрема з випарами ацетону, дали аналогічні ефекти очищення поверхні для друкованих компонентів з ABS, ABS+, PLA та PLA+. Слід зазначити, що здатність ацетону розчиняти ABS ефективніше, ніж PLA, сприяла помітному зменшенню ефекту сходів, очевидного в друкованих деталях з ABS [21].

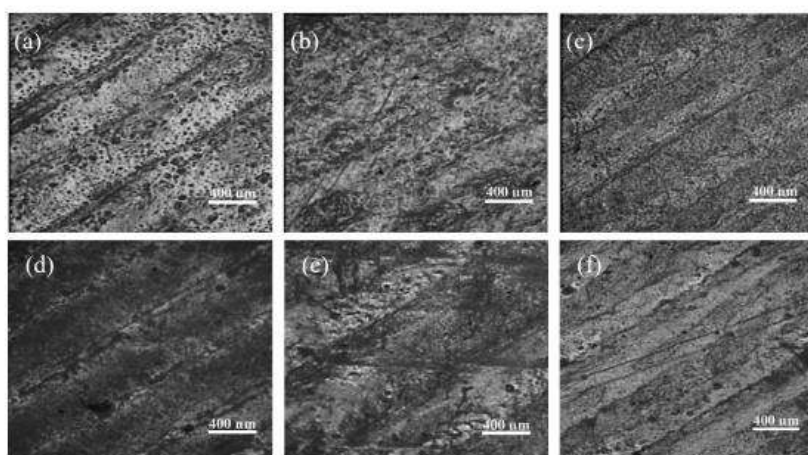


Рисунок 1.14 - SEM зображення зразків ABS, оброблених ацетоном: (a) 3 хв, (b) 5 хв і (c) 7 хв. Зразок АБС, оброблений дихлоретаном: (d) 3 хв, (e) 5 хв і (f) 7 хв. Лінії растру зникають, роблячи поверхню гладкою [35].

Прагнучи зміцнити волокно та матрицею в композиційних матеріалах, дослідники використовували різноманітні методи для посилення міжфазного зв'язку та якості поверхні. Зокрема, Хан та ін. показали метод, який об'єднує силанові зв'язки з плазмовою обробкою, забезпечуючи посилений CF-ПП підвищену міжшарову міцність на зсув. Введення функціональних груп на CF-поверхні за допомогою цього підходу посилює хімічну спорідненість між волокнами та матрицею, підвищуючи міцність зв'язку та підвищуючи міжшарову міцність на зсув.

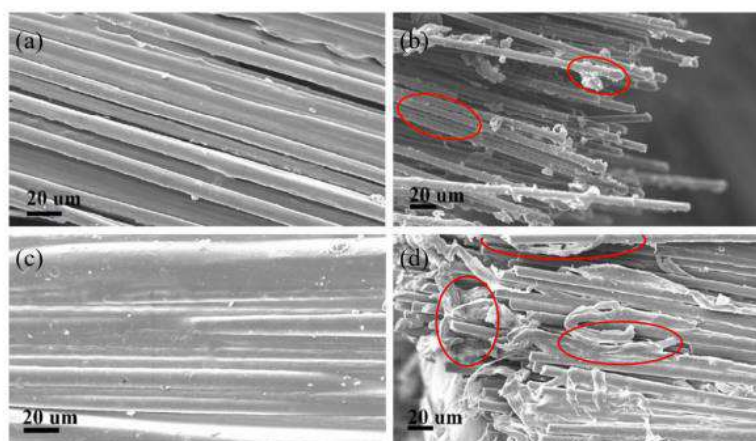


Рисунок 1.15 - SEM-зображення нитки PLA, армованої CF: (a) Необроблена поверхня нитки. (b) Витягування волокна з необробленого зразка після випробування на розтяг. (c) Хімічна оброблена поверхня нитки. (d) Витяг волокна з хімічно обробленого зразка після випробування на розтяг із кращим нанесенням матриці на волокно [35].

Паралельне дослідження Лі заглибилися в обробку короткого CF за допомогою HNO_3 , що призвело до посилення міцності зв'язку з матрицями ABS і поліаміду-6. За допомогою киснево-плазменою обробкою, Монтеc-Моран та ін., привели до суттєвих покращень зв'язку матриці CF-PC завдяки підвищеній функціональності поверхні та більш гладкій текстурі, спричиненій плазмовим окисленням. Лі виявили помітне збільшення карбоксильних функціональних груп на поверхнях CF при обробці O_3 , що згодом посилює адгезію між волокнами та матрицею поліаміду-6. Результуюча ескалація міжфазної міцності на зсув досягла вражаючих 60% [21].

Атмосферне середовище під час процесу FDM також піддається маніпуляціям для подолання недоліків. Ледерле та ін. показали ефективність середовища газоподібного азоту в FDM, що призвело до підвищеного подовження при розриві та 30% приросту міцності на розрив для зразків ABS та PLA. Зменшення деградації поверхні полімеру та підвищення адгезії шару пояснювали пригніченням процесів окислення.

Проводячи експерименти у вакуумній камері, Майдін виконали FDM-друк ABS у таких умовах, що дало значне покращення якості поверхні. Знижена швидкість охолодження нанесених шарів у вакуумному середовищі призвела до більш гладких поверхонь, пом'якшуючи нерівності, такі як плями та струни, тоді як ефект сходів був помітно послаблений.

Для оптимізації міжфазного з'єднання хімічна обробка поверхонь волокна перед їх введенням у матрицю для розробки армованої волокном нитки стає стратегічним напрямком. Водночас зміна атмосферних умов під час процесу друку є перспективою для підвищення якості поверхні та механічних характеристик надрукованих зразків [21].

1.5.2 Процес лазерної обробки

Інший метод, який використовується для покращення якості поверхні деталей для друку FDM, — це лазерна обробка. Емпіричні дослідження підтвердили, що вплив CO₂-лазера на надруковану поверхню дає відчутне збільшення шорсткості поверхні. Принцип, що лежить в основі цієї техніки, залежить від швидкого підвищення температури матеріалу та подальшого плавлення, викликаного випромінюванням CO₂-лазера. Ця підвищена температура запускає процес фотохімічної абляції, ефективно перетворюючи твердий матеріал у газоподібний стан за допомогою сублімації. Цей процес призводить до усунення нерівностей поверхні, завдяки чому рельєф стає більш гладким.

Експерименти показали, що, на відміну від PLA, ABS не демонструє значного покращення гладкості поверхні через обробку CO₂-лазером, що робить цей метод більш придатним для компонентів, надрукованих PLA [21]. Приклад Lambiase та ін. [36], використовуючи лазер потужністю 30 Вт, продемонстрував, що лазерні шляхи, що перекриваються, дають надзвичайно гладкі поверхні без

паралельних канавок. Примітно, що лазерна обробка досягає своєї ефективності шляхом розплавлення пікових нерівностей і заповнення поверхневих пор розплавленим полімером, ефективно усуваючи шорсткість поверхні [21].

Вплив лазерної обробки виходить за межі якості поверхні, проникаючи в механічні властивості. Чен та ін. [21] провели лазерну обробку композиту PLA, армованого мідними волокнами, що призвело до покращення не лише якості поверхні, але й механічних властивостей. Використовуючи лазер потужністю 5 Вт з діаметром променя 200 мкм, оброблений зразок зафіксував зменшення шорсткості поверхні на 91%. Крім того, межа міцності на розрив зросла на 25,6%, а модуль Юнга показав збільшення на 34,1% порівняно з необробленими аналогами.

Ефективність лазерної обробки не обмежується окремими типами волокон. Подібні переваги були помічені в армованих Al волокном PLA композитах, виготовлених за допомогою FDM. Вплив лазера призводив до розриву полімерного ланцюга і плавлення поверхні, в результаті чого розплавлений матеріал заповнював пустоти. Подальше охолодження затверділо матеріал, тим самим зробивши поверхню більш гладкою [21]. Як показано на рисунках 16a і 16c, топографії неполірованої поверхні композитів Cu/PLA та Al/PLA мають нерегулярні піки. І навпаки, на малюнках 16b і 16d показано більш гладкі поверхні, створені полірованими лазером композитами Cu/PLA та Al/PLA, що показує ефективність цієї методики обробки.

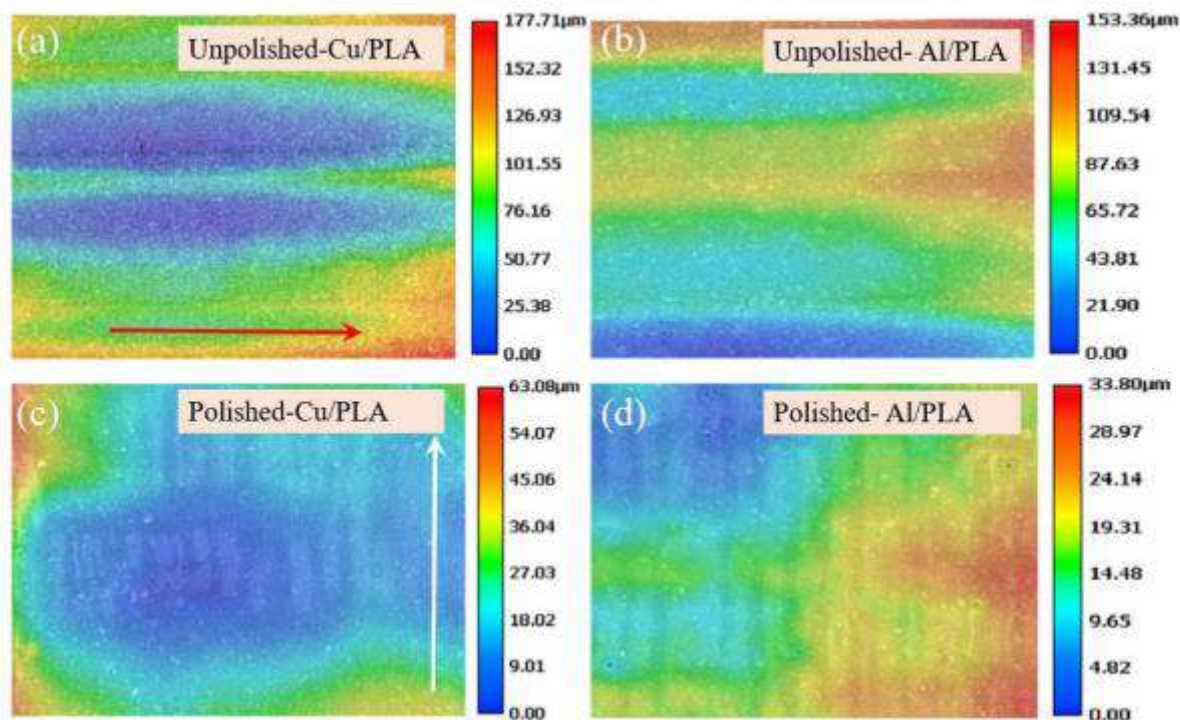


Рисунок 1.16 – Топографії поверхні: (a) неpolірованого зразка Cu/PLA; (b) полірований лазером зразок Cu/PLA зі зниженою шорсткістю поверхні; (c) неpolірований зразок Al/PLA; (d) полірований лазером зразок Al/PLA зі зниженою шорсткістю поверхні. (a,c): [37], (b,d): [21].

Емпіричні результати показують потенціал лазерної обробки, яка виконується за оптимальних параметрів. Результат лазерної обробки, з точки зору як якості поверхні, так і властивостей розтягування, краще хімічної обробки. Тому ретельне калібрування параметрів лазерної обробки може дати суттєвий прогрес у порівнянні з методологіями хімічної обробки.

Недавній крок у цьому напрямку було зроблено AREVO, технологічним підприємством зі штаб-квартирою в Каліфорнії. Інноваційний підхід AREVO базується на виготовленні армованих волокнами термопластичних композитів, що характеризуються мінімальним вмістом порожнин. Суть цієї методології зосереджена навколо використання лазерного джерела тепла для стимулювання плавлення термопластичної нитки, армованої суцільним волокном. Згодом цей розплавлений матеріал вміло ущільнюється катком, започатковуючи будівництво складних і міцних тривимірних структур. Ця передова технологія має величезні

перспективи в аерокосмічному, будівельному та транспортному секторах, де вміння створювати складні високоміцні конструкції має першочергове значення [38]. Прагнення до реалізації складних і стійких конструкцій особливо добре резонує в цих галузях.

1.5.3. Процес термічної обробки: відпал

Термічний відпал, видатна техніка, широко використовується для підвищення міцності та цілісності поверхні компонентів, виготовлених FDM. Ця методологія пост-обробки привернула численні дослідження, які вивчають її вплив на механічні характеристики полімерів і композитів. У кількох дослідницьких роботах було виявлено, що термічний відпал підвищує міжшарову в'язкість полімерів, роблячи їх характеристики кращими, ніж у зразків для лиття під тиском [21].

Singh et al. [39] досліджували вплив термічної обробки на надруковані на ABS компоненти. Це емпіричне дослідження виявило суттєві покращення характеристик поверхні — шорсткість поверхні та горезвісний ефект сходів значно зменшилися після відпалу. Суть цього вдосконалення полягає в збільшенні щільності термічною обробкою, для пом'якшення міжшарових пустот і створення більш гладкої текстури поверхні. Порівняння необроблених і термічно оброблених зразків ABS, що показане на рисунку 20с,f, підкреслює цю трансформацію. SEM-зображення додатково пояснюють посилене растрове з'єднання, досягнуте за допомогою відпалу.

Першорядне значення має взаємодія між температурою відпалу та кінцевими результатами. Коли температура відпалу наближалася до температури склування, ABS демонстрував контрольоване плавлення. Супутнє зниження в'язкості в цій точці переходу спричинило зменшення молекулярного поверхневого натягу, тим самим полегшуючи потік матеріалу на поверхні. Це

явище оплавлення організувало заповнення існуючих пустот, проміжків і ефекту сходів, вкладених у шари, завдяки чому стала покращена обробка поверхні та покращені механічні властивості. Дослідження, що охоплюють температурний спектр 105–125 °С, показали збільшення міцності на розтяг, вигин і ударну міцність. Таким чином, було підтверджено, що температура відпалу мала величезний вплив на кінцевий результат, тоді як тривалість відпалу була незначною [40].

Термічний відпал досліджується з FDM на основі PLA, враховуючи наявність PLA у цій галузі. Hong та ін. [41] показали потенціал термічного відпалу на механічні властивості, зокрема на міцність на згин і стиск. Було виявлено складну взаємодію, в якій більш високі температури та тривалий вплив призвели до посиленого міжшарового зв'язку. Примітно, що пік міцності зв'язку між шарами спостерігався у зразках, підданих 140 °С протягом 600 секунд, як показано на рисунку 17a,b. Різкий контраст з'явився на поверхні зламу та з'єднанні ниток відпалених зразків PLA (рис. 17d,e), що демонструє ефективність термічної обробки у зміцненні зв'язку між растрами та шарами. Підвищення міцності відбувається за рахунок пластичності.

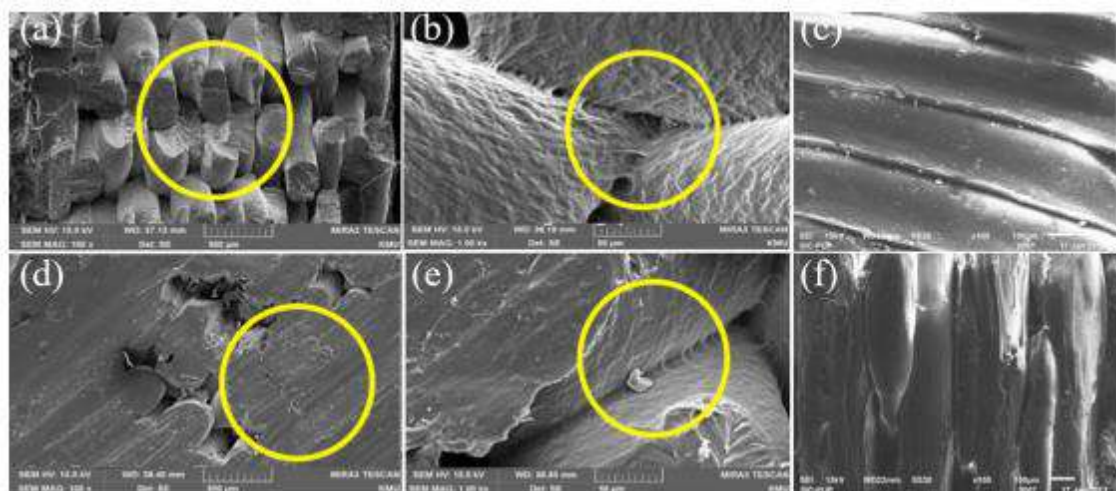


Рисунок 1.17 - (a) Поверхня зламу необробленого зразка PLA. (b) Зв'язок між нитками PLA необробленого зразка. (d) Поверхня зламу відпаленого зразка PLA. (e) Зв'язок між нитками PLA відпаленого зразка. (c) Поверхня необробленого зразка ABS. (f) Поверхня відпаленого зразка ABS. Термічно оброблені зразки збільшували шар і растрову адгезію. (a,b,d,e): [41], (c,f): [40].

Akhoundi et al. досліджували структурну еволюцію PLA під час термічного відпалу. Аналіз рентгенівської дифракції (XRD) показав перехід від аморфних до напівкристалічних доменів після відпалу. Мікроскопічне дослідження підтвердило посилене зв'язування растру з шаром і помітну нестачу помітних мікроструктурних пустот. Подальші висновки Wach et al. звернули увагу на деталізований вплив температури: підвищені температури породжували менші кристаліти в PLA, тоді як нижчі температури спонукали до утворення більших кристалів. Незважаючи на дихотомію, схожі результати згинання були очевидними. Основним виявленням стало те, що деталь, піддана 95 °C протягом 15 хвилин у печі диференціальної скануючої калориметрії (DSC), продемонструвала підвищення міцності на вигин на 11–17 % [21].

Розширюючи область до армованих волокнами композитів, трансформаційний потенціал відпалу виходить за межі полімерної матриці, проникаючи через зв'язки матриці-наповнювача. Бхандарі та ін. показали посилення міжшарової міцності на розтяг у коротких вуглецевих волокнах (CF), армованих PLA та PETG композитами. Міцність на розрив обох композитів зросла вдвічі і втричі відповідно. Паралельне дослідження Rangisetty et al., що охоплює ABS, PLA та PETG з армованим CF, показав різні температури склування та температури відпалу. Результати проявилися у збільшенні на 16,8% у армованому CF PLA, на 3,34% у армованому CF ABS та на 12,4% у армованому CF PETG, що показує роль термічної обробки в забезпеченні підвищеної міцності разом з пластичністю [21].

Підсумовуючи, основою теплового відпалу є його потенціал посилювати кристалічність і зміцнювати міжшарові зв'язки. Цей зв'язок показує суть підвищеної міцності оброблених зразків із незначною похибкою в пластичності. Розумний вибір оптимальної температури та тривалості стає основним фактором у використанні механічних переваг термічної обробки при збереженні основних пластичних властивостей.

1.6 3D - друк полімерами

Напівкристалічні полімери є переважним вибором для друку методом селективного лазерного спікання (SLS), керуючись певними критеріями. Ці критерії охоплюють широкий температурний діапазон, що забезпечує плавлення полімеру при нагріванні та рекристалізації при охолодженні, обмежений перехід у розплав і та значну ентальпію плавлення для зменшення небажаного спікання, викликаного теплопровідністю. Крім того, поверхневий натяг частинок повинен бути достатнім, щоб запобігти злиттю частинок, незважаючи на те, що порошок витримується при температурах, що значно перевищують точку склування, протягом тривалого часу. Універсальність поширюється на можливість працювати як зі склоподібними, так і з еластичними деталями, при цьому умови попереднього нагрівання та лазерного спікання можуть адаптуватися до температур плавлення конкретного матеріалу. Аморфні полімери, такі як полікарбонат або полістирол, дозволяють створювати більш пористі структури порівняно з напівкристалічними аналогами. Однак армуючі добавки, такі як полі(стирол-акрилонітрил) або ABS, можуть зміцнити крихкі деталі, в той час як аморфні полімери демонструють мінімальне скорочення розмірів через знижену температуру процесу. Використання поліметилметакрилату (PMMA), хоч і широко поширене в різних сферах застосування, лише недавно стало використовуватися для 3D-друку. Запаси високоякісних полімерів мають важливе значення. Хоча набір полімерів для SLS розширюється, він залишається помітно вже ніж діапазон, доступний для лиття під тиском і екструзії [42].

Щоб поліпшити властивості і зовнішній вигляд друківаних деталей, полімерні порошки можна включати різні наповнювачі, такі як діоксид кремнію, алюміній, вуглецеве волокно і скло. Проблеми виникають при досягненні рівномірного розподілу наповнювача у змішаних порошкових системах, що характеризуються відмінностями у розмірах та щільності частинок. Складні взаємодії визначають ефективність матеріалу при виробництві полімерного

порошку, так і при його взаємодії з процесом SLS. В даний час сучасні досягнення в області SLS показують, що на механічні властивості матеріалу явно впливають його орієнтація та умови обробки цього пристрою [42]. Примітно, що один матеріал, що використовується на різних пристроях, дає різні результати. Хоча деякі матеріали, такі як PA12, демонструють певну гнучкість у цьому відношенні, перехід від друкованих структур на основі моделей до функціональних компонентів, надрукованих на 3D принтері, залишається проблемою. Проте робляться відчутні кроки для вирішення цієї проблеми.

Паралельна технологія під назвою «Вибіркове теплове спікання» (SHS) використовує термодрукуючу голівку замість лазера для плавлення порошкоподібних термопластів, аналогічні методології SLS. Цей процес надає альтернативний шлях до створення складних структур.

Додатковою технологією адитивного виробництва, яка має подібність як із селективним лазерним спіканням, так і з багатоструменевим друком, є процес струменевого друку сполучного. Саме цьому методу приписують появу терміну «3D-друк», який входить у спектр методів адитивного виробництва. У цьому процесі рідке сполучне ретельно розподіляється по поверхні шару порошку за допомогою точної друкувальної головки. Сполучне встановлює з'єднання виключно між відкритими частинками, що досягаються зварюванням розчинником, або хімічними реакціями, без необхідності термічної обробки. Таке підвищення ефективності обумовлено відсутністю циклу охолодження та можливістю переробки неекспонованого порошку. Порошок може містити полімери або інші матеріали, а асортимент сполучних речовин знаходиться в розпорядженні в залежності від обраного порошку. У деяких випадках сполучною є розведений розчин полімеру. Розміри шарів повинні бути обмежені, щоб забезпечити ефективне зв'язування між послідовними шарами та одночасно досягти задовільного дозволу по осях x/y. Спектр доступних для вибору полімерних порошкових матеріалів ширший порівняно з SLS багато в чому завдяки обходу обмежень термічної обробки. Однак випадки, пов'язані з компонентами, звареними розчинником, або додатки, в яких використовуються

клеї на основі розчинника, вимагають розгляду стійкості до розчинників. Використання мультидрукованих головок, що розподіляють різні кольори, дозволяє виготовляти змішані різнокольорові об'єкти. Проте, кінцеві продукти мають помітну пористість, що потенційно вимагає введення реагуючої смоли або воску для надання відповідної обробки поверхні і структурної міцності [42].

Виготовлення плавлених ниток (FFF), також відоме як моделювання плавленням осадження (FDM), з'явилося на початку 1990-х як альтернативний метод 3D-друку, який, як і SLS, використовує попередньо сформовані полімерні матеріали в якості будівельних блоків. Однак FFF вимагає витрат енергії на етапі попереднього осадження, перетворюючи полімерний матеріал в розплавлений стан, що застосовується через голівку або сопло тонкого друку. Цей метод відображає екструзію чи лиття під тиском, усуваючи необхідність у прес-формах. Підняті камери складання можна використовувати для пом'якшення теплових викривлень, що виникають через нерівномірне охолодження. FFF забезпечує дещо більший ступінь анізотропії властивостей матеріалу порівняно з методологіями друку SLA та SLS. Щоб усунути спрямовані відмінності у міцності та ударній в'язкості, що виникають через те, що міжшарове з'єднання менш міцне, ніж міцність усередині шару, був використаний метод післядрукарської обробки з використанням гамма-випромінювання. Це випромінювання сприяє утворенню поперечних зв'язків усередині та між шарами, надрукованими FFF. Оскільки екструзія розплаву полімеру вимагає використання переполімерів, що переробляються в процесі FFF, іонізуюче випромінювання являє собою шлях для перетворення термопластичного полімеру в готовий термореактивний друкований компонент [42]. Цей перехід не тільки призводить до більш однорідних механічних властивостей, але також забезпечує підвищену стійкість до розчинників, що є ключовим фактором у біомедичних та суміжних додатках.

Техніка виготовлення плавлених ниток (FFF) базується на термічно оборотній реакції Дільса–Альдера, що забезпечує нагрітий потік полімерного матеріалу з подальшим утворенням ковалентного зв'язку після охолодження. Цей

механізм служить для зміцнення структурної цілісності між послідовно нанесеними шарами при конструюванні 3D-об'єктів [43]. Процес FFF може включати кілька друкуючих голівок, забезпечуючи одночасний друк тимчасових опорних структур для складних нависаючих конструкцій. Це також дозволяє використовувати кілька кольорів або різні будівельні матеріали в одній частині.

Більшість комерційних пристроїв FFF сумісні з термопластичними матеріалами, такими як ABS або PLA, що постачаються у формі волокна з котушок. Інші альтернативні матеріали охоплюють поліамід, полікарбонат, ударостійкий полістирол, поліефірід, поліоксиметилен, поліфенілсульфон і низку полімерних сумішей. Останні досягнення розширили вибір матеріалів, охопивши поліетилен із надвисокою молекулярною вагою та інші полімерні суміші [42]. Більш широка сумісність матеріалів у підході FFF у порівнянні з процесами SLS дозволяє розглядати можливість використання навіть перероблених товарних полімерів [42]. Порівняно з фарбами для струминного друку, нанопаповнювачі можуть бути включені, щоб викликати характеристики розрідження при зсуві. Проте безперервна природа нитки FFF унікально дозволяє інтегрувати мікроскопічні наповнювачі з високим співвідношенням сторін для збільшення механічної міцності полімеру шляхом вирівнювання всередині нитки. Зокрема, такі матеріали, як карбід кремнію та вуглецеве волокно, з розмірами від $0,65 \text{ мкм} \times 12 \text{ мкм}$ до $10 \text{ мкм} \times 220 \text{ мкм}$, були інтегровані з епоксидною смолою. Ця смола потребує термічної обробки після друку для остаточного затвердіння, одержуючи друковані компоненти з механічними властивостями, які перевершують властивості звичайно формованих зразків ненаповненої основної смоли [44]. Така термічна обробка в поєднанні з макетом друку пом'якшує анізотропний характер друкованих деталей.

Хоча існує детальний розгляд таких факторів, як падіння тиску та охолодження кульок під час екструзії розплаву полімеру з сопла та його подальшої конденсації з прилеглим матеріалом, відносно простий підхід FFF «розплавлення-нанесення-затвердіння» залишається домінуючим. Цей підхід представляє переважаючу версію 3D-друку та основну частину споживчих,

економічно ефективних пристроїв. Аналогічний підхід, заснований на принципах FFF, використовує смоли достатньої в'язкості, притаманну самій смолі або через додані наповнювачі, для отримання екструдованої нитки. Ця нитка може бути швидко затвердіти на місці за допомогою реакцій гелеутворення, сушіння або фотополімеризації. Прикладом цього підходу є виготовлення безперервних мікроструктур за допомогою екструзії смоли в поєднанні з УФ-затвердінням [42].

Міністерство енергетики США, зацікавлене в ефективності виробництва та енергетичних аспектах, досягло друку повномасштабної робочої копії електромобіля Shelby Cobra. Це чудове досягнення було продемонстровано на Північноамериканському міжнародному автосалоні в Детройті 2015 року. Рама автомобіля, кузов та інші компоненти загальною вагою 500 фунтів були виготовлені з термопластику ABS з додаванням 20% вуглецевого волокна. Процес друку було здійснено на великій площі аддитивного виробництва (ВААМ) Національної лабораторії Оук-Ріджа, яка має простір розміром $20 \times 8 \times 6$ футів і поперечний переріз нанесення матеріалу, що значно перевищує звичайні розміри нитки. Цікаво, що споживання енергії, пов'язане з 3D-друком цього автомобіля, було помітно нижчим порівняно зі звичайними методами виробництва автомобілів [42].

1.7 Метали та сплави в адитивному виробництві

Сфера виробництва металевих домішок переживає час змін. Кількість компаній, що пропонують системи адитивного виробництва, зросла з 49 у 2014 році до 97 у 2016 році, майже половина з яких займається виробництвом металу [45]. Ця технологія, яка колись в основному використовувалася для досліджень, створення прототипів і передових аерокосмічних застосувань (наприклад, виробництво F-15 Pylon Rib компанією Boeing) [46], тепер проникла в різні сектори, включаючи біомедицину, оборону та автомобільну промисловість.

Вражаючою особливістю металу АМ є його виняткова здатність створювати складні геометрії та спеціальні з'єднання, які звичайні технології виробництва важко відтворити. Це особливо дає змогу створювати багатофункціональні компоненти, здатні одночасно вирішувати проблеми конструкції, захисної техніки та ізоляції.

1.8 Порівняльний аналіз різноманітних матеріалів для 3D-друку

Швидка еволюція технологій адитивного виробництва призвела до можливості 3D-друку широкого спектру матеріалів, від шоколаду до передових багатофункціональних речовин. Цей сплеск призвів до появи матеріалів у різних формах, таких як нитки, дроти, порошки, пасти, листи та чорнила, які можна використовувати для 3D-друку.

Серед них полімери набули популярності та є найпоширенішими матеріалами, розробленими для галузей промисловості, включаючи аерокосмічну, автомобільну, спортивну, медицину, архітектуру та навіть іграшки. Полімери, які використовуються в 3D-друку, переважно існують у вигляді волокон у методі моделювання плавленого осадження, у вигляді порошків або допоміжних зв'язуючих речовин у підході порошкового шару або у вигляді смол у стереолітографії. Термопластичні полімери, такі як сополімери акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS), поліамід (PA), полікарбонат (PC) і полімолочна кислота (PLA), а також термореактивні порошки, такі як полістирол, поліаміди та фотополімерні смоли, є переважаючими полімерами. типи в 3D-друку. У той час як 3D-друковані полімери в основному використовуються для швидкого прототипування через їх обмежені механічні властивості, останні досягнення запровадили посилення полімерів волокнами та наноматеріалами з метою покращення їх механічних властивостей для несучих або функціональних компонентів [47].

Адитивне виробництво пропонує переваги щодо зменшення відходів дорогих металів, таких як титан, у порівнянні з традиційними методами. Крім того, він усуває етап складання, зменшує ризики, пов'язані з локальними навантаженнями в процесі складання, і значно збільшує свободу проектування. Такі сектори, як аерокосмічна, оборонна та автомобільна промисловість, використовують 3D-друк металів і сплавів для виробництва складних компонентів різних розмірів. Метали переважно мають форму порошків або дроту. Вибіркове лазерне спікання (SLS), селективне лазерне плавлення (SLM) і спрямоване енергетичне осадження (DED) є основними методами 3D-друку, усі вони засновані на злитті порошків шляхом плавлення або спікання за допомогою лазерного або електронного променя. Враховуючи обмежений спектр металів і сплавів, спочатку придатних для 3D-друку, поточні дослідження та розробки спрямовані на розширення репертуару доступних сплавів і полімерно-металевих композитів, розширення застосовності існуючих методів до більш широкого спектру матеріалів і розвиток композитних структур [48]. Тим не менш, такі проблеми, як пористість, скупчення кульок, властивості матеріалу та варіації форми залежно від орієнтації деталей, продовжують обмежувати потенціал 3D-друку з металу. Тим не менш, зусилля щодо вдосконалення параметрів обробки та обробки після обробки тривають.

Поява кераміки, надрукованої на 3D-друку, спричинила тенденцію до матеріалів спеціального дизайну, які мають високе співвідношення міцності та ваги, що дозволяє створювати складні керамічні решітки для різноманітних застосувань. Розробка надійних і універсальних керамічних каркасів із складними конфігураціями для тканинної інженерії є ключовим додатком. Кераміка в основному друкується 3D-друком у вигляді порошку або чорнила.

У сфері 3D-друку порошки консолідуються за допомогою лазерів або склеюються разом за допомогою допоміжних клеїв. І навпаки, струменевий друк використовує суспензії керамічних частинок з наступною обробкою, як-от високотемпературне спікання. Загальною проблемою є обмежений спектр матеріалів, які зараз доступні для керамічного 3D-друку, у поєднанні з

проблемами щодо точності розмірів і загальної якості. Позитивним моментом є те, що 3D-друк у сфері кераміки забезпечує чудовий контроль над мікроструктурою та складом деталей. Отже, шляхи вдосконалення технологій адитивного виробництва і розширення асортименту матеріалів, доступних для керамічного 3D-друку, залишаються готовими для дослідження [47].

Незважаючи на те, що впровадження 3D-друку в будівельній індустрії просувається поміркованими темпами, привабливі перспективи масової кастомізації, усунення опалубки та автоматизації віщують майбутнє області. Серед методів 3D-друку екструзія є основним методом виробництва добавок для бетону, хоча дослідження підходів порошкового шару також ведуться. Однак тип бетону, який піддається 3D-друку, може значно відрізнитися. Наприклад, бетон, який можна перекачувати, придатний для екструзії, може не мати необхідної стабільності форми та точності розмірів після друку. Подібним чином бетон, що самоущільнюється, може зіткнутися з проблемами у підтримці своєї форми в безформовій сфері 3D-друку. Крім того, вкрай важливо вирішити такі проблеми, як видимість шару за шаром, анізотропні механічні властивості та неоптимальне зчеплення між шарами [47]. Незважаючи на ці перешкоди, потенціал свободи проектування та здатність будувати складні, легкі конструкції залишається багатообіцяючим.

У сучасну еру технологій 3D-друку можливість тонкого налаштування багатофункціональних атрибутів виготовлених деталей можлива завдяки стратегічному впровадженню різних матеріалів і точному контролю над їх розміщенням. Деякі системи дозволяють змінювати матеріал між шарами, а інші навіть полегшують зміну матеріалу в межах одного шару. Однак певні обмеження існують. Наприклад, струменеві системи високого тиску можуть ефективно поєднувати лише полімери, які демонструють похвальну текучість і однакові температури твердіння. Подібним чином методи на основі екструзії, такі як моделювання плавленого осадження, можуть змішувати лише матеріали з однаковими температурами плавлення. Цікавим є те, що в центрі уваги все більше привертають багатоструменеві методи FDM, зокрема в програмах біодруку та

створенні складних гідрогелевих каркасів, переплетених із клітинами, для імітації тканинних матриць. Крім того, такі технології, як спрямоване осадження енергії (DED), дозволяють поєднувати металеві сплави або кераміку, розширюючи перелік матеріалів, придатних для одночасної екструзії. Тим не менш, пильний розгляд має першорядне значення, щоб запобігти небажаному утворенню фаз на межі розділу різнорідних матеріалів.

2 ТЕХНІЧНЕ ТА МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1 Характеристика принтеру

Для створення зразків використовувався принтер FDM компанії Profi+ (рис. 2.1). Принтер має кінематику Prusa; розмір робочого столу – 260x260 мм; максимальна висота – 180 мм; температура столу максимум – 120°C; температура сопла максимум – 265°C; стіл має напругу – 220В; принтер має напругу – 12В.



Рисунок 2.1 – Принтер компанії Profi+

2.2 Матеріал дослідження

У дослідженні використовувався матеріал: Plexiwire NYLON Filament $\varnothing 1,75$ ISO1133-1:2011 (рис. 2.2).

Оскільки Nylon швидко та інтенсивно поглиблює вологу, його слід зберігати у герметичних пакетах, хоча це не завжди вирішує проблему. Тому рекомендується перед початком роботи слід просушити нейлон. Процес висушування проводили за допомогою електротермічного обладнання "ЕЛЕКТРОТЕРМ" з напругою 220 В та максимальною температурою 250 °С.



Рисунок 2.2 – Матеріал дослідження [49]

На офіційному сайті виробника "Plexiwire" рекомендовано висушувати матеріал при температурі 80 °С протягом трьох годин. У випадку, якщо матеріал насичен вологою, під час друку це може впливати на якість друку. Крім того, матеріал може відійти від столу, що призводить до поганого вигляду та якості готових виробів.

2.3 Характеристика печі для термообробки

Для проведення експерименту термообробки нейлону і подальшого покращення його властивостей використовувалась піч (рис. 2.3) з такими характеристиками: потужність 900W; напруга 220В; максимальна температура 250°С; внутрішній розмір 240 × 205 × 183мм.



Рисунок 2.3 – Фото печі для термообробки

За допомогою тепловізору UNI-T UTi120S (рис. 2.4) на рис. 2.5 маємо наглядне зображення як проходить розподіл тепла у робочій зоні печі.



Рисунок 2.4 – Тепловізор UNI-T UTi120S [50]

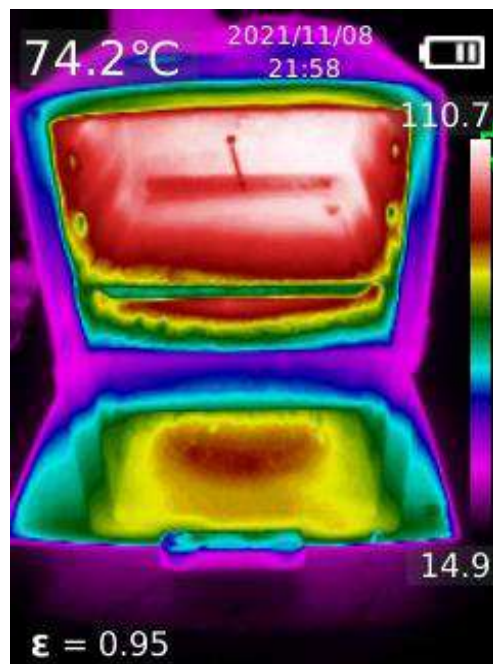


Рисунок 2.5 – Розподіл температури у печі

2.4 Геометричні параметри зразків

3D модель була зроблена та спроектована за допомогою програми NX CAD, ескіз надано на рис. 2.6.

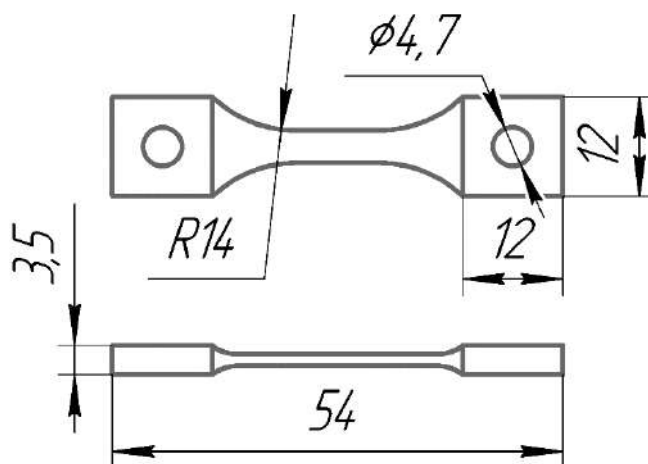


Рисунок 2.6 – Ескіз зразка

2.5 Створення G-коду

Нарізка деталі створювалась за допомогою програми слайсера (рис. 2.7) компанії Prusa «Prusa-Slicer», також за допомогою неї генерувався G-код для принтеру.

Параметри друку для створення зразків мали такі значення: 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 і кількість суцільних стінок (нижніх і верхніх) 4 .

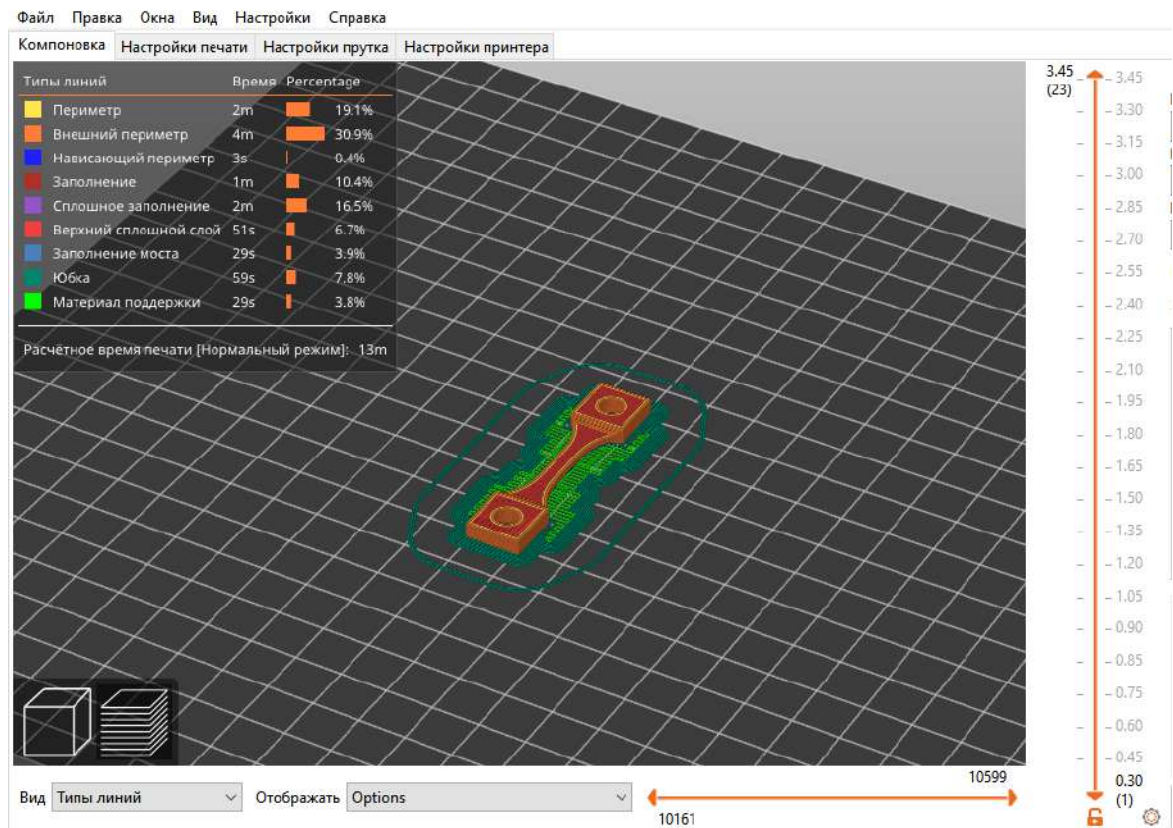


Рисунок 2.7 – Програма слайсер

2.6 Інструмент для контролю розміру

Контроль розміру зразків перевіряли, використовуючи електронний цифровий штангенциркуль Digital Caliper (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 - Електронний цифровий штангенциркуль Digital Caliper [51].

2.7 Надруковані зразки з нейлону

На рисунку 2.9 показано зовнішній вигляд зразків надрукованих на 3D принтері. Отвори у зразках зроблені для того, щоб у подальшому дослідженні їх можно було закріпити у спеціальному випробувальному пристрої на розрив (рис. 2.10).

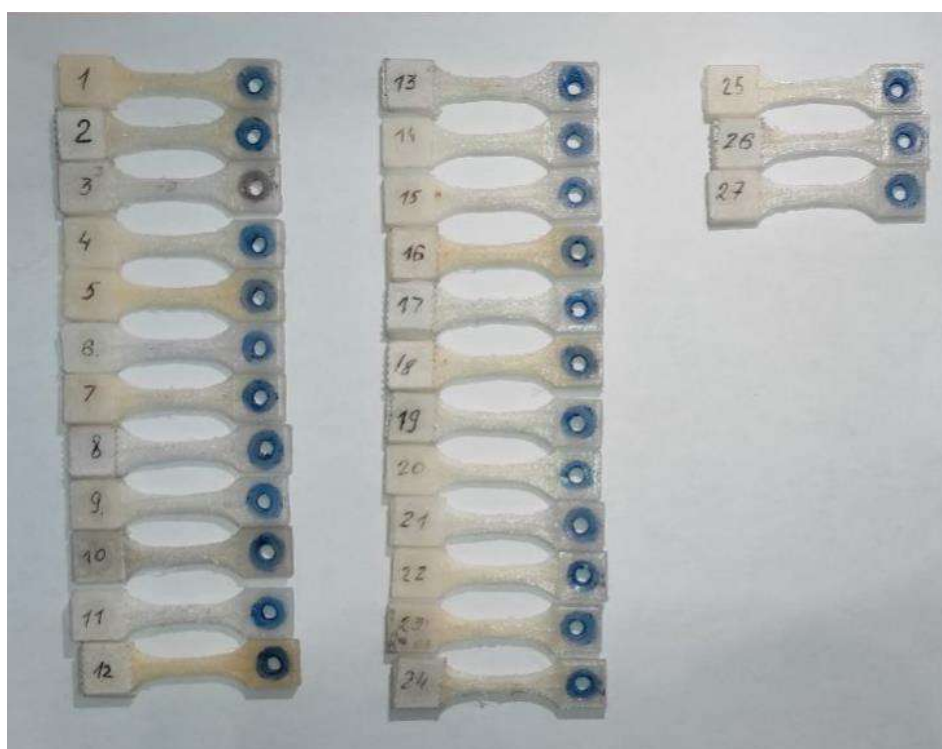


Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд зразків отриманих на 3D принтері

2.8 Випробувальна машина

Універсальна сервопривідна випробувальна машина UIT STM 100S зображена на рис. 2.10. Призначена для визначення механічних характеристик матеріалів та виробів з максимальним навантаженням до 100 кН.



Рисунок 2.10 – Випробувальна машина UIT STM 100S [52]

Технічні характеристики випробувальної машини UIT STM 100S наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики випробувальної машини UIT STM 100S

Максимальне навантаження	100кН
Клас точності тензодатчика	0,5
Діапазон вимірювань	від 400Н до 100кН
Точність переміщення траверси	0,015мкм
Повторюваність переміщення	1мкм
Діапазон вимірювання деформації	від 2% до 100%
Точність вимірювання деформації	±0,2%
Діапазон швидкості переміщення траверси	0,0005...1000 мм/хв
Максимальне переміщення траверси на розтяг	600мм
Максимальне переміщення траверси на стиск	600 мм
Частота дискретизації	1кГц
Розрядність цифрових перетворювачів	24біт
Тензодатчик, номінальна сила	100кН
Затискачі	клиновий тип
Габаритні розміри	1010×750×2210мм
Вага випробувальної машини	1100кг
Напруга живлення	380В

Положення зрізків у випробувальній машині та їх закріплення можемо побачити на рис. 2.11



Рисунок 2.11 – Закріплення та положення зразка у випробувальній машині

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Параметри експериментального дослідження

Для оптимізації витрат часу та ресурсів був проведений дробний факторний експеримент для аналізу впливу параметрів термічної обробки для покращення функціональних властивостей виробів, виготовлених з інженерного філаменту NYLON. Методологія дослідження відповідає теорії планування експерименту для дробних факторних експериментів типу 3^{4-1} (3-х рівневий відбір). У таблиці 3.1 представлена матриця планування проведеного експерименту.

Таблиця 3.1 – Матриця планування дробного експерименту

Standard Run	3 ^{**} (4-1) fractional factorial design, 1 block , 27 runs			
	Темп., °C	Витримка, хв	Положення	Охолодження
1	130	60	торцем	відразу
2	110	90	по довжині	від температури t/2
3	90	30	по довжині	від температури t/2
4	110	90	торцем	відразу
5	130	60	по довжині	від температури t/2
6	90	30	ребром	впаде до 20°C
7	130	60	ребром	впаде до 20°C
8	90	30	торцем	відразу
9	110	90	ребром	впаде до 20°C
10	90	60	по довжині	впаде до 20°C
11	90	60	ребром	відразу
12	130	90	торцем	від температури t/2
13	110	30	ребром	відразу
14	110	30	по довжині	впаде до 20°C
15	110	30	торцем	від температури t/2
16	130	90	по довжині	впаде до 20°C
17	90	60	торцем	від температури t/2
18	130	90	ребром	відразу
19	110	60	ребром	від температури t/2
20	110	60	по довжині	відразу
21	90	90	торцем	впаде до 20°C
22	110	60	торцем	впаде до 20°C
23	130	30	ребром	від температури t/2
24	130	30	по довжині	відразу
25	130	30	торцем	впаде до 20°C
26	90	90	ребром	від температури t/2
27	90	90	по довжині	відразу

Після завершення практичної частини, визначення відхилення від розміру та отримання даних їх міцності надано на рисунку 3.1 у відповідними даними для подальшого аналізу.

Standard Run	3**(4-1) fractional factorial design, 1 block , 27 runs					
	Темп., °C	Витримка, хв	Положення	Охолодження	Відхилення, %	σ , МПа
1	130	60	торцем	відразу	2,4	58,10
2	110	90	по довжині	від температури t/2	3,6	53,61
3	90	30	по довжині	від температури t/2	0,0	50,25
4	110	90	торцем	відразу	4,8	51,28
5	130	60	по довжині	від температури t/2	2,4	57,45
6	90	30	ребром	впаде до 20°C	-2,6	51,79
7	130	60	ребром	впаде до 20°C	4,8	59,45
8	90	30	торцем	відразу	4,8	49,33
9	110	90	ребром	впаде до 20°C	3,6	53,68
10	90	60	по довжині	впаде до 20°C	0,0	50,55
11	90	60	ребром	відразу	3,6	50,01
12	130	90	торцем	від температури t/2	2,4	58,55
13	110	30	ребром	відразу	2,4	52,10
14	110	30	по довжині	впаде до 20°C	3,6	51,89
15	110	30	торцем	від температури t/2	2,4	51,42
16	130	90	по довжині	впаде до 20°C	0,0	55,20
17	90	60	торцем	від температури t/2	1,2	50,31
18	130	90	ребром	відразу	2,4	54,28
19	110	60	ребром	від температури t/2	-2,6	52,31
20	110	60	по довжині	відразу	3,6	51,95
21	90	90	торцем	впаде до 20°C	2,4	52,92
22	110	60	торцем	впаде до 20°C	4,8	54,21
23	130	30	ребром	від температури t/2	2,4	55,10
24	130	30	по довжині	відразу	0,0	53,22
25	130	30	торцем	впаде до 20°C	3,6	53,48
26	90	90	ребром	від температури t/2	-2,6	52,28
27	90	90	по довжині	відразу	2,4	52,18

Рисунок 3.1 – Отримані дані

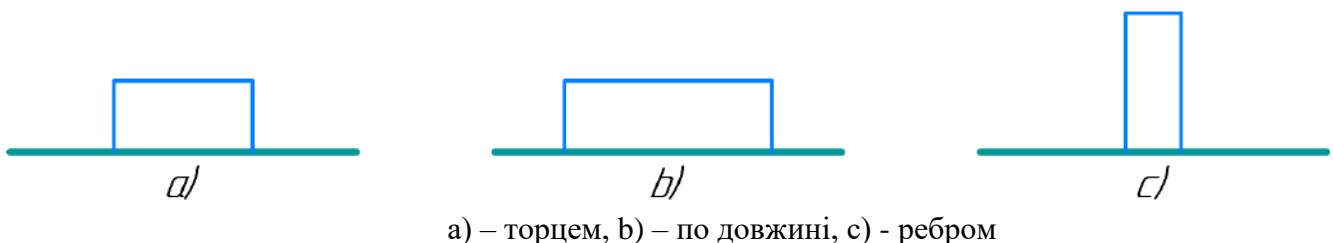


Рисунок 3.2 – Положення зразків у печі

3.2 Вплив параметрів термічної обробки на геометрію зразків

На підставі аналізу дисперсії та огляду діаграм Паретто проведено статистичну обробку експериментальних даних, що дозволило визначити найбільш значущі статистичні фактори, які впливають на геометрію зразків.

Результат дисперсійного аналізу показано на рис. 3.3, 3.4. яка показує вплив різних заданих незалежних факторів на відхилення.

Factor	DV: Відхилення, %				
	SS	df	MS	F	p
(1)Темп., °C(L)	6,9689	1	6,96889	2,026451	0,180059
Темп., °C(Q)	9,6267	1	9,62667	2,799293	0,120153
(2)Витримка, хв(L)	0,3200	1	0,32000	0,093051	0,765559
Витримка, хв(Q)	0,4267	1	0,42667	0,124068	0,730772
(3)Положення(L)	16,8200	1	16,82000	4,891009	0,047148
Положення(Q)	1,5000	1	1,50000	0,436178	0,521449
(4)Охолодження(L)	16,4356	1	16,43556	4,779219	0,049348
Охолодження(Q)	0,4267	1	0,42667	0,124068	0,730772
1L by 2L	0,5556	1	0,55556	0,161547	0,694802
1L by 3L	9,3389	1	9,33889	2,715612	0,125286
1L by 4L	20,5369	1	20,53689	5,971826	0,030946
2L by 3L	3,2536	1	3,25356	0,946086	0,349917
2L by 4L	0,0889	1	0,08889	0,025848	0,874948
3L by 4L	2,6889	1	2,68889	0,781889	0,393936
Error	41,2676	12	3,43896		
Total SS	128,1600	26			

Рисунок 3.3 – Дисперсійний аналіз впливу режимних параметрів на точність зразків

На рисунку 3.3 показана складна модель дисперсійного аналізу, в якій надано незалежні параметри, а саме: температура, час витримки наших зразків у печі, положення зразків під час знаходження їх у печі та вид охолодження зразків після нагрівання їх у печі. Також, у таблиці окрім незалежних параметрів є ще їх залежність один від одного, наприклад, залежність «1L by 2L» - це залежність температури та часу витримки та їх вплив на відхилення розмірів наших зразків. Числові значення, які помічені червоним кольором мають найбільший вплив на відхилення зразків, а сірого кольору, в свою чергу, мають незначний вплив на відхилення зразків або, як це ще називають, «слабкі» значення, тому їх бажано

посилити за рахунок відсіювання найбільш низьких числових значень. Отже, аналізуємо отримані дані та спрощуємо таблицю методом видалення незначних даних.

Factor	DV: Відхилення, %				
	SS	df	MS	F	p
(1)Темп., °C L+Q	16,5956	2	8,29778	2,422920	0,127538
(2)Витримка, хв L+Q	0,7467	2	0,37333	0,109012	0,897531
(3)Положення L+Q	18,3200	2	9,16000	2,674686	0,106437
(4)Охолодження L+Q	16,8622	2	8,43111	2,461853	0,123980
1*2	0,5556	1	0,55556	0,162220	0,693666
1*3	9,3389	1	9,33889	2,726921	0,122606
1*4	17,7633	1	17,76333	5,186828	0,040308
2*4	0,0889	1	0,08889	0,025955	0,874486
3*4	2,6889	1	2,68889	0,785146	0,391669
Error	44,5211	13	3,42470		
Total SS	128,1600	26			

Рисунок 3.4 – Дисперсійний аналіз впливу режимних параметрів на точність зразків з видаленням не значних факторів

Після ігнорування і видалення незначних факторів, таблиця має наступний вигляд (рис. 3.4). На цій таблиці ми бачимо що найбільших вплив на відхилення зразків від їх початкових параметрів розміру впливає температура печі, розташування їх у пристрої для нагрівання, охолодження зразків після нагріву та залежні параметри, такі як «1*3» (температура печі та розташування зразків в печі), «1*4» (температура печі та охолодження зразків після нагріву).

Factor	DV: Відхилення, %									
	Effect	Std.Err.	t(13)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
Mean/Interc.	2,06667	0,356147	5,80285	0,000061	1,29726	2,836076	2,066667	0,356147	1,29726	2,836076
(1)Темп., °C(L)	1,24444	0,872379	1,42650	0,177298	-0,64022	3,129104	0,622222	0,436189	-0,32011	1,564552
Темп., °C(Q)	1,26667	0,755502	1,67659	0,117490	-0,36550	2,898830	0,633333	0,377751	-0,18275	1,449415
(2)Витримка, хв(L)	0,26667	0,872379	0,30568	0,764690	-1,61799	2,151326	0,133333	0,436189	-0,80900	1,075663
Витримка, хв(Q)	0,26667	0,755502	0,35297	0,729771	-1,36550	1,898830	0,133333	0,377751	-0,68275	0,949415
(3)Положення(L)	-1,93333	0,872379	-2,21616	0,045136	-3,81799	-0,048674	-0,966667	0,436189	-1,90900	-0,024337
Положення(Q)	-0,50000	0,755502	-0,66181	0,519651	-2,13216	1,132163	-0,250000	0,377751	-1,06608	0,566082
(4)Охолодження(L)	-1,91111	0,872379	-2,19069	0,047299	-3,79577	-0,026451	-0,955556	0,436189	-1,89789	-0,013226
Охолодження(Q)	0,26667	0,755502	0,35297	0,729771	-1,36550	1,898830	0,133333	0,377751	-0,68275	0,949415
1L by 2L	-0,44444	1,103481	-0,40277	0,693666	-2,82837	1,939482	-0,222222	0,551741	-1,41419	0,969741
1L by 3L	1,82222	1,103481	1,65134	0,122606	-0,56170	4,206149	0,911111	0,551741	-0,28085	2,103075
1L by 4L	2,43333	1,068441	2,27746	0,040308	0,12511	4,741561	1,216667	0,534221	0,06255	2,370780
2L by 4L	-0,17778	1,103481	-0,16111	0,874486	-2,56170	2,206149	-0,088889	0,551741	-1,28085	1,103075
3L by 4L	-0,97778	1,103481	-0,88608	0,391669	-3,36170	1,406149	-0,488889	0,551741	-1,68085	0,703075

Рисунок 3.5 – Регресійний аналіз оцінки ефектів на відхилення

Числові значення у цій таблиці (рис. 3.5) є ефектом (або оцінкою) параметрів. Рядок «Mean/Interc.» (Середній член) – це значення середнього відхилення для кожного фактору. Наприклад, у нашому випадку, якщо ми зробимо зміну фактору «1L by 4L» (температура печі та тип охолодження) на рівень вище, і тому можемо спостерігати подальше збільшення відхилення розміру наших зразків.

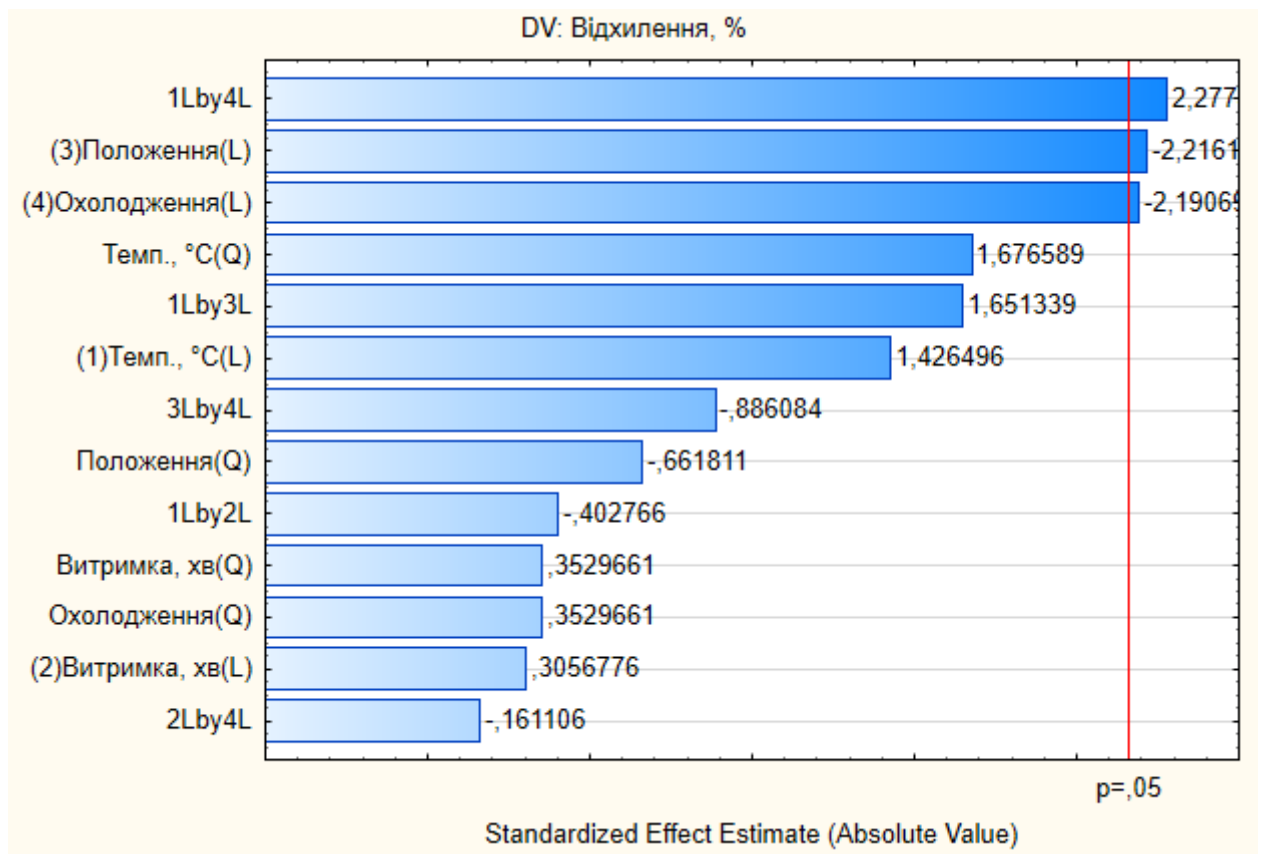


Рисунок 3.6 – Вплив параметрів на геометричне відхилення поверхонь

За даними дисперсійного аналізу та діаграмами Паретто (рис. 3.3, 3.4, 3.6) встановлено, що на геометричне відхилення поверхонь найбільший вплив мають такі параметри: положення зразку (L), спосіб охолодження зразку (L), а також взаємодія параметрів «1Lby4L» (Температура печі та спосіб охолодження). Найменший вплив на геометричне відхилення поверхонь мають параметри, які знаходяться поза червоної межі, а саме: температура (Q), температура (L), положення (Q), витримка (Q), охолодження (Q), витримка (L), а також взаємодія параметрів «1Lby3L» (температура печі та положення зразку), «3Lby4L»

(розташування зразка та спосіб охолодження), «1Lby2L» (температура печі та час термообробки), «2Lby4L» (час термообробки та спосіб охолодження).

Аналіз даних виконується шляхом застосування визначеної математичної моделі, а оцінка її ефективності проводиться через порівняння графіку очікуваних та фактичних значень для функції реакції (рис. 3.7).

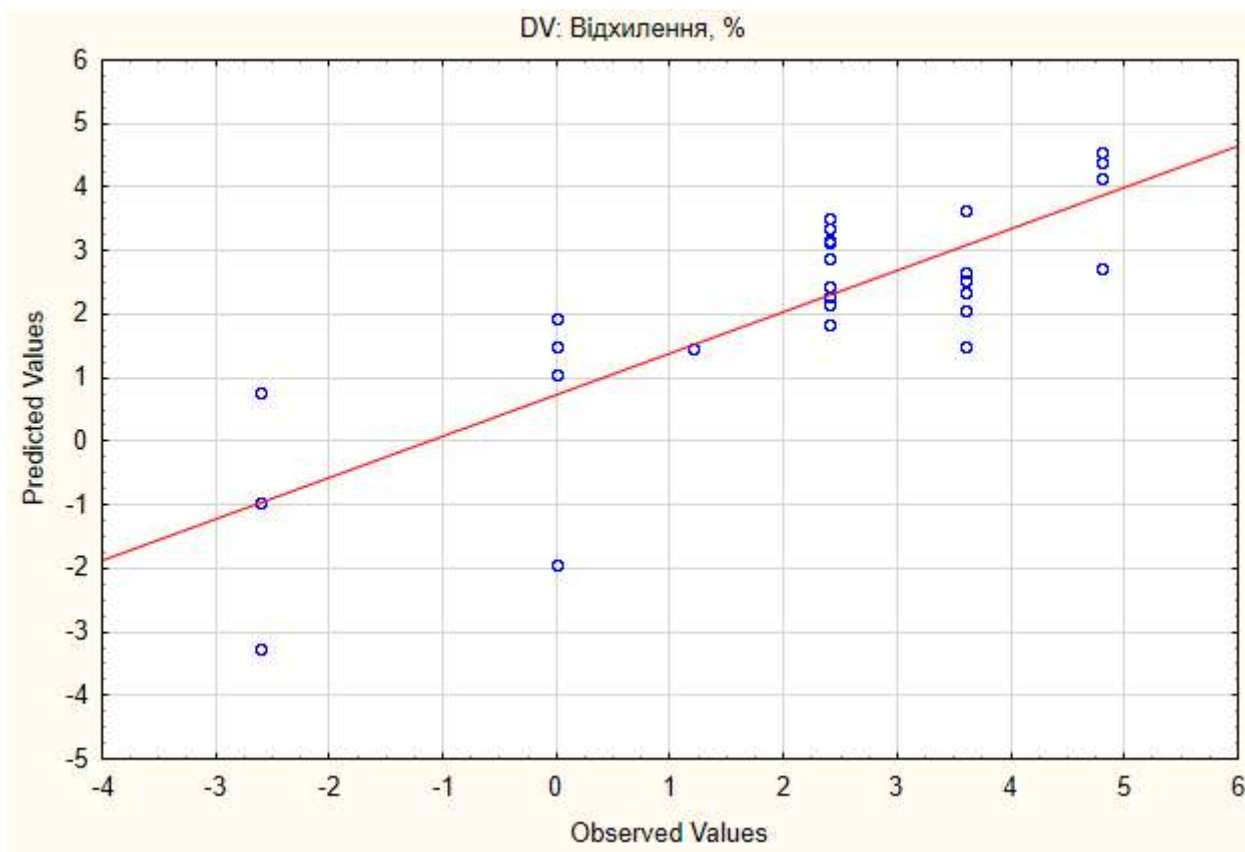


Рисунок 3.7 - Спостережені та передбачені значення

Так як на даному графіку (рис. 3.7) точки розташовані біля червоної лінії, то можемо зробити с цього такий висновок: дана модель з точки зору статистичного аналізу вірно описує вплив факторів які досліджувались на їх функцію відгуку та цю модель можна використовувати для прогнозування впливу цих параметрів на відхилення моделі з нейлону.

З використанням результатів експериментальних досліджень та їхнього статистичного аналізу розроблено графічні залежності, що відображають вплив параметрів термообробки на зміну розмірів (рис. 3.8 – 3.16).

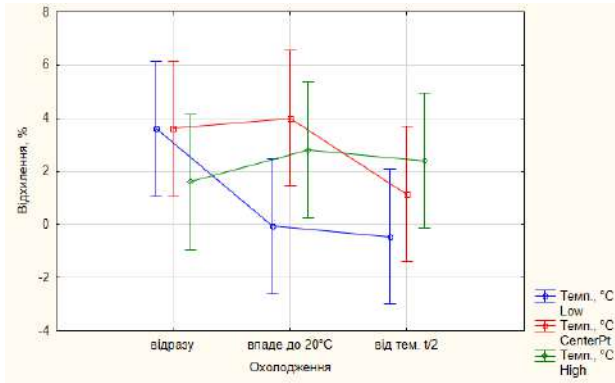


Рисунок 3.8 – Залежність відхилення від типу охолодження і темп. в печі

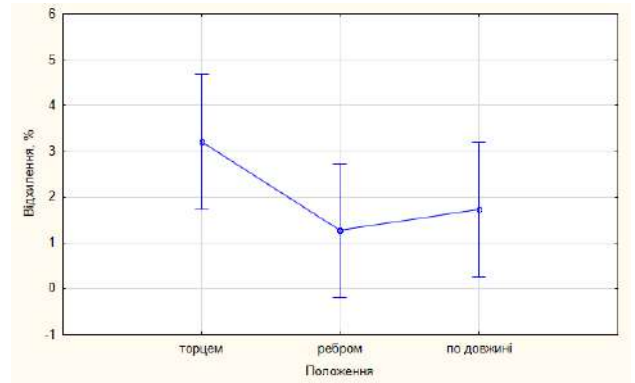


Рисунок 3.9 – Залежність відхилення від положення зразків у печі

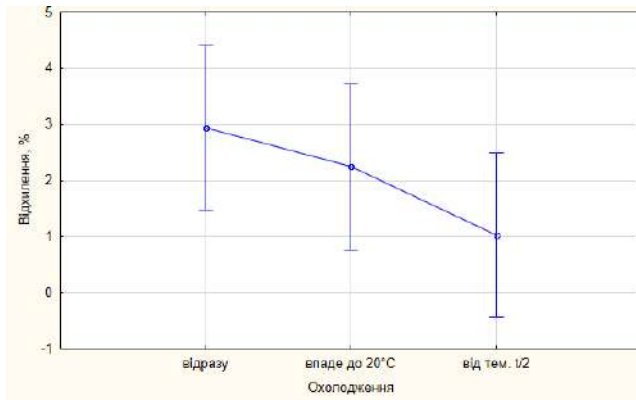


Рисунок 3.10 – Залежність відхилення від типу охолодження

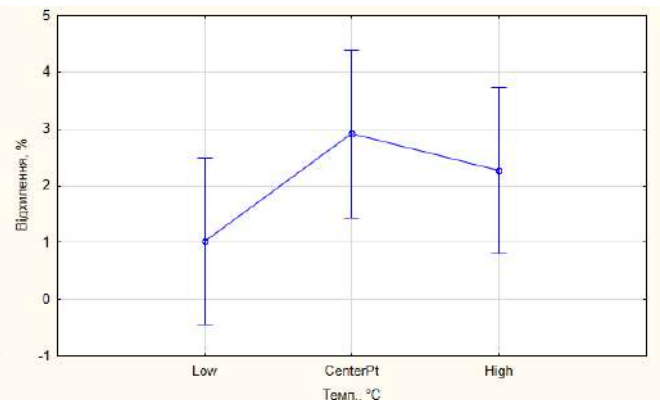


Рисунок 3.11 – Залежність відхилення від температури у печі

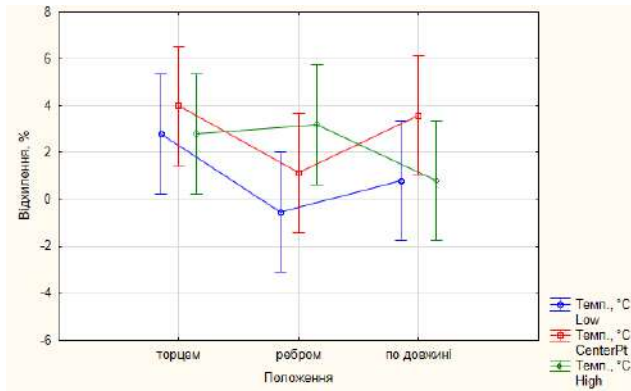


Рисунок 3.12 – Залежність відхилення від положення та температури у печі

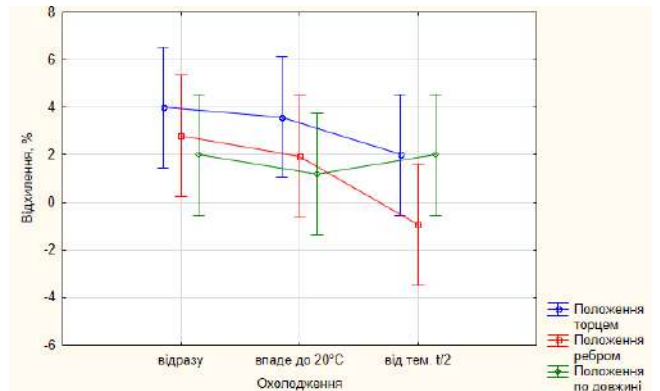


Рисунок 3.13 – Залежність відхилення від типу охолодження та положення у печі

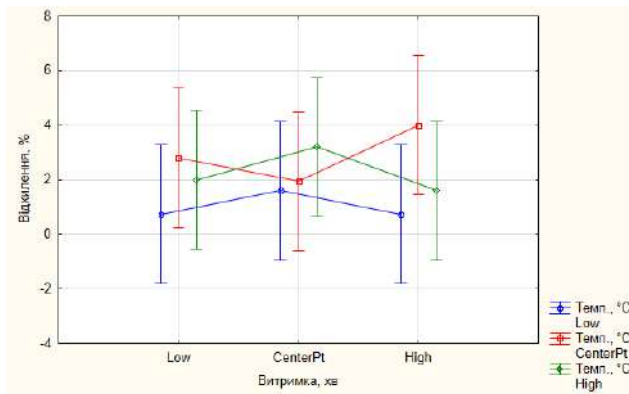


Рисунок 3.14 – Залежність відхилення від витримки та температури у печі

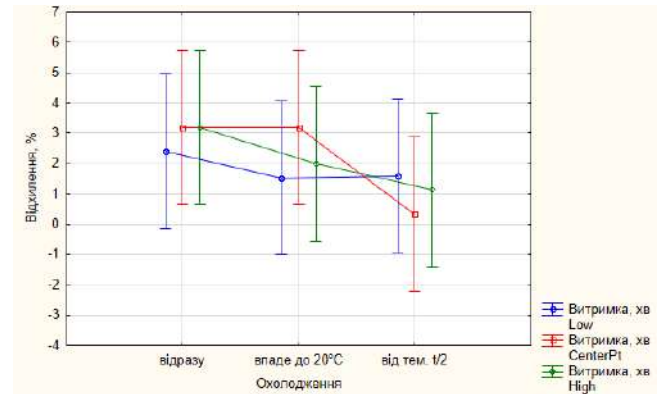


Рисунок 3.15 – Залежність відхилення від типу охолодження та витримки

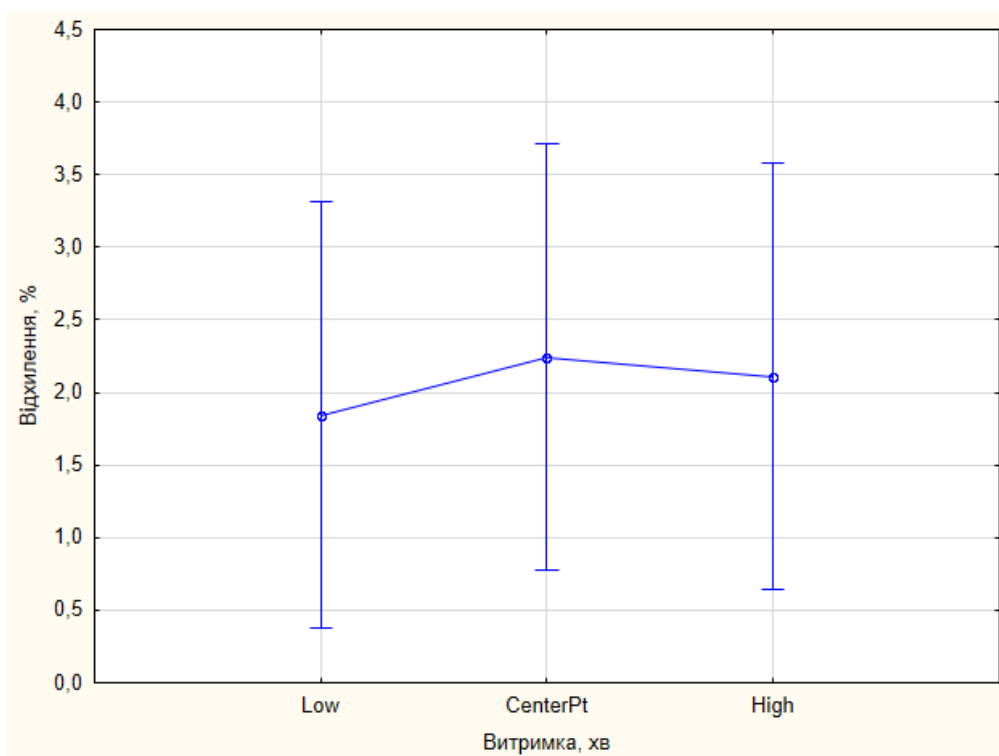


Рисунок 3.16 – Залежність відхилення від часу витримки

Дослідження графічних залежностей, представлених на малюнках 3.8–3.16, вказує на різноманітний вплив параметрів термічної обробки. Як ми бачимо на графічних залежностях, до величини відхилення найбільше призводить температура печі 110°C та вид охолодження «впаде до 20°C», також призводить залежність температура печі 90°C і 110°C при типі охолодження «відразу». При положення зразка торцем відхилення буде більшим, а ребром – меншим. Найменше відхилення при типі охолодження «від температури t/2», а якщо «відразу», то значення буде більше. При температурі витримки 110°C відхилення

має найбільше значення, а при 90°C – найменше. При залежності положення зразку «торцем», а температурі 110°C відхилення найбільше, а при положенні «ребром» і температурі 90°C – найменше, також при температурі 90°C і 130°C та положенні «по довжині» відхилення теж буде мати найменше значення. При взаємодії параметрів: тип охолодження «відразу» та положення зразку «торцем» буде найбільше відхилення розмірів, а при типі охолодження «від температури $t/2$ » і положення «ребром» буде найменшим. При взаємодії параметрів витримки та температури виходить що при температурі 100°C і витримці 90 хв. відхилення найбільше, а при температурі 90°C та витримці 30 хв., а також 90 хв. відхилення найменше. При взаємодії витримки 60 хв. та типу охолодження «відразу», а також «впаде до 20°C » відхилення найбільше, а також при витримці 90 хв. і охолодженні «відразу», а найменше відхилення буде при взаємодії витримки 60 хв. і охолодженні «від температури $t/2$ ».

За отриманими даними була побудована діаграма залежності за допомогою якої ми можемо спостерігати як на відхилення впливає температура та час витримки на наші зразки (рис. 3.17). За даною діаграмою найбільше відхилення відбувається при часу витримки 60 хв. та температурою печі 110°C .

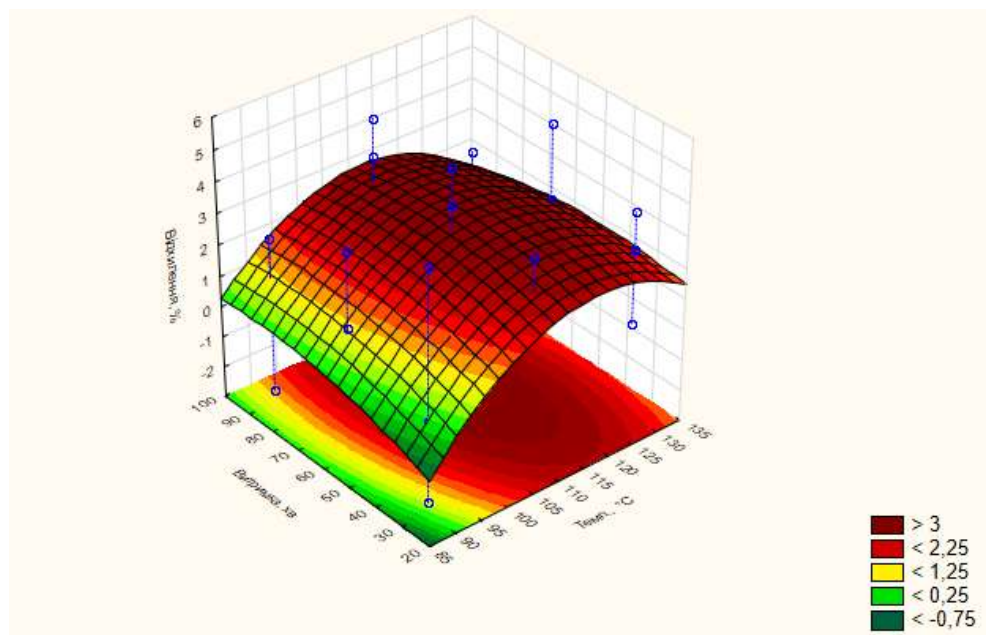


Рисунок 3.17 – Залежність відхилення розмірів від часу витримки і температури печі

Після отриманих даних була побудована діаграма залежності за допомогою якої ми можемо спостерігати як на відхилення впливає положення та температура на наші зразки (рис. 3.18). За даною діаграмою найбільше відхилення відбувається при положенні «торцем» та температурою печі 110°C.

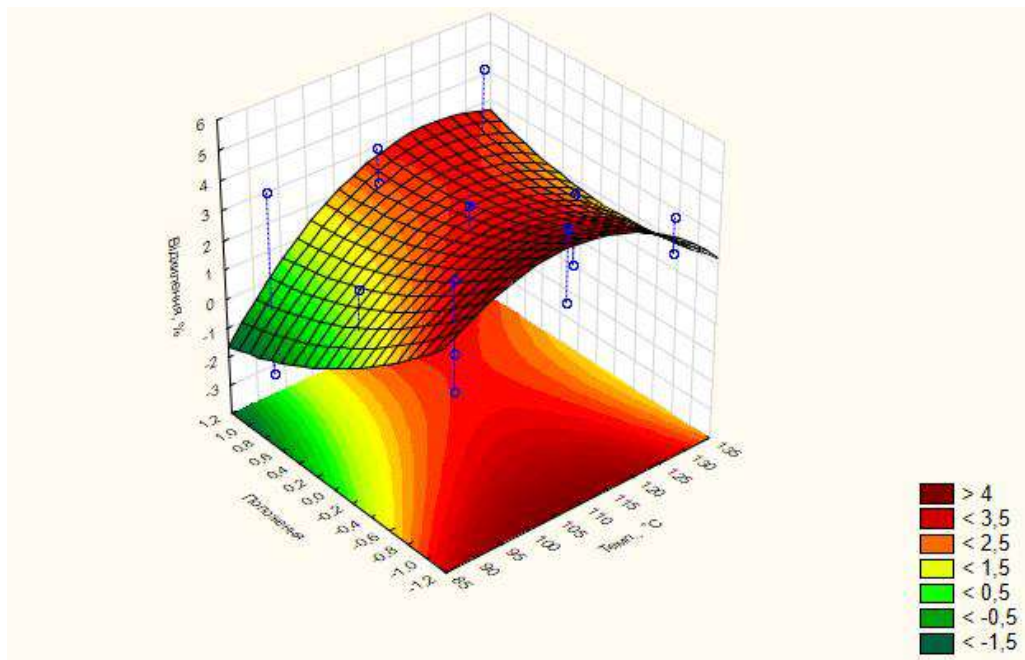


Рисунок 3.18 – Залежність відхилення розмірів від положення зразка і температури печі

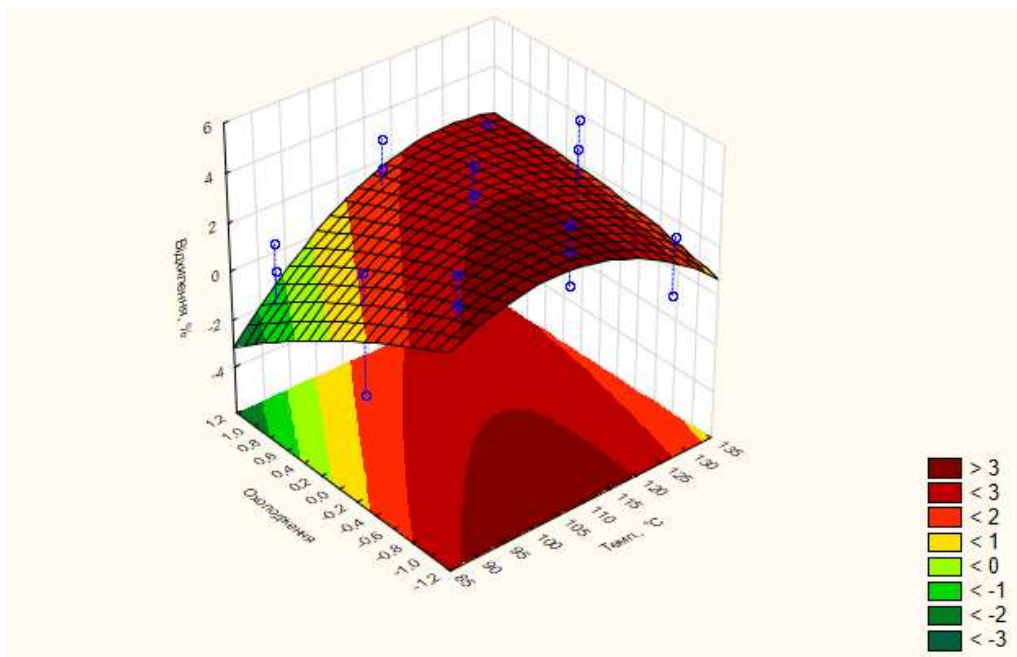


Рисунок 3.19 – Залежність відхилення розмірів від типу охолодження і температури печі

За рахунок отриманих даних була побудована діаграма залежності за допомогою якої ми можемо спостерігати як на відхилення впливає тип охолодження та температура на наші зразки (рис. 3.19). За даною діаграмою найбільше відхилення відбувається при типі охолодження «відразу» та температурою печі 110°C.

3.3 Вплив параметрів термічної обробки на міцність зразків

На підставі аналізу дисперсії та огляду діаграм Паретто проведено статистичну обробку експериментальних даних, що дозволило визначити найбільш значущі статистичні фактори, які впливають на міцність зразків.

За допомогою програми NX CAD була зроблена 3D модель нашого зразку (рис. 3.20), завдяки можливостям цієї програми було зроблене візуальне зображення слабких місць (розриву) наших зразків під час випробування їх на розрив.

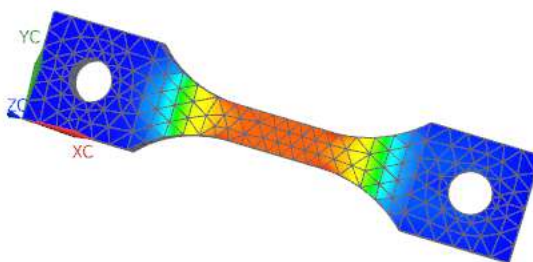


Рисунок 3.20 – 3D модель з зображенням місця розриву

Результат дисперсійного аналізу показано на рис. 3.21, 3.22, яка показує вплив різних заданих незалежних факторів на міцність зразків.

Factor	DV: σ , МПа				
	SS	df	MS	F	p
(1)Темп., °C L+Q	120,6303	2	60,31514	23,37235	0,000073
(2)Витримка, хв L+Q	17,9877	2	8,99384	3,48515	0,064068
(3)Положення L+Q	1,2941	2	0,64704	0,25073	0,782210
(4)Охолодження L+Q	7,2763	2	3,63814	1,40979	0,281885
1*2	0,0378	1	0,03785	0,01467	0,905616
1*3	0,2494	1	0,24939	0,09664	0,761234
1*4	0,4961	1	0,49613	0,19225	0,668840
2*3	3,4445	1	3,44450	1,33476	0,270447
2*4	1,3347	1	1,33472	0,51721	0,485804
3*4	0,2832	1	0,28322	0,10975	0,746144
Error	30,9674	12	2,58062		
Total SS	185,3409	26			

Рисунок 3.21 – Дисперсійний аналіз впливу режимних параметрів на міцність зразків

На рисунку 3.21 показана складна модель дисперсійного аналізу, в якій надано незалежні параметри, а саме: температура, час витримки наших зразків у печі, положення зразків під час знаходження їх у печі та вид охолодження зразків після нагрівання їх у печі. Також, у таблиці окрім незалежних параметрів є ще їх залежність один від одного, наприклад, залежність «1*3» - це залежність температури та положення зразка під час термообробки та їх вплив на параметр міцності наших зразків. Числові значення, які помічені червоним кольором мають найбільший вплив на відхилення зразків, а сірого кольору, навпаки, мають незначний вплив на відхилення зразків або, як це ще називають, «слабкі» значення, тому їх бажано посилити за рахунок відсіювання найбільш низьких числових значень. Отже, аналізуємо отримані дані та спрощуємо таблицю методом видалення незначних даних.

Factor	DV: σ , МПа				
	SS	df	MS	F	p
(1)Темп., °C L+Q	120,6303	2	60,31514	30,04252	0,000003
(2)Витримка, хв L+Q	17,9877	2	8,99384	4,47976	0,027371
(4)Охолодження L+Q	7,2763	2	3,63814	1,81213	0,193464
1*3	0,6627	1	0,66270	0,33009	0,573133
2*3	4,4044	1	4,40441	2,19380	0,156864
3*4	0,2494	1	0,24941	0,12423	0,728825
Error	34,1302	17	2,00766		
Total SS	185,3409	26			

Рисунок 3.22 – Дисперсійний аналіз впливу режимних параметрів на міцність зразків з видаленням не значних факторів

Після ігнорування і видалення незначних факторів, таблиця має наступний вигляд (рис. 3.22). На цій таблиці ми бачимо що найбільших вплив на параметр міцності зразків від їх початкових параметрів міцності впливає температура печі, час витримки зразків у печі, та залежний параметр «2*3» (час витримки зразків в печі та розташування зразків в печі).

Factor	DV: σ , MPa									
	Effect	Std.Err.	t(17)	p	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt
Mean/Interc.	53,21852	0,272686	195,1640	0,000000	52,64320	53,79384	53,21852	0,272686	52,64320	53,79384
(1)Темп., °C(L)	5,02333	0,667942	7,5206	0,000001	3,61410	6,43257	2,51167	0,333971	1,80705	3,21628
Темп., °C(Q)	-1,08611	0,578455	-1,8776	0,077702	-2,30654	0,13432	-0,54306	0,289227	-1,15327	0,06716
(2)Витримка, хв(L)	1,71111	0,667942	2,5618	0,020214	0,30188	3,12035	0,85556	0,333971	0,15094	1,56017
Витримка, хв(Q)	0,89556	0,578455	1,5482	0,139992	-0,32488	2,11599	0,44778	0,289227	-0,16244	1,05799
(4)Охолодження(L)	0,98111	0,667942	1,4689	0,160133	-0,42812	2,39035	0,49056	0,333971	-0,21406	1,19517
Охолодження(Q)	0,70056	0,578455	1,2111	0,242432	-0,51988	1,92099	0,35028	0,289227	-0,25994	0,96049
1L by 3L	-0,47000	0,818058	-0,5745	0,573133	-2,19595	1,25595	-0,23500	0,409029	-1,09798	0,62798
2L by 3L	-1,21167	0,818058	-1,4811	0,156864	-2,93762	0,51429	-0,60583	0,409029	-1,46881	0,25714
3L by 4L	0,28833	0,818058	0,3525	0,728825	-1,43762	2,01429	0,14417	0,409029	-0,71881	1,00714

Рисунок 3.23 – Регресійний аналіз оцінки ефектів на відхилення

Числові дані, представлені в цій таблиці (рис. 3.23), відображають результати (або оцінки) параметрів. У рядку "Mean/Interc." (Середній член) подані значення середнього відхилення для кожного фактору. Наприклад, у нашому випадку, якщо ми зробимо зміну фактору часу витримки (L) на рівень вище, через що можемо очікувати подальше збільшення міцності наших зразків.

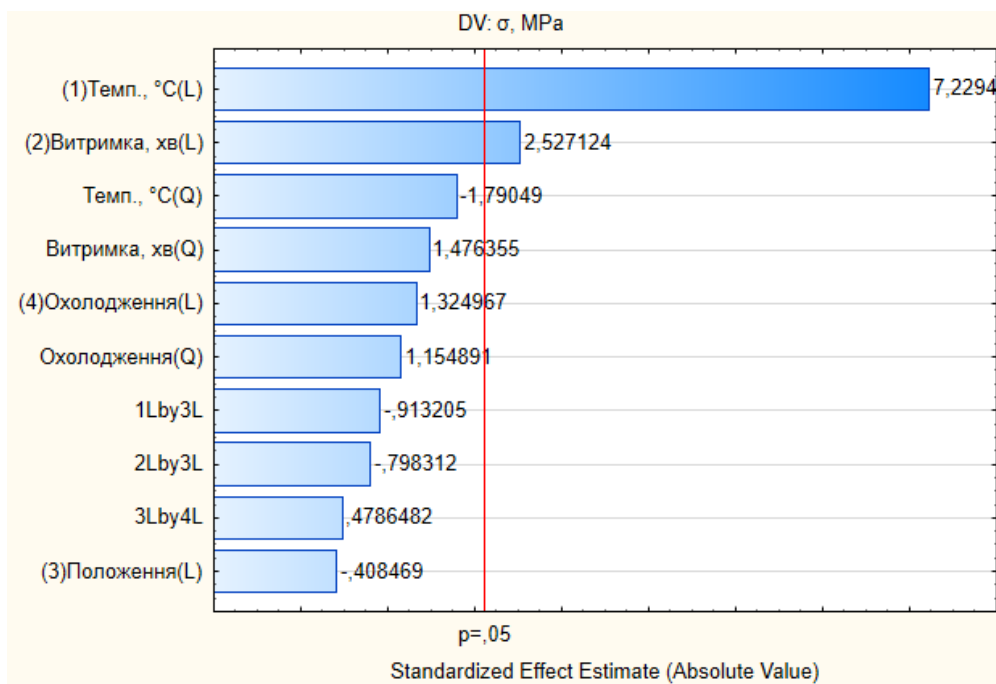


Рисунок 3.24 – Вплив параметрів на міцність зразків

За даними дисперсійного аналізу та діаграмами Паретто (рис. 3.21, 3.22, 3.24) встановлено, що на міцність зразків найбільший вплив мають параметри: температура печі (L), час витримки зразка (L). Найменший вплив на міцність зразків мають параметри, які знаходяться поза чергової межі, а саме: температура (Q), витримка (Q), тип охолодження (L), тип охолодження (Q), положення (L), а також взаємодія параметрів «1Lby3L» (температура печі та положення зразку), «2Lby4L» (час термообробки та положення зразку), «3Lby4L» (положення зразка в печі та спосіб охолодження). Таким чином міцність зразка дуже залежить від температури при якій буде проводитись термічна обробка.

Аналіз даних виконується шляхом застосування визначеної математичної моделі, а оцінка її ефективності проводиться через порівняння графіку очікуваних та фактичних значень для функції реакції (рис. 3.24).

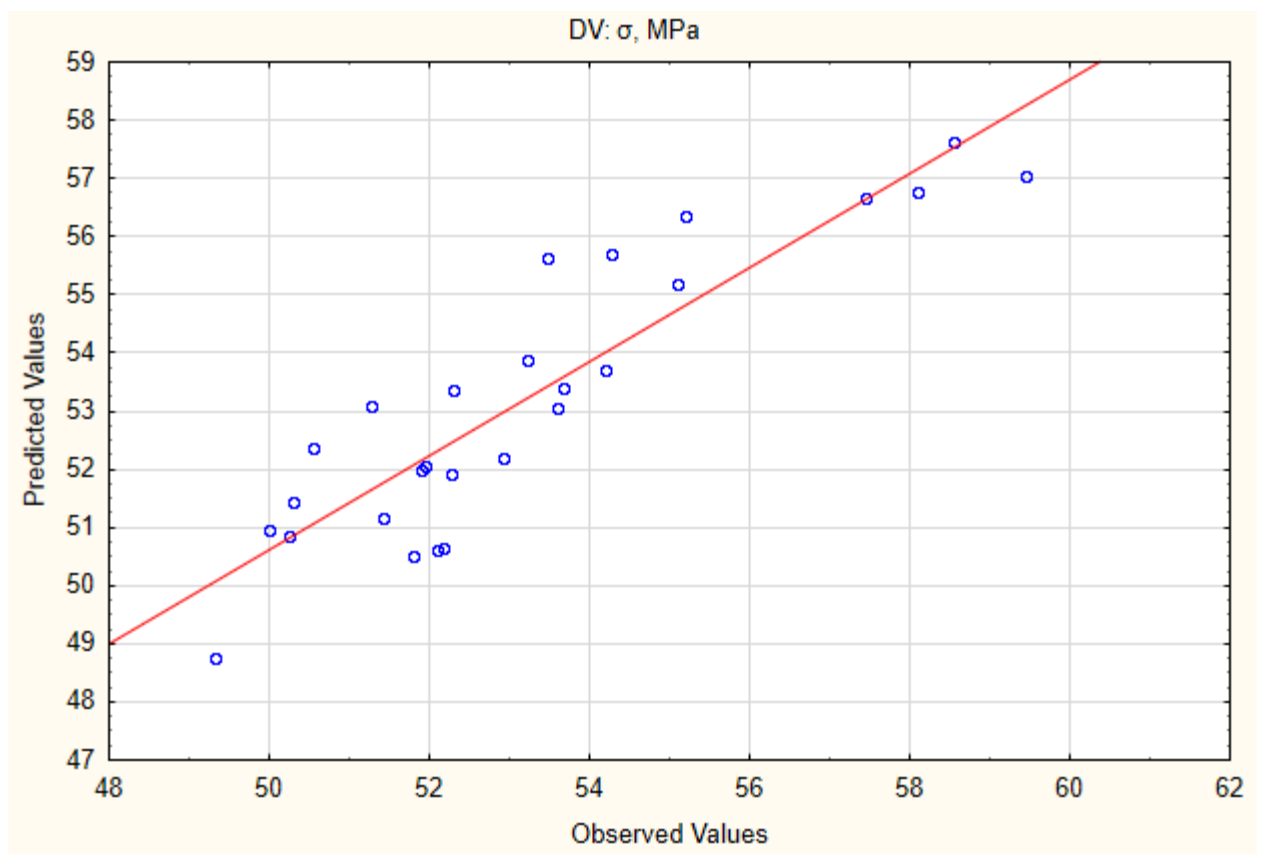


Рисунок 3.25 - Спостережені та передбачені значення

Так як на даному графіку (рис. 3.25) точки розташовані біля червоної лінії, то можемо зробити з цього висновок, що дана модель з точки зору статистичного аналізу вірно описує вплив факторів які досліджувались на їх функцію відгуку та

цю модель можна використовувати для прогнозування впливу цих параметрів на значення міцності моделі з нейлону.

З використанням результатів експериментальних досліджень та їхнього статистичного аналізу розроблено графічні залежності, що відображають вплив параметрів термообробки на міцність зразків (рис. 3.26 – 3.31).

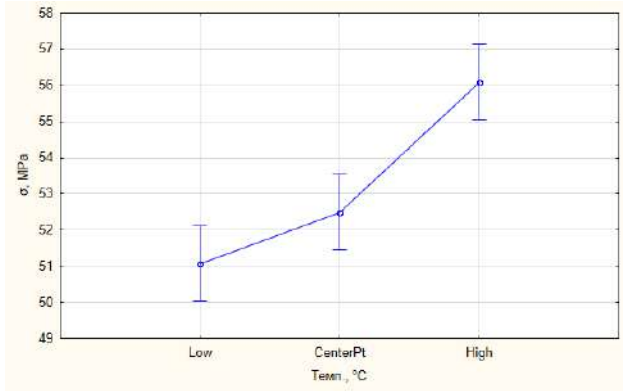


Рисунок 3.26 – Залежність міцності від температури в печі

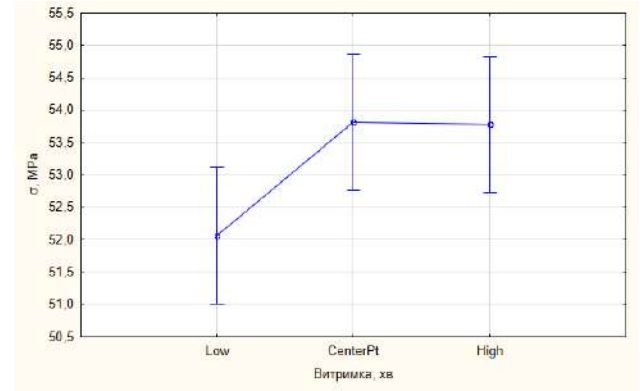


Рисунок 3.27 – Залежність міцності від витримки в печі

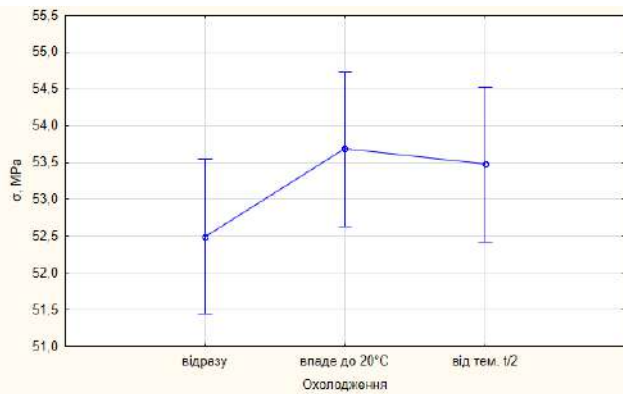


Рисунок 3.28 – Залежність міцності від типу охолодження

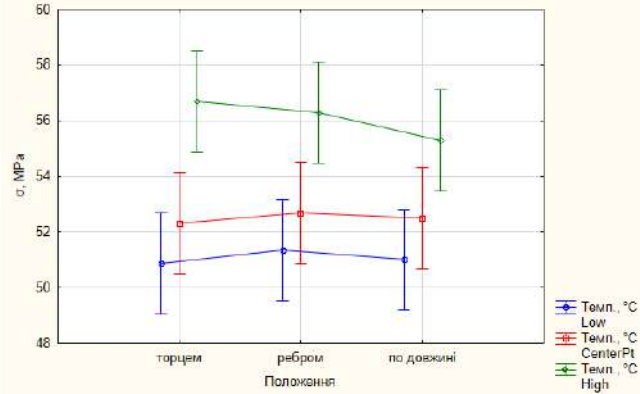


Рисунок 3.29 – Залежність міцності від положення та температури у печі

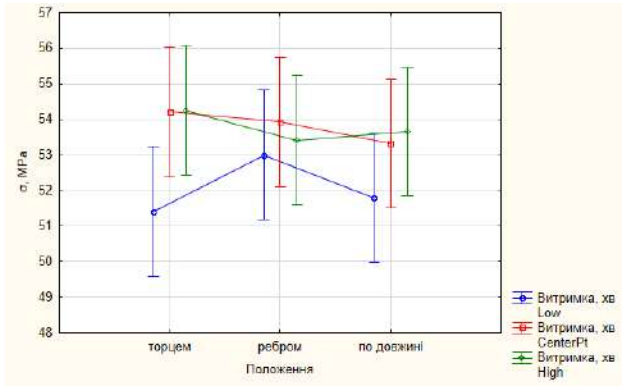


Рисунок 3.30 – Залежність міцності від положення та витримки у печі

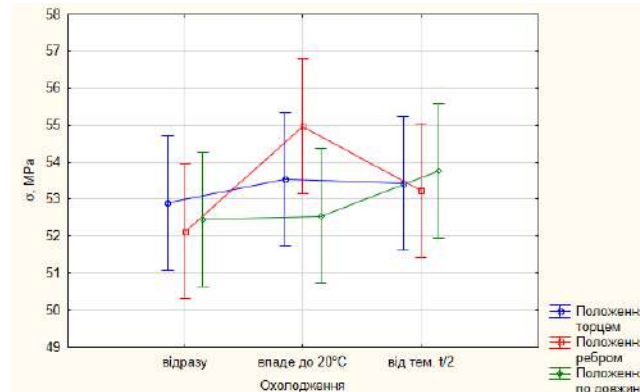


Рисунок 3.31 – Залежність міцності від типу охолодження та положення

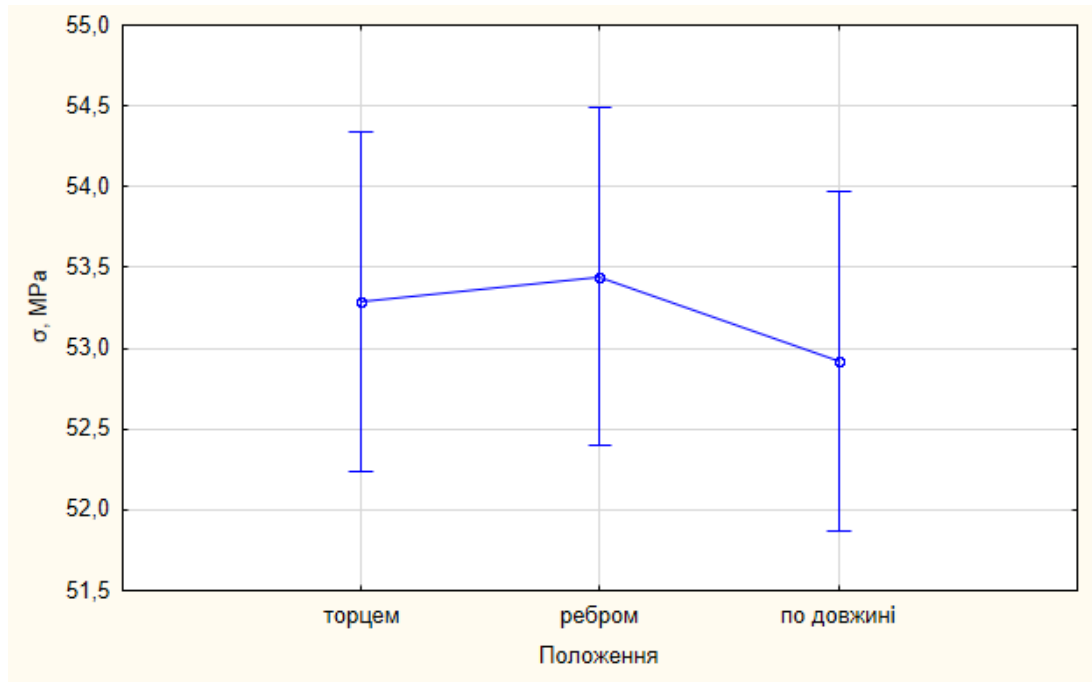


Рисунок 3.32 – Залежність міцності від положення у печі

Дослідження графічних залежностей, представлених на малюнках 3.26 – 3.32, вказує на різноманітний вплив параметрів термічної обробки.

Як ми бачимо на графічних залежностях, на величину міцності зразка найбільший вплив має температура у печі 130°C, при якій міцність зразку навища, а при 90°C – найменша. При витримці 60 хв. та 90 хв. міцність буде найвища, а при 30 хв. – найменша. При типі охолодження «впаде до 20°C» міцність буде найбільша, а при типі охолодження «відразу» - найменша. При взаємодії параметрів положення зразка «торцем» та температури у печі 130°C міцність буде найбільша, а при положенні «торцем» та температурі 90°C міцність буде найменша. При взаємодії параметрів положення зразка «торцем» та витримці 60 хв. або 90 хв. міцність буде найбільша, а при положенні «торцем» та витримці 30 хв. – найменша. При взаємодії параметрів тип охолодження «впаде до 20°C» та положенні «ребром» міцність буде найбільша, а при типі охолодження «відразу» та положенні «ребром» - найменша. При положенні «ребром» міцність буде найбільша, а при положенні «по довжині» - найменша.

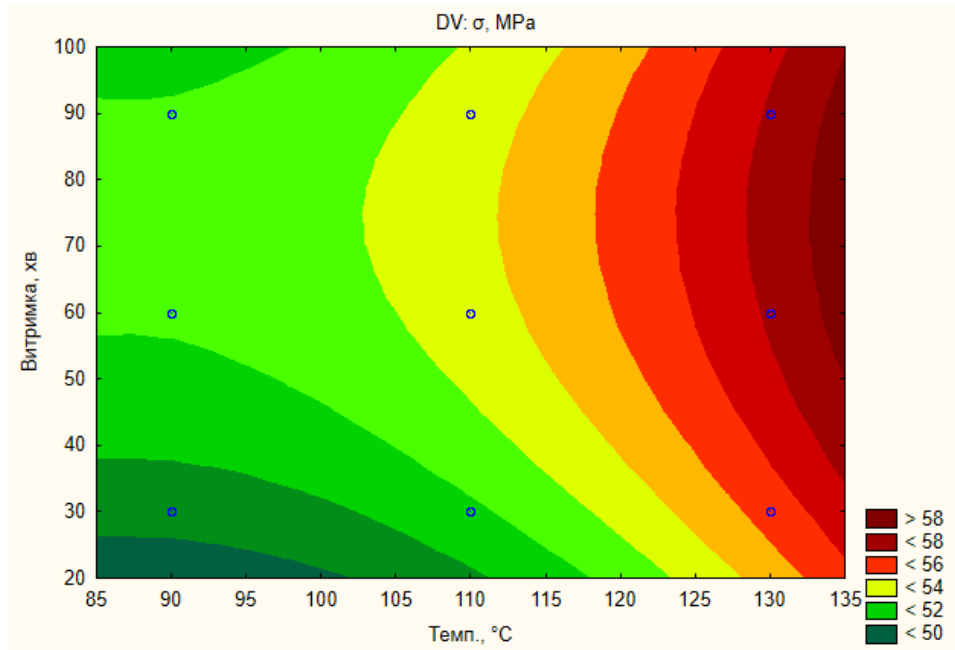


Рисунок 3.33 – Залежність параметру міцності від часу витримки і температури печі

Завдяки отриманим даним, ми побудували діаграму (рис. 3.33), яка дозволяє нам спостерігати, як вплив часу витримки та температури печі впливає на міцність наших зразків. За даною діаграмою найбільшу міцність ми отримуємо при часі витримки 90 та 60 хв і температуру печі 130°C.

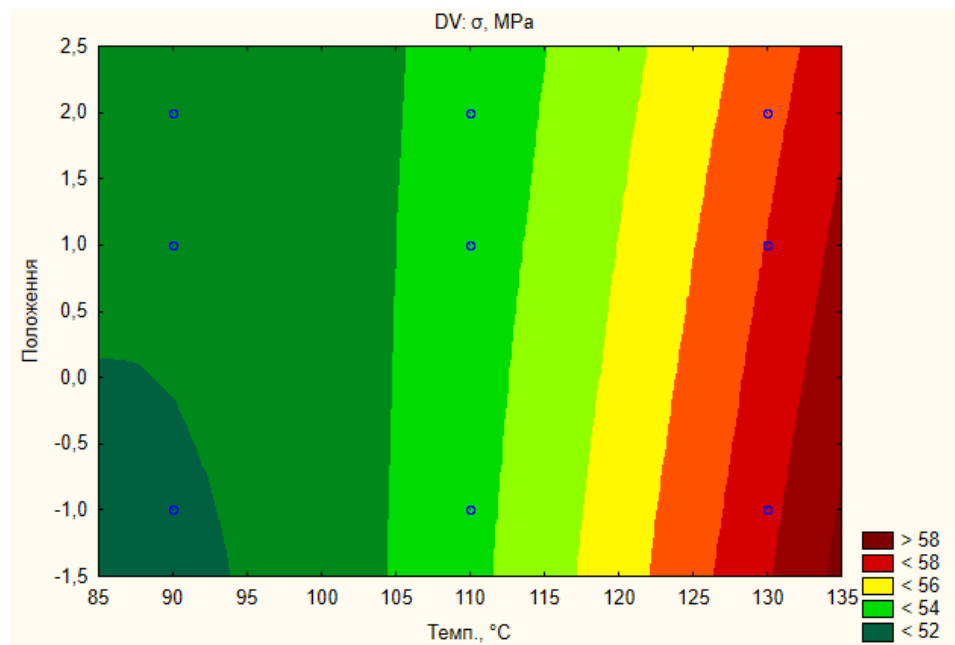


Рисунок 3.34 – Залежність параметру міцності від положення зразка і температури печі

За рахунок отриманих даних, ми побудували діаграму, яка дозволяє нам спостерігати, як вплив положення зразка та температури печі впливає на міцність наших зразків. (рис. 3.34). За даною діаграмою найбільшу міцність ми отримуємо при положенні зразка плашмя і температуру печі 130°C.

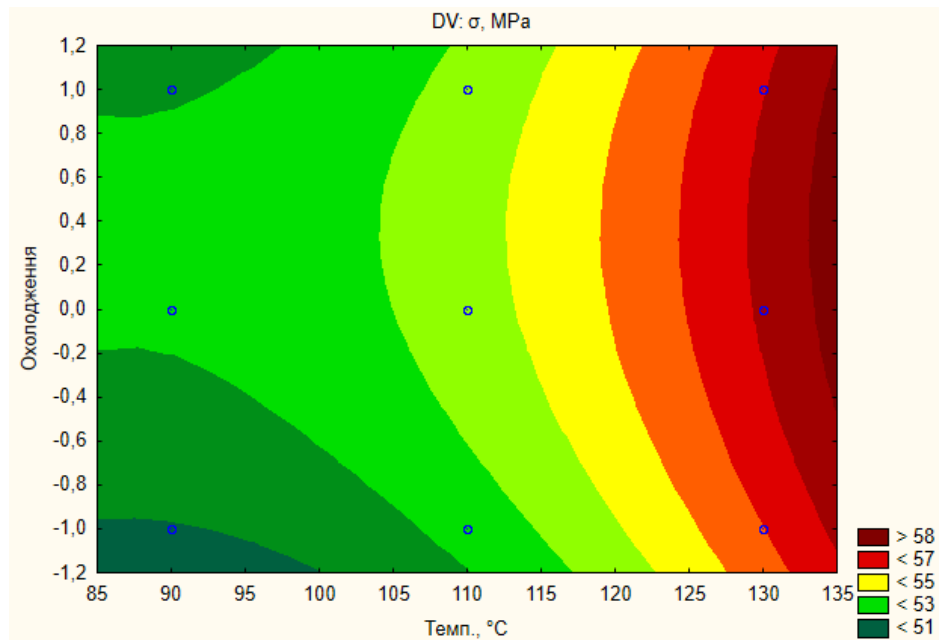


Рисунок 3.35 – Залежність параметру міцності від положення зразка і температури печі

За допомогою отриманих даних, ми побудували діаграму, яка дозволяє нам спостерігати, як вплив типу охолодження та температури печі впливає на міцність наших зразків. (рис. 3.35). За даною діаграмою найбільшу міцність ми отримуємо при типі охолодження – дістати при половині значення температури печі та температуру печі 130°C.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Безпека дослідницьких робіт

У процесі проведення дослідження було проаналізовано умови функціонування лабораторії університету, виявлено основні можливі ризики, які можуть виникнути під час дослідницької діяльності, такі як:

1) Можливе отримання травм, пов'язаних з електричним струмом при використанні у разі несправності принтера та електрошафи;

2) Оскільки принтер встановлений на висоті 20 см відповідно до вимог до експлуатації обладнання, існує ймовірність падіння через такі фактори: зниження концентрації уваги, наявність перешкод, слизька поверхня, стан здоров'я (хвороби та нездужання), слабкість, незручне взуття, погіршення рівноваги, можливі надзвичайні ситуації, відволікання, емоційна напруга;

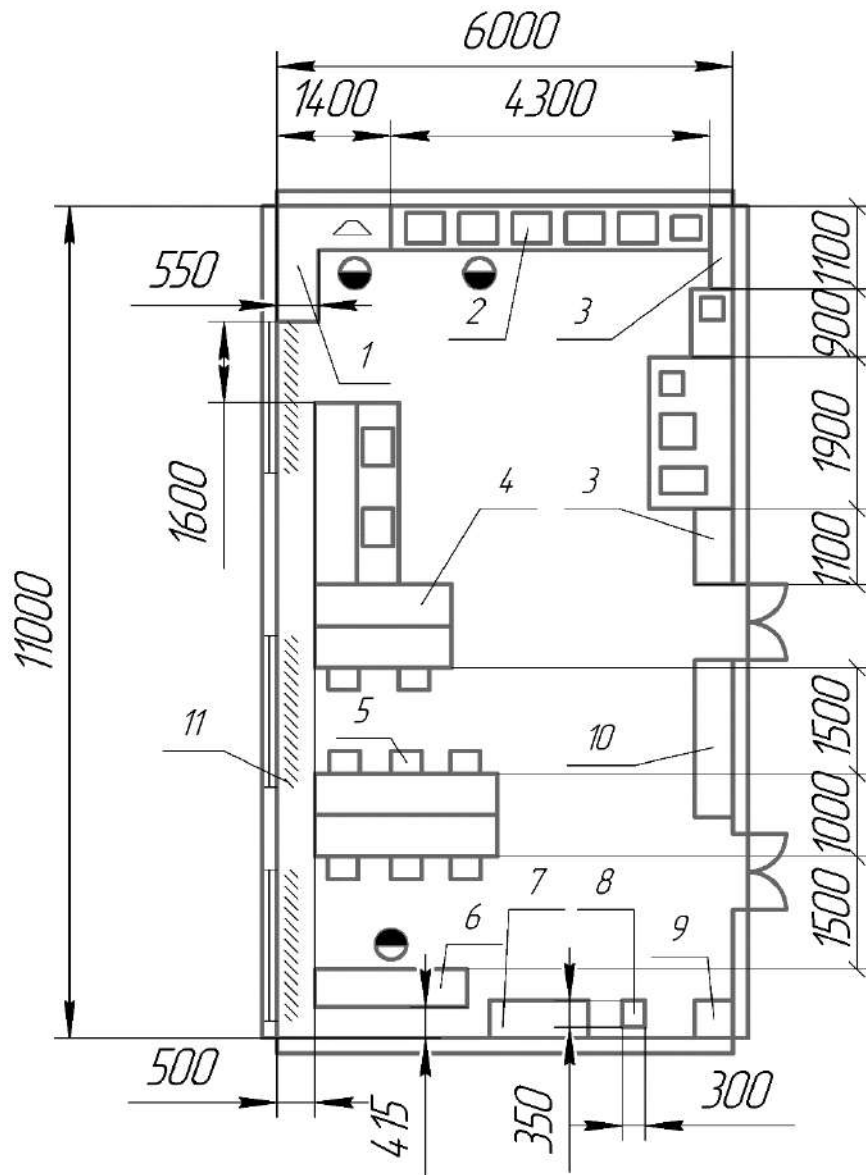
3) Можливість отримання опіків від нагрітих елементів принтера, електрошафи, а також від пластикових частин та корпусу електрошафи;

4) Ризик отримання травм від гострих кутів принтера, електрошафи чи інших виробів у разі порушення правил експлуатації;

5) При плавленні пластику можливе виділення шкідливих газів, що може супроводжуватися головним болем, подразненням дихальних шляхів та іншими неприємними відчуттями;

6) Матеріали для 3D-друку можуть містити хімічні компоненти, які при взаємодії зі шкірою можуть викликати алергічні реакції;

7) У зв'язку з наявністю рухомих частин у принтері, вони можуть становити небезпеку при неналежному поводженні.



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-робочий стіл; 11- сонцезахисні жалюзі.

Рисунок 4.1 - Проект приміщення для досліджень із комп'ютеризованими робочими місцями що відповідає вимогам ДБН В.2.2-28:2010 [53]

На рисунку 4.1 представлений план дослідницького приміщення, де один працівник працює та обслуговує кілька пристроїв.

Для забезпечення від травм, що можуть виникнути під час робіт, необхідно проводити заходи організаційного та технічного характеру:

- організація навчання з правил електробезпеки, перевірка рівня засвоєння знань та атестація персоналу на відповідність другій або третій групі

електробезпеки відповідно до встановлених вимог згідно з НПАОП 0.00-4.12-05 [54].

- Враховуючи, що електропостачання обладнання у приміщенні з комп'ютерами здійснюється від мережі змінного струму з напругою 220 В та частотою 50 Гц, відповідно до вимог Правил пристрою електроустановок «ПУЕ», електротехнічне обладнання в таких приміщеннях розглядається як пристрої, що працюють з напругою до 1000 В. Відповідно до глави 1.7 «ПУЕ» [55], опір контуру захисного заземлення електрообладнання приміщення з комп'ютерами не перевищує 4 Ом протягом усього року.

Плани пожежної безпеки для роботи в лабораторії з персональними комп'ютерами та візуальними дисплеями 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» [56] 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 необхідно враховувати правила безпеки та правила експлуатації обладнання, а саме [57, 58]:

1) При роботі з 3D-принтером користувач піддається впливу шкідливих та небезпечних факторів, таких як випаровування пластику, висока температура та шум. Тому важливо забезпечити наявність робочого місця у приміщенні з природною чи штучною вентиляцією;

2) Рекомендується використовувати 3D-принтер лише у мережах стандартного змінного струму напругою 220 В;

3) Забороняється застосовувати 3D-принтер при виявленні пошкоджень шнура, штепсельної вилки або самого принтера. Також не можна вмикати 3D-принтер, якщо він зазнавав ударів;

4) Цей принтер не рекомендується використовувати в приміщеннях з підвищеною вологістю та недостатнім освітленням. Для захисту пластику на котушці від прямих сонячних променів рекомендується використовувати сонцезахисні пристрої, такі як плівка, штори, жалюзі тощо;

5) Взаємодія з нагрітими та рухомими компонентами 3D-принтера, а також з мережевим шнуром та кабелем абсолютно заборонена;

6) Уникайте розміщення легкозаймистих предметів поблизу 3D-принтера, оскільки випадкові іскри можуть призвести до займання;

7) Уникайте введення рук у небезпечні зони 3D-принтера. Користувач повинен дотримуватись особливої обережності при взаємодії з пристроєм;

8) Заборонено виконувати роботу у втомленому чи під впливом алкоголю стані;

9) Оскільки платформа принтера виступає за передні та задні грані нижньої панелі в процесі друку, не рекомендується встановлювати 3D-принтер так, щоб його задня або передня частина знаходилася біля стіни або інших об'єктів;

10) Заборонено знаходитися поблизу працюючого 3D-принтера в одязі, який може випадково потрапити до зони друку;

11) Щоб уникнути опіків та пошкоджень шкіри, суворо заборонено торкатися 3D-принтера під час друку та при нагрітому екструдері;

12) Для запобігання можливим травмам заборонено торкатися вентиляторів у процесі роботи;

13) Під час друку повністю заборонено переміщувати 3D-принтер;

14) Не можна залишати 3D-принтер увімкненим без нагляду;

15) Не можна розміщувати сторонні предмети на або всередині 3D-принтера;

16) Після завершення роботи завжди вимикайте 3D-принтер;

17) Використовуйте лише вимикачі, щоб увімкнути або вимкнути 3D-принтер. Не рекомендується відключати його, виймаючи вилку з розетки;

18) Експлуатація електрошафи призводить до нагрівання відкритих для доступу компонентів. Будьте уважні і уникайте торкання елементів, що нагріваються всередині шафи;

19) Застосовуйте датчик температури, який відповідає рекомендованим параметрам для даної електрошафи;

20) Засоби відключення повинні бути інтегровані в стаціонарну мережу з дотриманням стандартів підключення;

21) Рекомендується не закривати декоративними дверцятами електрошафу з метою запобігання перегріву;

5 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Бюджет наукового дослідження

При формуванні бюджету для наукового дослідження враховуються витрати, необхідні для проведення всіх етапів роботи, з метою визначення оптимального методу дослідження.

Рівняння умови що визначає витрати на матеріали для друку (B) [59, стр 12]:

$$B = U \cdot C_{\text{од.}} \quad (5.1)$$

де U - витрати сировини на виготовлення певної кількості товарів, г;

$C_{\text{од.}}$ - Вартість одиниці маси даного матеріалу, грн/г;

У дослідженні для друку зразків використовувався такий матеріал, як нейлон.

Визначаємо затрати на матеріал нейлон:

Сумарна маса всіх взятих зразків – 33г

Вартість нейлону на веб-сайті продавця вказана 760 грн за 825 г, обчислюємо ціну за 1 г:

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

$$B = 33 \cdot 0,92 = 30,36 \text{ грн}$$

Визначаємо витрати на споживання електроенергії (Q_e) [59, стр 15]:

$$Q_e = \frac{W_{\text{пр}} \cdot t_{\text{д}} + W_{\text{п}} \cdot t_{\text{т}}}{\eta} \cdot C_{\text{ел}} \quad (5.2)$$

де $W_{\text{пр}}$ - встановлена потужність принтеру, кВт;

t_d - час друку зразків;

$W_{п}$ - встановлена потужність печі, 0,65 кВт;

t_T – час термообробки зразків;

η - коефіцієнт корисної дії обладнання (0,85);

$C_{ел}$ - вартість 1 кВт×год електроенергії (2,64грн · кВт).

Визначаємо норму споживання електроенергії принтером за годину, принтер має напругу 232В, отже:

$$W_{пр} = \frac{232}{1000} = 0,232 \text{ кВт}$$

Визначаємо затрачений час на друк зразків. Так як зразків $N = 27$ шт., та вони мають однаковий час друку, а саме 18 хв, тому:

$$t_d = 27 \cdot 18 = 486 \text{ хв}$$

Переводимо хв в години:

$$t_d = 486 \text{ хв} = 8,1 \text{ год}$$

Визначаємо час термообробки зразків:

$$t_T = 60 + 90 + 30 + 90 + 60 + 30 + 60 + 30 + 90 + 60 + 60 + 90 + 30 + 30 + 30 + 90 + 60 + 90 + 60 + 60 + 90 + 60 + 30 + 30 + 30 + 90 + 90 = 1620 \text{ хв}$$

Переводимо в години:

$$t_T = 1620 \text{ хв} = 27 \text{ год}$$

$$Q_e = \frac{0,232 \cdot 8,1 + 0,65 \cdot 27}{0,85} \cdot 2,64 = 60,35 \text{ грн}$$

Витрати на технічне обслуговування та ремонт обладнання (Q_p):

$$Q_p = \frac{(I_{\text{п}} + I_{\text{пр}}) \cdot Y_p \cdot M_p}{N} \quad (5.3)$$

де $I_{\text{п}}$ – залишкова вартість обладнання печі, грн;

$I_{\text{пр}}$ – залишкова вартість обладнання принтеру, грн;

Y_p – коефіцієнт, який відраховується до ремонтного фонду;

M_p – обсяг обладнання;

N – програма випуску.

$$Q_p = \frac{(2900 + 32000) \cdot 0,03 \cdot 1}{27} = 38,78 \text{ грн}$$

Загальні витрати:

$$\sum \text{Ц} = B + Q_e + Q_p \quad (5.4)$$

де B – витрати на нейлон;

Q_e – витрати на споживання електроенергії;

Q_p – витрати на технічне обслуговування та ремонт обладнання.

$$\sum \text{Ц} = 30,36 + 60,35 + 38,78 = 129,49 \text{ грн}$$

Загалом було витрачено на дослідження 129,49 грн. Ціна одного зразку:

$$\text{Ц} = \frac{129,49}{27} = 4,8 \text{ грн}$$

Таблиця 5.1 – Фінансування наукового дослідження

Назви факторів і їх величина	
Програма випуску N	27 шт
Модель печі	ЕЛЕКТРОТЕРМ
Модель принтеру	FDM компанії Profi+
Матеріал	Plexiwire NYLON Filament Ø1,75
Вартість матеріалу	0,92 грн/г
Час термообробки	27 год
Час друку	8,1 год
Ціна печі	2900 грн
Ціна принтеру	32000 грн
Потужність печі	0,65 кВт*год
Потужність принтеру	0,232 кВт*год
Загальна сума витрат	129,49 грн
Вартість одного зразку	4,8 грн

Висновок: У даному розділі проведено розрахунок бюджету наукового дослідження. Були враховані витрати на матеріали, визначені витрати на електроенергію. Проведено підрахунок загального часу для термообробки та друку зразків. Також були розраховані витрати на обслуговування та ремонт обладнання.

Загальна вартість витрат на проведення наукового дослідження становить 129,49 грн, при цьому вартість одного зразка складає 4,8 грн.

ВИСНОВКИ

У науковій роботі було визначено вплив режимних параметрів термічної обробки на моделі з нейлону, та їх геометричне відхилення.

Було визначено та проаналізовано що міцність деталі має найвище значення при температурі 130°C, а при температурі 90°C значення міцності зменшується. При витримці 60 хв. і 90 хв. міцність більша, а при витримці 30 хв. має менше значення. Також було виявлено, що положення зразків у печі теж має вплив, а саме при положенні зразку «торцем» міцність зразку вища, а при положенні «по довжині» значення міцності менше. Охолодження нейлону після його термічної обробки теж має свій вплив. Так було виявлено, що при типі охолодження «впаде до 20°C» міцність деталі вища, а якщо тип охолодження «відразу» то міцність має менше значення.

Також було визначено від чого залежить геометрична точність моделі підчас проведення термічної обробки, а саме при температурі 90°C, витримці 30 хв. і положенні «ребром» відхилення мінімальні. А при температурі 110°C і витримці 90 хв. та положенні «торцем» відхилення буде мати більше значення. Але при взаємодії параметрів температури 130°C і типу охолодження «відразу» відхилення буде менше, але не мінімальне. Також при типі охолодження «від температури $t/2$ » значення відхилення буде мінімальне, а при охолодженні «впаде до 20°C» відхилення найбільше.

Таким чином, при проведенні аналізу впливу параметрів термічної обробки та її вплив на властивості деталей з нейлону надрукованих методом FDM друку були виявлені такі задовільні параметри: температура печі 130°C, витримка 90 хв., положення «торцем», тип охолодження «від температури $t/2$ ». При таких параметрах значення міцності буде найбільшим (58,55 МПа), а відхилення буде не значним (2,4%).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. XU, Sheng; ZHAO, Xiaowen; YE, Lin. Effect of heat treatment on the structure and properties of MC nylon 6. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2012, 51.7: 689-695.
2. Lin, X.; Zhang, P.N.; Yin, Z.L.; Chen, Q.Y. *J. Rare Earths* 2005, 23, 680–684
3. <https://shop3duniverse.com/products/taulman-bridge-nylon-3d-printing-filament-1-kg#v32027937701942>
4. Liang, H.X.; Miao, Z.W.; Li, Y.; Gao, Y.L.; Yuan, H.L. *Eng. Plast. Appl.* 2010, 38, 33–36.
5. Ramesh, C.; Gowd, E.B. *Macromolecules* 2001, 34, 3308–3313.
6. Polyamide (PA, Nylon). Available online: <https://3dgence.com/filaments/polyamide/Certified> (accessed on 5 August 2021).
7. Carlota, V. All You Need to Know about Nylon for 3D Printing. Available online: <https://www.3dnatives.com/en/nylon-3dprinting-guide-120320204/> (accessed on 5 August 2021).
8. Goodridge, R.D.; Tuck, C.J.; Hague, R.J.M. Laser sintering of polyamides and other polymers. *Prog. Mater. Sci.* 2012, 57, 229–267.
9. Rahim, T.N.A.T.; Abdullah, A.M.; Akil, H.M.; Mohamad, D.; Rajion, Z.A. Preparation and characterization of a newly developed polyamide composite utilising an affordable 3D printer. *J. Reinf. Plast. Compos.* 2015, 34, 1628–1638.
10. Byju's, Nylon—Structure, Properties, Uses. Available online: <https://byjus.com/chemistry/nylon/> (accessed on 17 July 2021).
11. Columbus, L. The State of 3D Printing. 2019. Available online: <https://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2019/05/27/the-state-of-3d-printing-2019/#fb942fb46c2c> (accessed on 5 April 2020).
12. Calignano, F.; Manfredi, D.; Ambrosio, E.P.; Biamino, S.; Lombardi, M.; Atzeni, E.; Salmi, A.; Minetola, P.; Iuliano, L. Fino, Overview on additive manufacturing technologies. *Proc. IEEE* 2017, 105, 593–612.

13. Parandoush, P.; Lin, D. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Compos. Struct.* 2017, 182, 36–53.
14. Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D.; Ramani, K.; Chen, Y.; Williams, C.B.; Wang, C.C.; Shin, Y.C.; Zhang, S.; Zavattieri, P.D. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Comput. Aided Des. Appl.* 2015, 69, 65–89.
15. Chu, C.; Graf, G.; Rosen, D.W. Design for additive manufacturing of cellular structures. *Comput. Aided Des. Appl.* 2008, 5, 686–696.
16. Melchels, F.P.; Domingos, M.A.; Klein, T.J.; Malda, J.; Bartolo, P.J.; Huttmacher, D.W. Additive manufacturing of tissues and organs. *Prog. Polym. Sci.* 2012, 37, 1079–1104.
17. Leal, R.; Barreiros, F.M.; Alves, L.; Romeiro, F.; Vasco, J.C.; Santos, M.; Marto, C. Additive manufacturing tooling for the automotive industry. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, 92, 1671–1676.
18. Richardson, M.; Haylock, B. Designer/maker: The rise of additive manufacturing, domestic-scale production and the possible implications for the automotive industry. *Comput. Aided Des. Appl.* 2012, 2, 33–48.
19. Joshi, S.C.; Sheikh, A.A. Prototyping, 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual Phys. Prototy* 2015, 10, 175–185.
20. Kumar, L.J.; Nair, C.K. Current trends of additive manufacturing in the aerospace industry. In *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*; Springer: Berlin, Germany, 2017; pp. 39–54.
21. WICKRAMASINGHE, Sachini; DO, Truong; TRAN, Phuong. FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. *Polymers*, 2020, 12.7: 1529.
22. Turner, B.N.; Strong, R.; Gold, S.A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyp. J.* 2014, 20, 192–204.
23. Mohan, N.; Senthil, P.; Vinodh, S.; Jayanth, N. A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. *Virtual Phys. Prototyp.* 2017, 12, 47–59.

24. Lay, M.; Thajudin, N.L.N.; Hamid, Z.A.A.; Rusli, A.; Abdullah, M.K.; Shuib, R.K. Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Compos. Part B Eng.* 2019, 176, 107341.
25. Tanikella, N.G.; Wittbrodt, B.; Pearce, J.M. Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing. *Addit. Manuf.* 2017, 15, 40–47.
25. Kamoona, S.N.; Masood, S.H.; Mohamed, O.A. An investigation on impact resistance of FDM processed Nylon-12 parts using response surface methodology. *Aip Conf. Proc.* 2017, 1859, 020120.
27. Ramesh, M.; Panneerselvam, K. Mechanical investigation and optimization of parameter selection for Nylon material processed by FDM. *Mater. Today Proc.* 2020.
28. Kemmish, D.J. *Practical Guide to High Performance Engineering Plastics*; Smithers Rapra: Ravenna, OH, USA, 2011.
29. Oztan, C.; Karkkainen, R.; Fittipaldi, M.; Nygren, G.; Roberson, L.; Lane, M.; Celik, E. Microstructure and mechanical properties of three dimensional-printed continuous fiber composites. *J. Compos. Mater.* 2019, 53, 271–280.
30. Papon, E.A.; Haque, A. Fracture toughness of additively manufactured carbon fiber reinforced composites. *Addit. Manuf.* 2019, 26, 41–52.
31. Kumar, M.; Ramakrishnan, R.; Omarbekova, A. 3D printed polycarbonate reinforced acrylonitrile–butadiene–styrene composites: Composition effects on mechanical properties, micro-structure and void formation study. *J. Mech. Sci. Technol.* 2019, 33, 5219–5226.
32. Alsoufi, M.S.; Elsayed, A.E. Warping deformation of desktop 3D printed parts manufactured by open source fused deposition modeling (FDM) system. *Int. J. Mech. Mechatron. Eng.* 2017, 17, 7–16.
33. Zhang, W.; Wu, A.S.; Sun, J.; Quan, Z.; Gu, B.; Sun, B.; Cotton, C.; Heider, D.; Chou, T.W. Characterization of residual stress and deformation in additively

manufactured ABS polymer and composite specimens. *Compos. Sci. Technol.* 2017, 150, 102–110.

34. Jayanth, N.; Senthil, P.; Prakash, C. Effect of chemical treatment on tensile strength and surface roughness of 3D-printed ABS using the FDM process. *Virtual Phys. Prototyp.* 2018, 13, 155–163.

35. Li, N.; Li, Y.; Liu, S. Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing. *J. Mater. Process. Technol.* 2016, 238, 218–225.

36. Garg, A.; Bhattacharya, A.; Batish, A. On surface finish and dimensional accuracy of FDM parts after cold vapor treatment. *Mater. Manuf. Process.* 2016, 31, 522–529.

37. Chen, L.; Zhang, X.; Wang, Y.; Osswald, T.A. Laser polishing of Cu/PLA composite parts fabricated by fused deposition modeling: Analysis of surface finish and mechanical properties. *Polym. Compos.* 2020, 41, 1356–1368.

38. Langnau, L. What is Polymer Directed Energy Deposition (DED) for 3D Printing and How Can it Benefit You? Available online: <https://www.designworldonline.com/what-is-polymer-directed-energy-depositionded-for-3d-printing-and-how-can-it-benefit-you/> (accessed on 3 April 2020).

39. Singh, S.U.; Singh, R.U. Effect of annealing on surface roughness of additively manufactured plastic parts: A case study. In *Proceedings of the National Conference on Production Engineering (COPE-2016)*, Guru Nanak Dev Engineering college, Ludhiana, India, 7–8 October 2016.

40. Singh, S.; Singh, M.; Prakash, C.; Gupta, M.K.; Mia, M.; Singh, R. Optimization and reliability analysis to improve surface quality and mechanical characteristics of heat-treated fused filament fabricated parts. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019, 102, 1521–1536.

41. Hong, J.H.; Yu, T.; Chen, Z.; Park, S.J.; Kim, Y.H. Improvement of flexural strength and compressive strength by heat treatment of PLA filament for 3D-printing. *Mod. Phys. Lett. B* 2019, 33, 1940025.

42. STANSBURY, Jeffrey W.; IDACAVAGE, Mike J. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental materials*, 2016, 32.1: 54-64.

43. Yang, K., Appuhamillage, G. K. S. A., Shaffer, S., Lund, B., Smaldone, R., & Voit, W. (2014, August). Novel polymers for 3D printing with improved interlayer adhesion by reversible Diels-Alder reactions. In *ABSTRACTS OF PAPERS OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY (Vol. 248)*. 1155 16TH ST, NW, WASHINGTON, DC 20036 USA: AMER CHEMICAL SOC.

44. COMPTON, Brett G.; LEWIS, Jennifer A. 3D-printing of lightweight cellular composites. *Advanced materials*, 2014, 26.34: 5930-5935.

45. Wohlers T. 3D printing and additive manufacturing state of the industry Annual Worldwide Progress Report Wohlers Report; 2017.

46. Council NR. Accelerating technology transition: bridging the valley of death for materials and processes in defense systems. National Academies Press; 2004.

47. NGO, Tuan D., et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143: 172-196.

48. Ryder MA, Lados DA, Iannacchione GS, Peterson AM. Fabrication and properties of novel polymer-metal composites using fused deposition modeling. *Compos Sci Technol* 2018;158:43–50.

49. <https://3dreams.com.ua>

50. https://techfactory.com.ua/p1524266103-professionalnyj-teplovizor-uni.html?source=merchant_center&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAm4WsBhCiARIsAEJIEzWIP9ctMK34VOzbcwYR0ljuOnUHoQ3YBNwT-6QnVFR2bVTIAZudoLcaAvmIEALw_wcB

51. <https://rozetka.com.ua/ua/197817463/p197817463/>

52. <https://events.pstu.edu/centreuc/equipment/universalna-servopryvidna-vyprobuv/>

53. 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.

54. 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)

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

56. 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).

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

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

59. 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 властивостей деталей з нейлону, надрукованих методом FDM після термічної обробки.

Таблиця А1 – Протокол дослідження параметрів

№	a, мм	b, мм	σ , МПа
0	12,00	4,00	45,00
1	12,00	4,10	58,10
2	12,10	4,15	53,61
3	12,10	4,00	50,25
4	12,40	4,20	51,28
5	12,00	4,10	57,45
6	11,90	3,90	51,79
7	12,10	4,20	59,45
8	12,10	4,20	49,33
9	12,20	4,15	53,68
10	12,10	4,00	50,55
11	12,10	4,15	50,01
12	12,00	4,10	58,55
13	12,15	4,10	52,10
14	12,2	4,15	51,89
15	12,00	4,10	51,42
16	11,90	4,00	55,20
17	12,00	4,05	50,31
18	11,90	4,10	54,28
19	11,90	3,90	52,31
20	12,00	4,15	51,95
21	12,10	4,10	52,92
22	12,05	4,20	54,21
23	12,10	4,10	55,10
24	11,90	4,00	53,22
25	12,30	4,15	53,48
26	11,90	3,90	52,28
27	12,10	4,10	52,18