

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
(повне найменування факультету)

Композиційні матеріали, хімії та технологій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему **ВПЛИВ РЕЖИМІВ 3D-ДРУКУ ПОЛІМЕРНИХ ВИРОБІВ НА ЇХ
МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ**

Виконала: студентка 2 курсу, групи БАД

214м

Спеціальності 132 Матеріалознавство

Освітня програма (спеціалізація)

«Композиційні та порошкові матеріали,

покриття»

Крістіна КРАСНОПОЛЬСЬКА

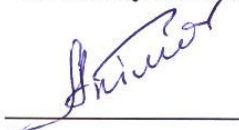
Керівник к.т.н., доц. Іван АКІМОВ

Рецензент к.т.н., доц. Олексій КАПУСТЯН

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
 Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 132 Матеріалознавство
(код і найменування)
 Освітня програма «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ
в.о. завідувача кафедри КМХТ


 доц. Іван АКИМОВ

«10» жовтня 2025 року

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

КРАСНОПОЛЬСЬКА Крістіна Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Вплив параметрів 3D-друку на властивості виробу.

керівник проекту (роботи) Акімов Іван Васильович, к.т.н., доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «29» вересня 2025 року № 446.

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 14.12.2025.

3. Вихідні дані до проекту (роботи): Вироби, що виготовлені методом 3D друку з філаменту PowerPlant Filament 1.75 мм за допомогою 3D-принтера MakerBot Replicator+ та їх механічні властивості при різних кутах друку та товщини шару.

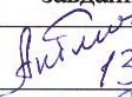
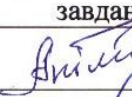
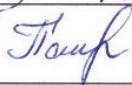
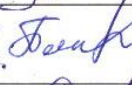

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

- 1) Вступ.
- 2) Теоретичні основи 3D-друку полімерних виробів
- 3) Вплив міжшарових зв'язків на механічні властивості.
- 4) Полімерні матеріали для 3D-друку та їх структура.
- 5) Типи полімерів для FDM-друку.
- 6) Вплив структури полімеру на механічні властивості виробу.
- 7) Практичні наслідки вибору матеріалу.
- 8) Основні механічні властивості полімерів у контексті 3D-друку.
- 9) Параметри 3D-друку та їх вплив на механічні властивості.
- 10) Взаємозв'язок між режимами друку та властивостями полімерів.
- 11) Взаємодія матеріалу та режимів друку.
- 12) Висновки.
- 13) Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

- 1) Опис та фото 3D принтеру MakerBot Replicator+.
- 2) Опис та фото розривної випробувальної машина UIT STM 100.
- 3) Типовий зовнішній вигляд випробувального зразку, надрукованого за допомогою філаменту PowerPlant Filament та його розміри.
- 4) Зовнішній вигляд попередньо надрукованого пристосування, що забезпечувало друк зразків під різними кутами до платформи.
- 5) Схеми орієнтування виробу-зразку на столі-платформі 3D принтеру при друці.
- 6) Формула рівняння математичної моделі залежності границі міцності 3D друкованого виробу від ширини екструзії S та кута нахилу шарів α .
- 7) Графічне відображення залежності границі міцності 3D друкованого виробу від ширини екструзії S та кута нахилу шарів α .
- 8) Аналіз результатів експерименту, розрахунок коефіцієнтів кореляції та анізотропії властивостей 3D друкованого виробу.
- 9) Висновки.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Прийняв виконане завдання
1-3	Акімов І.В. к.т.н., доцент	 13.10.25р	
1-3	Нормоконтроль Петруша Ю.Ю. к.б.н., доцент	 13.10.25р.	
	Перевірка на плагіат. Петрашов О.С.	13.10.25р	

7. Дата видачі завдання «14» жовтня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1)	Літературний аналіз	30.10.25	Викон.
2)	Опис об'єкту дослідження.	05.11.25	Викон.
3)	Оцінка методів контролю властивостей.	17.11.25	Викон.
4)	Планування експерименту та його проведення.	19.11.25	Викон.
5)	Аналіз результатів експерименту та визначення оптимальних показників факторів 3D друку.	01.12.25	Викон.
6)	Висновки.	10.12.25	Викон.

Студент(ка)




(підпис)

Крістіна КРАСНОПОЛЬСЬКА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи)



(підпис)

Іван АКІМОВ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ до дипломного проєкту магістра «Дослідження впливу режимів 3D-друку полімерних виробів на їх механічні властивості» складається з 50 сторінок, 13 рисунків, 8 таблиць, 15 джерел.

Об'єкт дослідження – полімерні зразки, виготовлені методом 3D-друку, та процес їх неруйнівного контролю для визначення структурних дефектів і оцінки механічних властивостей

Мета роботи – встановити вплив основних режимів 3D-друку (температури екструзії, швидкості друку, висоти шару, орієнтації побудови та параметрів охолодження) на механічні властивості полімерних виробів і визначити закономірності формування структури надрукованих деталей залежно від умов друку.

У роботі досліджено технологічні параметри адитивного виробництва та їх вплив на якість сформованої структури полімерних деталей. Проведено виготовлення серії тестових зразків за різних режимів 3D-друку та виконано їх механічні випробування (визначення міцності, жорсткості та деформаційних характеристик). На основі отриманих результатів встановлено залежності між параметрами друку, структурною однорідністю та механічною міцністю надрукованих виробів.

3D-ДРУК, ПОЛІМЕРИ, АДТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, МЕХАНІЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ, АНІЗОТРОПІЯ.

SYMMARY

Master's Qualification Thesis «Study of the Influence of 3D Printing Parameters on the Mechanical Properties of Polymer Products»: 50 pages, 13 figures, 8 tables, 15 sources.

Object of the study – polymer samples manufactured by 3D printing and the process of their non-destructive testing to detect structural defects and evaluate mechanical properties.

Purpose of the work – to determine the influence of the main 3D printing parameters (extrusion temperature, printing speed, layer height, build orientation and cooling conditions) on the mechanical properties of polymer products, and to identify the regularities of structure formation in printed parts depending on printing conditions.

The work investigates the technological parameters of additive manufacturing and their effect on the quality of the formed structure of polymer parts. A series of test samples was produced under various 3D printing modes, followed by mechanical testing (determination of strength, stiffness and deformation characteristics). Based on the obtained results, correlations were established between printing parameters, structural uniformity, and the mechanical strength of the printed products.

3D PRINTING, POLYMERS, ADDITIVE TECHNOLOGIES, MECHANICAL PROPERTIES, ANISOTROPY.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
Розділ 1. Види 3D друку та вплив факторів на показники якості 3D друкованих полімерних виробів.....	9
1.1 Теоретичні основи 3D-друку полімерних виробів.....	10
1.2 Полімерні матеріали для 3D-друку та їх структура	12
1.3 Основні механічні властивості полімерів у контексті 3D друк.....	15
1.4 Параметри 3D-друку та їх вплив на механічні властивості.....	19
1.5 Взаємозв'язок між режимами друку та властивостями полімерів.....	21
1.6 Експериментальні дані та аналіз літератури.....	24
Розділ 2. Методика дослідження.....	27
2.1 Об'єкт та засоби дослідження.....	27
2.2 Методика проведення випробувань.....	30
2.3 Обробка результатів випробувань.....	31
2.4 Опис 3D-принтера MakerBot Replicator.....	33
2.5 Методика виготовлення зразків на 3D-принтері MakerBot Replicator+.....	35
Розділ 3. Дослідження впливу параметрів 3D-друку на механічні властивості виробу	38
Висновки.....	48
Перелік джерел посилань.....	49

ВСТУП

Сучасні адитивні технології, відомі як 3D-друк, стрімко розвиваються та стають невід'ємною частиною промислового виробництва, науки та медицини. Вони забезпечують новий підхід до виготовлення деталей, що дозволяє створювати складні конструкції з високою точністю, скорочувати витрати матеріалів і часу, а також швидко прототипувати вироби [1, 2].

Особливо актуальним є вивчення впливу режимів 3D-друку на механічні властивості полімерних виробів. Механічні характеристики – міцність, пластичність, твердість, ударна в'язкість – визначають надійність і довговічність виробів у реальних умовах експлуатації. Встановлення зв'язку між параметрами друку та механічними властивостями дозволяє оптимізувати процес виготовлення деталей, підвищуючи їхню якість та ефективність [3, 4].

Мета дослідження: визначити, як різні режими 3D-друку впливають на механічні властивості полімерних виробів та узагальнити результати експериментальних досліджень у наукових джерелах.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасні технології 3D-друку полімерів і класифікацію методів.
2. Узагальнити дані про полімерні матеріали, які використовуються у 3D-друку, та їх властивості.
3. Вивчити вплив основних параметрів друку на механічні характеристики виробів.
4. Зробити огляд експериментальних робіт та визначити тенденції впливу режимів друку на міцність, пластичність, твердість і ударну в'язкість.

Об'єкт дослідження: полімерні вироби, виготовлені методом 3D-друку.

Предмет дослідження: технологічні режими 3D-друку та їх вплив на механічні властивості полімерних виробів.

Актуальність дослідження зумовлена тим, що правильний вибір режимів друку і матеріалів дозволяє підвищити якість виробів, зменшити кількість дефектів та витрати виробництва, що є важливим для промислового впровадження адитивних технологій [5, 6].

РОЗДІЛ 1

ВИДИ 3D ДРУКУ ТА ВПЛИВ ФАКТОРІВ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ 3D ДРУКОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ ВИРОБІВ

1.1. Теоретичні основи 3D-друку полімерних виробів

3D-друк полімерів відноситься до адитивних технологій, коли виріб створюється поступово – шар за шаром. Це відрізняє його від традиційних методів, як-от фрезерування чи токарна обробка, де матеріал знімається зайвий. Завдяки цьому вдається виготовляти деталі зі складною геометрією, внутрішніми каналами чи порожнинами без додаткових інструментів і з мінімальними відходами [2].

Серед сучасних способів 3D-друку полімерів найчастіше використовуються такі: FDM (Fused Deposition Modeling) або FFF – технологія, де нитка термопластика плавиться у соплі й наноситься шарами на платформу. Це найбільш доступний і поширений метод завдяки простому обладнанню та невисокій вартості матеріалів [3].

SLA (Stereolithography) – друк за допомогою лазера чи світлодіодного джерела, яке полімеризує рідку смолу. Цей метод дає дуже точні й гладкі моделі, але матеріали SLA зазвичай менш міцні й більш крихкі [4].

SLS (Selective Laser Sintering) – лазерне спікання полімерного порошку. Воно дозволяє друкувати вироби без підтримок і з високою міцністю, навіть у випадку складної форми [5].

Найчастіше ж у навчальних закладах та промисловості застосовують саме FDM-друк. Його особливість у тому, що виріб формується шарами: кожен новий шар з'єднується з попереднім, утворюючи міжшаровий зв'язок. Від цього напряму залежать механічні властивості готової деталі – її міцність, пластичність, твердість, ударна в'язкість, а також можливість виникнення дефектів (порожнин, тріщин, відшарувань) [2, 8].

Міцність деталей, надрукованих методом FDM, напряму залежить від того, наскільки добре з'єднуються шари між собою. Якщо пластик не встигає повністю сплавитися з попереднім шаром, утворюються мікропорожнини та слабкі місця. Саме вони стають точками, де концентрується напруження під час навантаження. Щоб уникнути цього, важливо тримати достатньо високу температуру екструдера та не ставити надто велику швидкість друку – тоді шари краще з'єднуються.

Перевіряють якість таких з'єднань за допомогою стандартних механічних тестів: на розтяг, вигин, твердість по Шору та ударну міцність. Результати показують, що залежно від режимів друку та орієнтації шарів міцність готової деталі може змінюватися на 20 – 30 % [9].

Основні параметри, що впливають на властивості FDM-друку:

- температура екструдера – визначає, наскільки добре пластик плавиться й прилипає до попереднього шару. Якщо температура замала – шари не з'єднуються, якщо завелика – можливі деформації;
- швидкість друку – впливає на час контакту шарів. занадто швидко – шари не зчіплюються, занадто повільно – пластик розтікається;
- висота шару – чим тонший шар, тим більша площа з'єднання й тим міцніший виріб, але друк займає більше часу.

Заповнення (infill) – відсоток внутрішньої щільності. Вищий infill робить деталь міцнішою та твердішою [2, 10].

Орієнтація шарів – напрямок їх укладання впливає на те, де деталь буде найбільш міцною, а де – найвразливішою [2, 10]. Вплив основних параметрів друку на механічні властивості полімерів наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вплив основних параметрів друку на механічні властивості полімерів

Параметр	Діапазон	Вплив на міцність	Вплив на пластичність
Температура	PLA: 200-210°C	↑ міцність при оптимальній	↓ пластичність при перегріві
Швидкість	40-60 мм/с	Оптимальна міцність	Помірна пластичність
Висота шару	0,1-0,3 мм	↓ шар - ↑міцність	↓ пластичність при тонких шарах
Заповнення	20-100%	↑ при більшому infill	↓ пластичність при щільному infill
Орієнтація шарів	0-90°	Паралельно ↑ міцність	Перпендикулярно ↓ пластичність

3D-друк полімерних деталей – це сучасний процес, у якому властивості виробу залежать як від самого матеріалу, так і від правильно підібраних параметрів друку. Шарова будова, міцність з'єднання між шарами, температура, швидкість, висота шару та відсоток заповнення безпосередньо впливають на такі характеристики, як міцність, пластичність, твердість і ударна в'язкість. Щоб отримати вироби з потрібними властивостями, важливо розуміти ці взаємозв'язки та вміти підбирати оптимальні режими друку.

1.2 Полімерні матеріали для 3D-друку та їх структура

Полімери, які використовуються для 3D-друку, діляться на аморфні та напівкристалічні, і саме їхня структура визначає основні механічні властивості майбутніх виробів [11].

Аморфні полімери мають хаотичне розташування молекул без кристалічних зон. Завдяки цьому вони добре піддаються друкуванню, пластичні та зручні в обробці. Проте їхня твердість і ударна міцність невисокі. Найпоширеніший приклад – PLA, який легко друкується та підходить для створення прототипів чи декоративних елементів.

Напівкристалічні полімери містять впорядковані ділянки, що робить їх міцнішими, твердішими й більш термостійкими. До цієї групи належать ABS та PETG [2, 13]. Вони краще витримують удари та навантаження, однак під час друку потребують точного контролю температури, інакше можуть з'явитися деформації.

Типи полімерів для FDM-друку. Найчастіше для 3D-друку використовують кілька видів термопластів, кожен з яких має свої плюси й мінуси:

- PLA (полілактид) – екологічний матеріал, адже виготовляється з рослинної сировини та є біорозкладним. Він відрізняється високою жорсткістю, легко друкується й майже не дає усадки. Проте має і недоліки – низьку ударну міцність і невисоку термостійкість (приблизно до 60 °C);

- ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол) – міцний та стійкий до ударів пластик. Для якісного друку вимагає підігріву платформи й контрольованого охолодження. Добре обробляється після друку: його можна шліфувати, фарбувати чи клеювати;

- PETG (поліетилентерефталат-гліколь) – поєднує міцність і певну гнучкість, витримує удари, майже не дає усадки та добре зчіплюється між шарами. Завдяки цим

властивостям підходить для виготовлення функціональних деталей, яким потрібна еластичність [2, 6];

– TPU (термопластичний поліуретан) – дуже гнучкий та еластичний матеріал з високою ударною в'язкістю. Використовується для друку елементів, що мають амортизувати або витримувати часті деформації. Основні механічні властивості полімерів для FDM-друку наведено в табл. 1.2.

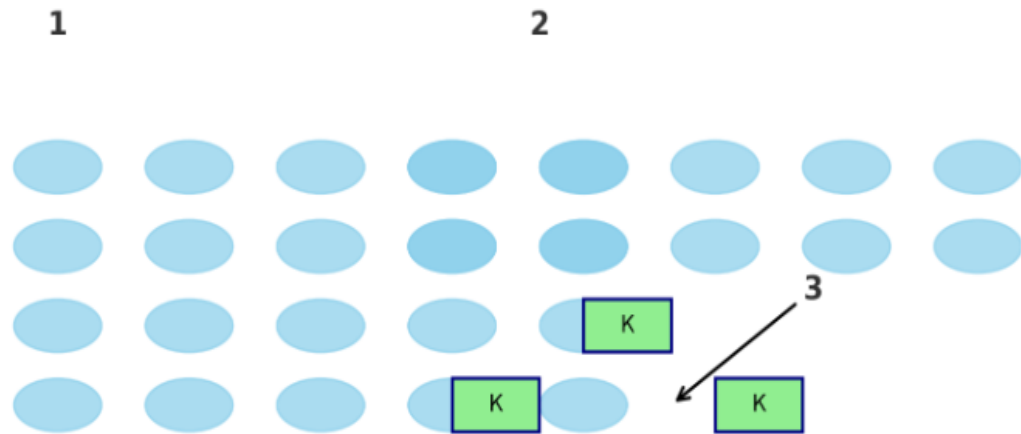
Таблиця 1.2 – Основні механічні властивості полімерів для FDM-друку

Полімер	Міцність при розтягуванні, МПа	Пластичність, %	Твердість, Шор А	Ударна в'язкість, кДж/м ²
Температура	60-70	6-10	80	2-3
Швидкість	40-50	10-20	75	5-6
Висота шару	50-60	10-15	75	4-5
Заповнення	25-30	200-600	60	15-20

Вплив структури полімеру на механічні властивості виробу. Міцність і твердість деталей у 3D-друці залежать від того, як саме макромолекули полімеру взаємодіють між шарами.

Аморфні полімери мають слабші зв'язки між молекулами, через що їхня міцність на розтяг обмежена. Зате вони більш еластичні й краще витримують деформації.

Напівкристалічні полімери утворюють усередині шарів кристалічні зони (рис. 1.1), які працюють як «каркас». Це робить матеріал твердішим і більш стійким до ударів, хоча водночас зменшує його пластичність.



1 – Аморфна структура; 2 – Напівкристалічна структура

3 – Локальні «міцні осередки» (кристалічні ділянки, які підсилюють матеріал)

Рисунок 1.1 – Вплив кристалічності на механічні властивості полімерів

Практичні наслідки вибору матеріалу. Вибір полімеру напряму впливає і на властивості готової деталі, і на вимоги до процесу друку. PLA підходить для декоративних виробів чи прототипів, де важлива точність, але навантаження невеликі.

ABS або PETG краще використовувати для функціональних деталей, які повинні витримувати удари чи механічні навантаження.

TPU ідеальний варіант для гнучких елементів, що працюють як амортизатори або часто деформуються.

Отже, поєднання структури полімеру та обраних режимів друку визначає, якими будуть механічні характеристики виробу та чи зможе він витримувати умови експлуатації.

1.3 Основні механічні властивості полімерів у контексті 3D-друку

Механічні властивості виробів, надрукованих методом FDM, визначають, наскільки деталь буде довговічною, надійною та безпечною у використанні. Головними показниками є міцність, пластичність, твердість і ударна в'язкість. Вони безпосередньо залежать від структури полімеру та параметрів друку, адже саме вони формують міжшарові зв'язки й внутрішню будову виробу [2, 14].

Міцність показує, наскільки матеріал здатний витримувати навантаження, не руйнуючись. Для виробів, надрукованих методом 3D-друку, цей показник залежить від кількох факторів:

- тип полімеру – напівкристалічні матеріали (наприклад, ABS чи PETG) зазвичай міцніші за аморфні, такі як PLA;
- орієнтація шарів – коли шари розташовані паралельно до напрямку навантаження, деталь витримує найбільше; якщо ж вони перпендикулярні – міцність значно знижується;
- температура й швидкість друку – правильно підібрана температура та помірна швидкість сприяють якісному сплавленню шарів, що суттєво підвищує міцність виробу. Міцність полімерів у залежності від матеріалу та орієнтації шарів наведено у табл. 1.3, а залежність міцності 3D-друкованих полімерів від орієнтації шарів приведено на рис. 1.2;
- пластичність показує, наскільки матеріал може змінювати форму, не ламаючись. Аморфні полімери, наприклад PLA, зазвичай менш пластичні, тоді як TPU відзначається високою пластичністю та еластичністю [11].

Таблиця 1.3 – Міцність полімерів у залежності від матеріалу та орієнтації шарів

Полімер	Орієнтація шарів	Міцність при розтягуванні, МПа
PLA	Паралельна	62
PLA	Перпендикулярна	50
ABS	Паралельна	48
ABS	Перпендикулярна	35
PETG	Паралельна	55
PETG	Перпендикулярна	42

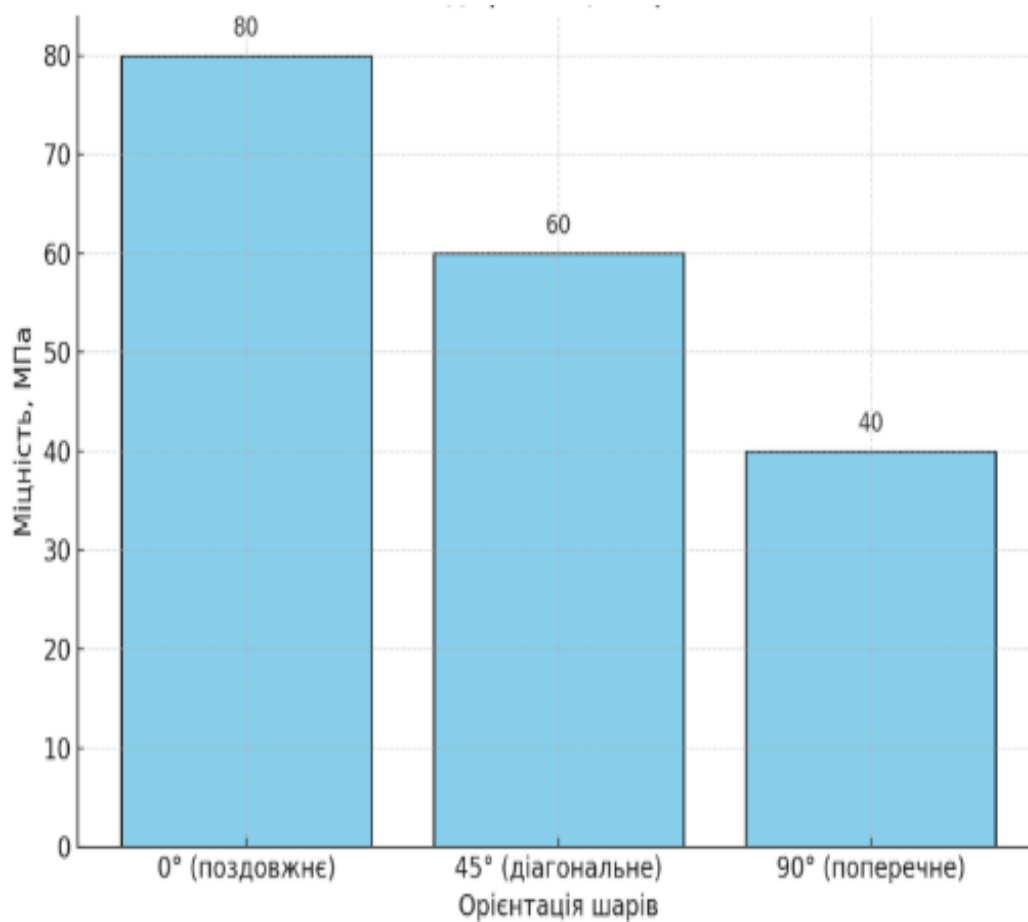


Рис. 1.2 – Залежність міцності 3D-друкованих полімерів від орієнтації шарів

Також на властивості впливає висота шару та щільність заповнення: менші шари і більший infill створюють більш рівномірну структуру і зменшують місцеві концентрації напружень. На рис. 1.3 наведено деформацію виробів із різних полімерів при однаковому навантаженні.

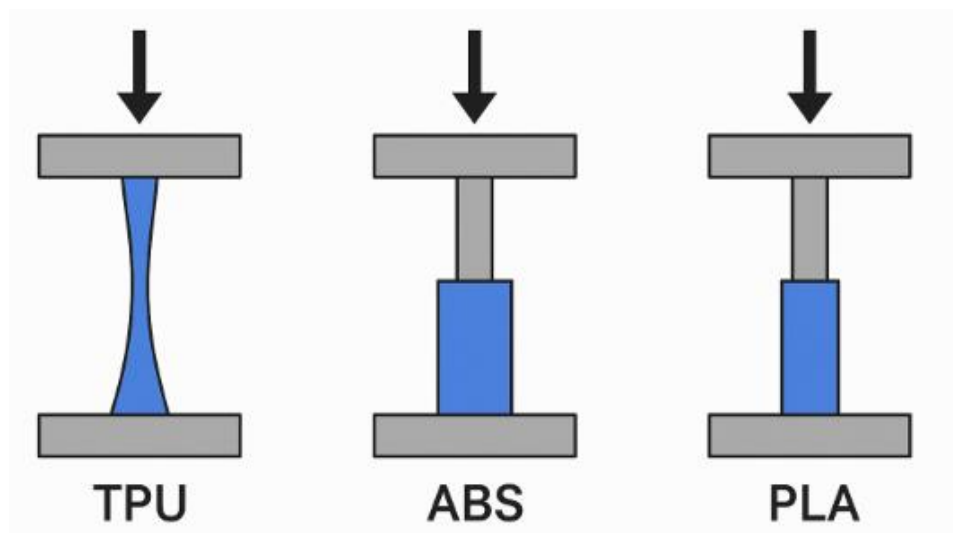


Рис. 1.3 – Деформація виробів із різних полімерів при однаковому навантаженні

Твердість. Твердість показує, наскільки матеріал може протистояти вдавлюванню або проникненню іншого об'єкта. У 3D-друкованих виробів вона залежить від кристалічності полімеру та рівня заповнення:

- PLA – досить твердий завдяки високому вмісту кристалічних ділянок, але крихкий;
- ABS – помірно твердий, але з високою ударною стійкістю;
- PETG – має середню твердість і добре гнеться.

Так, наприклад, твердість полімерів для FDM-друку наведено в табл. 1.4, а порівняння твердості полімерів на рис. 1.4.

Таблиця 1.4 – Твердість полімерів для FDM-друку

Полімер	Міцність при розтягуванні, МПа
PLA	80
ABS	75
PETG	75
TPU	60

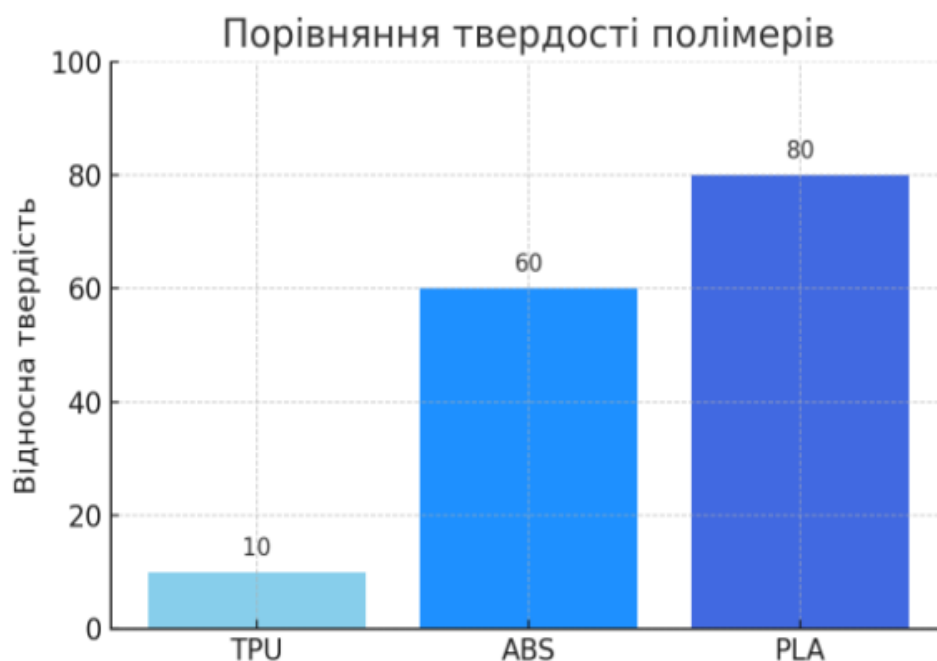


Рис. 1.4 – Порівняння твердості полімерів

Ударна в'язкість. Ударна в'язкість показує, наскільки виріб здатний витримати різкий удар або навантаження без руйнування. Найвищу ударну стійкість демонструє TPU, ABS має середню, а PLA – найнижчу. Важливу роль відіграє й орієнтація шарів: якщо шари йдуть паралельно напрямку навантаження – міцність максимальна, а при перпендикулярному розташуванні – нижча через можливе розшарування.

Механічні властивості 3D-друкованих полімерів залежать як від типу матеріалу, так і від параметрів друку:

- міцність визначається зв'язком між шарами та їхньою орієнтацією;
- пластичність залежить від виду полімеру та щільності заповнення;
- твердість формується кристалічністю та внутрішньою структурою виробу;
- ударна в'язкість залежить від поєднання типу полімеру, заповнення та орієнтації шарів.

1.4 Параметри 3D-друку та їх вплив на механічні властивості

Механічні властивості 3D-друкованих виробів значною мірою залежать від налаштувань самого процесу друку. Правильна оптимізація цих параметрів дозволяє отримати вироби з потрібною міцністю, пластичністю, твердістю та ударною в'язкістю. До основних параметрів відносяться:

Температура друку, швидкість друку, висота шару, ступінь заповнення (Infill), орієнтація шарів, режим охолодження та постобробки. Всі ці параметри доволі суттєво впливають як на якість самого виробу, що друкується так і на його механічні, а отже й експлуатаційні властивості. Вибір правильних параметрів 3D-друку тому і вважається важливим етапом підготовки до виробництва.

Температура друку. Температура друку визначає, наскільки добре плавиться і тече полімер, а це безпосередньо впливає на якість з'єднання між шарами.

- надто низька температура – шари погано з'єднуються, утворюються мікропорожнини, міцність виробу знижується;
- оптимальна температура – забезпечує максимальну міцність і твердість та мінімізує деформації;
- занадто висока температура – перегрів, деформація, зниження пластичності.

Швидкість друку. Швидкість друку впливає на те, як довго розплавлений матеріал контактує з попереднім шаром:

- низька швидкість (20–40 мм/с) → шари добре з'єднуються, виріб міцний;
- середня швидкість (40–60 мм/с) → оптимальний баланс між якістю та швидкістю друку;
- висока швидкість (>80 мм/с) → підвищується ризик утворення порожнин і мікротріщин, міцність падає.

Висота шару. Висота шару впливає на контактну площу між шарами та точність друку:

- 0,1–0,2 мм → високоякісне сплавлення шарів, точна деталізація, підвищена міцність;
- 0,3–0,4 мм → економія часу, але менша міжшарова міцність та точність.

Заповнення тіла полімерної деталі (Infill). Заповнення визначає щільність внутрішньої структури виробу:

- 20–40 % → декоративні або легкі конструкції;
- 50–70 % → стандартна міцність для функціональних деталей;
- 100 % → максимальна твердість і міцність, проте збільшення часу друку.

Орієнтація шарів. Орієнтація шарів відносно напрямку навантаження впливає на міцність, де виріб може ламатися:

- паралельно навантаженню → міцність максимальна;
- перпендикулярно навантаженню → висока ймовірність відшарування, міцність знижується;
- під кутом 45° → міцність середня, руйнування відбувається комбінованим способом.

Тож можемо зробити наступні висновки:

1. Температура друку, швидкість, висота шару та ступінь заповнення – основні параметри, що визначають механічні властивості виробу.

2. Орієнтація шарів сильно впливає на міцність і ударну в'язкість.
3. Правильне налаштування параметрів дозволяє отримувати деталі з потрібними характеристиками для конкретних навантажень.

Тож можемо бачити, що орієнтація шарів при їх нанесенні може безпосередньо впливати власне на якість виробу, на щільність укладених шарів та на наявність дефектів, що можна бачити не озброєним оком.

1.5 Взаємозв'язок між режимами друку та властивостями полімерів

Щоб максимально ефективно використовувати 3D-друк, важливо розуміти, як різні режими друку впливають на механічні властивості полімерних виробів. Взаємозв'язок між параметрами процесу та кінцевими характеристиками виробу складний і багатофакторний.

Основні фактори, що визначають механічні властивості:

1. Тип матеріалу – PLA, ABS, PETG, TPU.
2. Температура друку – впливає на текучість матеріалу та якість з'єднання шарів.
3. Швидкість друку – визначає, скільки часу розплавлений полімер контактує з попереднім шаром.
4. Висота шару – впливає на площу контакту між шарами та їхню міцність.
5. Заповнення (Infill) – визначає щільність внутрішньої структури виробу.
6. Орієнтація шарів – впливає на напрямок руйнування при навантаженні [3, 4].

Приклад впливу температури та швидкості друку. Дослідження показують, що міцність PLA значно змінюється при зміні температури і швидкості друку. Багато

джерел показують, що оптимальні значення температури 200 °C та швидкості 50 мм/с забезпечують максимальну міцність без дефектів.

Вплив висоти шару та заповнення. Висота шару та ступінь внутрішнього заповнення визначають, наскільки рівномірною буде структура виробу і наскільки добре він витримуватиме навантаження. Наприклад, PLA при висоті шару 0,1 мм і заповненні 100 % має максимальну міцність і твердість, тоді як при висоті 0,3 мм і заповненні 20 % його міцність значно знижується [1, 5]. Схематичний графік (рис. 1.5): нижча висота шару + високе заповнення → максимальна міцність.

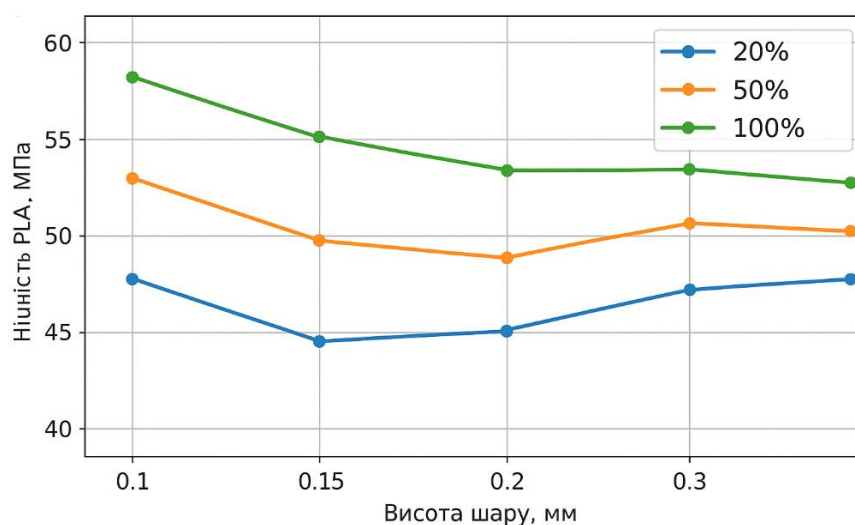


Рис. 1.5 – Залежність міцності PLA від висоти шару та заповнення

Вплив орієнтації шарів. Орієнтація шарів сильно впливає на властивості виробу:

1. Паралельно до навантаження – максимальна міцність і ударна в'язкість.
2. Перпендикулярно – шари можуть відшаровуватися, міцність знижується.
3. Під кутом 45° – проміжний варіант, руйнування відбувається комбінованим способом.

Взаємодія матеріалу та режимів друку. Різні полімери по-різному реагують на налаштування друку:

- PLA – твердий матеріал з низькою ударною в'язкістю; особливо важлива правильна температура друку [5];
- ABS – добре витримує удари і невеликі зміни швидкості друку [6];
- PETG – середня твердість та висока пластичність; критично важливо контролювати температуру та охолодження [3, 6];
- TPU – еластичний і з високою ударною в'язкістю; не сильно залежить від висоти шару, але потребує плавного друку на низькій швидкості [7].

Приклади оптимальних режимів друку для різних полімерів наведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Приклади оптимальних режимів друку для різних полімерів

Полімер	Температура, ° C	Швидкість, мм/с	Висота шару, мм	Заповнення,%	Орієнтація шарів
PLA	200	50	0,2	50	паралельно
ABS	230	50	0,2	60	паралельно
PETG	240	40	0,2	70	45°
TPU	220	30	0,2	50	паралельно

Механічні властивості 3D-друкованих виробів залежать від поєднання параметрів друку та характеристик матеріалу:

- правильна настройка температури, швидкості, висоти шару та заповнення дозволяє отримати максимальну міцність, пластичність і ударну в'язкість [1, 3];
- орієнтація шарів визначає напрямок можливого руйнування і повинна відповідати характеру експлуатаційних навантажень [2, 4];
- для кожного полімеру існують свої оптимальні режими друку, які забезпечують баланс між якістю виробу та часом друку [3, 6].

1.6 Експериментальні дані та аналіз літератури

Вивчення механічних властивостей 3D-друкованих полімерів базується на численних експериментальних дослідженнях, які показують, як матеріал і режими друку впливають на міцність, пластичність, твердість та ударну в'язкість [2, 3, 5].

Дослідження PLA. Дослідження [1, 2] показують, що PLA відзначається високою жорсткістю, але має обмежену ударну стійкість. Міцність виробів значною мірою визначається температурою екструдера та орієнтацією шарів.

Оптимальні умови друку PLA дозволяють досягти максимальної міцності при паралельній орієнтації шарів.

Дослідження ABS та PETG. ABS і PETG відзначаються високою ударною в'язкістю та гарною стійкістю до механічних навантажень [3, 6]:

- ABS добре переносить невеликі коливання швидкості друку, але потребує контрольованої платформи, щоб уникнути деформацій;
- PETG має середню твердість і високу пластичність, що робить його підходящим для функціональних деталей з гнучкими елементами.

Дослідження TPU. TPU відрізняється високою еластичністю та ударною в'язкістю серед полімерів, що робить його ідеальним для деталей, які піддаються деформації або виконують амортизуючу функцію.

Збільшення ступеня заповнення підвищує міцність і ударну в'язкість виробу, але майже не впливає на його пластичність через природну еластичність матеріалу.

Аналіз літературних даних. Аналіз наукових джерел показує:

- кожен полімер має свій оптимальний набір параметрів друку;
- міцність виробу прямо залежить від якості міжшарових зв'язків та рівня заповнення;

– пластичність та ударна в'язкість визначаються типом полімеру та його структурою (аморфна або напівкристалічна).

Орієнтація шарів критично важлива для деталей, що піддаються зовнішнім навантаженням.

Експериментальні дані та огляд літератури свідчать, що режими 3D-друку безпосередньо формують механічні властивості виробів. Оптимізація цих параметрів дозволяє:

- підвищити міцність і твердість;
- збільшити ударну в'язкість та пластичність;
- зменшити ризик відшарування шарів і деформацій.

Таким чином, правильний підбір матеріалу та налаштування режимів друку є ключем до створення надійних і функціональних виробів.

Висновки. Структура полімерів визначає механічні характеристики:

1. Аморфні полімери (PLA) – висока жорсткість і легкість друку, але обмежена ударна в'язкість.

2. Напівкристалічні полімери (ABS, PETG) – висока міцність, твердість і стійкість до ударів.

3. Еластичні полімери (TPU) – висока пластичність і ударна в'язкість.

Механічні властивості виробів залежать від параметрів друку:

1. Температура екструдера впливає на сплавлення шарів і, відповідно, на міцність та твердість.

2. Швидкість друку визначає час контакту матеріалу з попереднім шаром; занадто висока швидкість знижує міцність.

3. Висота шару та заповнення впливають на однорідність структури та міжшарову адгезію.

4. Орієнтація шарів визначає напрямок навантаження: паралельна – максимальна міцність, перпендикулярна – ризик відшарування.

Експериментальні дані підтверджують:

1. Для кожного полімеру існують оптимальні параметри друку, що забезпечують баланс між міцністю, пластичністю, твердістю та ударною в'язкістю.
2. Комплексне налаштування режимів друку (температура, швидкість, висота шару, заповнення, орієнтація шарів) підвищує надійність і довговічність виробу.
3. Недотримання режимів призводить до дефектів, порожнин, зниження механічних характеристик і ризику руйнування.

Практичне значення:

1. Дозволяє вибрати оптимальний полімер і налаштувати параметри друку для конкретного виробу.
2. Підвищує якість прототипів, декоративних і функціональних деталей.
3. Використання знань про взаємозв'язок матеріалу та режимів друку підвищує ефективність проектування та виробництва 3D-друкованих виробів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Об'єкт та засоби дослідження

Об'єктом дослідження є полімерні матеріали, виготовлені методом 3D-друку, механічні властивості яких визначалися експериментальним шляхом.

Для проведення досліджень використовували такі засоби:

– 3D-принтер MakerBot Replicator+ (рис. 2.1) – для виготовлення зразків із полімерних матеріалів (PLA, ABS, PETG) за заданими параметрами друку. Принтер забезпечує високу точність геометрії виробів та стабільність технологічних режимів;



Рис 2.1 – 3D-принтер MakerBot Replicator+

– розривна машина UIT STM 100 – для визначення основних механічних характеристик зразків, зокрема межі міцності, модуля пружності та відносного подовження при розриві. Обладнання оснащено комп'ютерною системою керування

та реєстрації даних, що дозволяє отримувати надійні результати випробувань [2] (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Розривна машина UIT STM 100

Застосування цих установок у комплексі дало змогу забезпечити повний цикл дослідження – від виготовлення зразків до визначення їхніх механічних параметрів.

Опис розривної машини UIT STM 100. Для проведення експериментальних досліджень механічних властивостей матеріалів було використано розривну машину

UIT STM 100 (серія *Smart Tension Series*). Це двоколонна сервопривідна універсальна випробувальна машина, призначена для визначення механічних характеристик матеріалів та виробів. Установка призначена для випробувань на розтяг, стиск, згин та інші види статичних навантажень.

Основні види випробувань, які може виконувати ця машина:

- випробування на розтяг (Tensile testing);
- випробування на стиск (Compression testing);
- випробування на згин (Bending testing);
- випробування на зсув та інші механічні тести.

Машина використовується для контролю якості та досліджень у різних галузях промисловості, включаючи металургію, машинобудування, будівництво та виробництво полімерів. Ключові характеристики (для моделі STM 100S):

- максимальне навантаження: 100 кН (кілоньютонів), що відповідає приблизно 10 тоннам сили;
- клас точності: 0,5;
- діапазон вимірювання навантаження: від 400 Н до 100 кН;
- діапазон швидкості переміщення траверси: 0,0005 до 1000 мм/хв (забезпечує можливість проводити як дуже повільні, так і швидкі випробування).

Керування: Повністю комп'ютеризоване за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (наприклад, SmartTension™), яке дозволяє проводити випробування згідно з міжнародними та національними стандартами (ISO, ДСТУ, ASTM тощо).

Машина забезпечує точне вимірювання сили навантаження та деформації зразка в процесі випробування. Конструкція обладнання включає дві вертикальні колони, між якими розміщено рухому і нерухому траверси. Зразок закріплюється у захватах, після чого навантажується до моменту руйнування.

Система керування машиною поєднана з комп'ютером, що дозволяє автоматично реєструвати та обробляти експериментальні дані. Програмне забезпечення візуалізує залежності «навантаження–деформація» та обчислює основні показники:

- границю міцності;
- модуль пружності (E);
- відносне подовження при розриві;
- характеристику пластичності матеріалу.

Максимальне навантаження установки становить 100 кН, що дозволяє проводити випробування широкого спектра полімерних, металевих та композиційних матеріалів.

2.2 Методика проведення випробувань

Експериментальні дослідження механічних властивостей зразків що встановлена в лабораторії механічних випробувань [5]. Машина призначена для статичних випробувань матеріалів на розтяг та стиск і обладнана системою комп'ютерного керування та збору даних.

Перед початком випробувань проводилося калібрування датчика навантаження та перевірка точності вимірювальних систем. Зразки фіксувалися у верхньому та нижньому затискачах машини, після чого прикладалося осьове навантаження зі сталою швидкістю деформації.

Під час експерименту автоматично реєструвалися такі параметри:

- поточна сила навантаження, F, Н;
- подовження зразка, Δl , мм;

- час випробування, t , с.

На основі цих даних програмне забезпечення формувало графік залежності «навантаження – подовження», за яким визначалися основні механічні характеристики матеріалу:

- границя міцності при розтязі (σ_B , МПа);
- модуль пружності (E , МПа);
- відносне подовження при розриві (ϵ , %).

Випробування проводилися при температурі (20 ± 2) °С та відносній вологості повітря (60 ± 5) %. Кожен тип зразків випробовувався не менше трьох разів для забезпечення достовірності отриманих результатів, після чого обчислювалося середнє значення механічних показників [6].

Отримані дані експортувалися в цифровому вигляді для подальшої обробки й побудови графіків.

2.3 Обробка результатів випробувань

Після завершення експериментів дані, отримані з випробувальної машини UIT STM 100, були експортовані у цифровому вигляді для подальшої математичної обробки. Основними параметрами, які визначалися в процесі аналізу, були границя міцності, модуль пружності та відносне подовження при розриві.

1. Границя міцності при розтязі.

Границю міцності (максимальне напруження, яке витримує зразок до моменту руйнування) визначали за формулою:

$$\sigma_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad (2.1)$$

де σ_m – границя міцності при розтязі, МПа;

F_{\max} – максимальне навантаження, яке витримав зразок, Н;

S_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка, мм².

2. Відносне подовження при розриві.

Відносне подовження визначалося як відношення збільшення довжини зразка до його початкової довжини:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

де ε – відносне подовження при розриві, %;

l_0 – початкова довжина робочої частини зразка, мм;

l – довжина після розриву, мм.

3. Побудова діаграми «навантаження – деформація».

На основі зареєстрованих даних було побудовано графічну залежність навантаження від деформації (P–Δl), за якою визначено основні характеристики міцності. Типова форма діаграми включає:

- початкову пружну ділянку (лінійна залежність P–Δl);
- межу пропорційності та границю пружності;
- ділянку пластичної деформації;
- момент руйнування зразка [6].

Після розрахунків усі результати були занесені до узагальненої таблиці та використані для подальшого порівняння механічних властивостей досліджуваних матеріалів [3].

Таким чином, розривна машина UIT STM 100 є сучасним високоточним обладнанням, що забезпечує комплексне визначення механічних характеристик матеріалів. Завдяки електронній системі керування та цифровій обробці сигналів

установка дозволяє отримувати достовірні результати з високим рівнем точності та повторюваності. Використання програмного забезпечення для автоматичного збору і аналізу даних значно підвищує ефективність експериментальних досліджень, забезпечуючи зручність побудови діаграм «навантаження – деформація» та розрахунку основних параметрів міцності.

Універсальність конструкції машини дає змогу проводити випробування широкого спектра матеріалів – від полімерів і композицій до металів і сплавів. Це робить UIT STM 100 незамінним інструментом у наукових та навчальних лабораторіях для дослідження закономірностей деформування і руйнування матеріалів, а також для оцінки їхньої якості та надійності.

2.4 Опис 3D-принтера MakerBot Replicator

Для виготовлення дослідних зразків було використано 3D-принтер MakerBot Replicator+, який належить до сучасних високоточних настільних установок, що працюють за технологією FDM (Fused Deposition Modeling) – моделювання методом послідовного наплавлення розплавленого полімеру [2].

Принцип роботи 3D-принтера полягає у пошаровому нанесенні розплавленого термопластичного матеріалу на платформу згідно з цифровою моделлю, створеною у CAD-середовищі. Пластикові нитки (філамент) подаються зі шпулі в нагрівальний екструдер, де розплавляється до в'язкого стану і через сопло наноситься тонким шаром. Після завершення одного шару платформа автоматично опускається на задану висоту, і процес повторюється до формування готового виробу.

Управління принтером здійснюється через вбудований дисплей або за допомогою персонального комп'ютера з установленим програмним забезпеченням

MakerBot Print, яке забезпечує імпорт 3D-моделей у форматах .STL, .OBJ або .MAKERBOT, автоматичне нарізання моделі на шари та налаштування параметрів друку.

Основні технічні характеристики принтера MakerBot Replicator+ наведено нижче:

- технологія друку: FDM (Fused Deposition Modeling);
- робоча зона друку: 295 мм × 195 мм × 165 мм;
- товщина шару: 0,1–0,3 мм;
- діаметр філаменту: 1,75 мм;
- діаметр сопла: 0,4 мм;
- робочий матеріал: PLA, Tough PLA;
- температура екструдера: до 230 °C;
- інтерфейси підключення: USB, Ethernet, Wi-Fi;
- програмне забезпечення: MakerBot Print.

Висока точність позиціонування рухомих елементів і стабільність подачі матеріалу забезпечують рівномірне нашарування полімеру та якісне формування поверхні виробів. Принтер має зручну систему калібрування платформи, автоматичне визначення рівня матеріалу та функцію відновлення друку після переривання живлення.

MakerBot Replicator+ є надійним і ефективним інструментом для реалізації технології адитивного виробництва у навчальних і науково-дослідних цілях. Використання цього обладнання дозволяє виготовляти точні зразки з полімерних матеріалів для подальших механічних випробувань, що забезпечує достовірність отриманих експериментальних результатів.

2.5 Методика виготовлення зразків на 3D-принтері MakerBot Replicator+

Виготовлення дослідних зразків здійснювалося за допомогою 3D-принтера MakerBot Replicator+ методом пошарового наплавлення термопластичного матеріалу (технологія FDM). Для друку використовувався полімер PLA (полілактид), який характеризується низькою усадкою, екологічною безпечністю та стабільністю розмірів після охолодження [7].

Підготовка моделі до друку.

3D-моделі зразків були створені у системі автоматизованого проектування SolidWorks та експортовані у формат .STL. Подальша підготовка до друку здійснювалася у програмному забезпеченні MakerBot Print, де виконувалося:

- орієнтація зразка на робочій платформі (переважно горизонтально до площини шарів);
- налаштування параметрів друку;
- створення G-коду для подальшої передачі на принтер.

Основні параметри друку.

Для забезпечення стабільної якості виготовлених зразків були використані такі параметри друку:

- матеріал філаменту: PLA;
- температура екструдера: 215 °C;
- температура платформи: 60 °C;
- висота шару: 0,2 мм;
- швидкість друку: 60 мм/с;
- відсоток заповнення: 100 %;
- тип заповнення: лінійне;
- діаметр сопла: 0,4 мм;

– товщина зовнішньої оболонки: 2 периметри.

Процес друку.

Перед початком процесу друку проводилася калібровка робочої платформи для забезпечення рівномірного нанесення першого шару. Друк здійснювався у закритій камері при стабільній температурі навколишнього середовища (20 ± 2) °C для запобігання деформації або розшарування виробів. Після завершення друку зразки охолоджувалися до кімнатної температури без примусового охолодження, що мінімізувало внутрішні напруження у структурі матеріалу.

Обробка зразків після друку.

Після охолодження зразки знімалися з платформи та піддавалися візуальному контролю на наявність дефектів – тріщин, розшарувань або нерівностей поверхні. У разі потреби проводилося легке механічне зачищення країв для видалення залишків опорного матеріалу [2, 7].

Виготовлені зразки використовувалися для подальших механічних випробувань на розтяг з метою визначення впливу параметрів 3D-друку на фізико-механічні властивості полімерного матеріалу.

У другому розділі представлено опис обладнання та методику проведення експериментальних досліджень механічних властивостей полімерних матеріалів, виготовлених методом адитивних технологій. Детально розглянуто конструкцію, принцип дії та технічні характеристики розривної машини UIT STM 100, що використовується для визначення основних показників міцності матеріалів. Наведено послідовність проведення випробувань, а також особливості обробки отриманих даних.

Окремо проаналізовано технічні можливості 3D-принтера MakerBot Replicator+, за допомогою якого виготовлялися зразки для досліджень. Визначено ключові параметри процесу друку, що впливають на формування структури та фізико-

механічні властивості виробів, зокрема температуру екструзії, швидкість подачі матеріалу, товщину шару й ступінь заповнення внутрішнього об'єму.

Проведені підготовчі роботи забезпечили отримання зразків із стабільними геометричними параметрами та високою повторюваністю результатів. Це створює надійну експериментальну базу для подальшого аналізу впливу технологічних параметрів 3D-друку на міцнісні характеристики полімерів, що буде розглянуто у третьому розділі.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ 3D-ДРУКУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИРОБУ

Як було показано у першому розділі, вироби, які отримуються методами 3D друку є шаруватими і це пов'язано із самим принципом виготовлення (друкування) виробу, який передбачає послідовне нанесення шарів полімерного матеріалу. Із курсів матеріалознавства відомо, що будь яке тіло, що в своїй структурі має будову, складену із множини шарів, характеризується анізотропією властивостей. Тобто, властивості, що визначаються у різних напрямках відрізняються одне від одного. Враховуючи той факт, що 3D принтери, які застосовуються для виготовлення виробів з полімерів у своїх паспортних даних та відомостях характеристик не містять інформації про наявність анізотропії властивостей деталей, які на них виготовляються, то становить інтерес виявлення рівня такої анізотропності. Крім того, таке питання є актуальним і пов'язано з умовами подальшої експлуатації 3D друкованих деталей за для надання певних рекомендацій, які б забезпечували надійність та довговічність даних виробів, особливо в тих випадках, коли при експлуатації на деталь діють різнонаправлені навантажуючі зусилля.

Відомо, що одним із параметрів, який можна змінювати при друкуванні виробів на найрозповсюджених 3D принтерах для полімерного друку – це товщина покладеного екструдером шару полімеру і називається – ширина екструзії S . Для різних принтерів ця ширина може змінюватися у різних діапазонах. В нашій же роботі, де застосовувався один із найрозповсюдженіших та бюджетних принтерів марки MakerBot Replicator+, ширина екструзії S полімеру може змінюватися у діапазоні $S = 0,2...0,4$ мм. Тож, виявлення впливу даного параметра друку S на механічні властивості друкованого виробу так само становить практичний та науковий інтерес.

Таким чином, мета даної роботи складалася з виявлення впливу одночасно як куту нахилу α шарів до осі зразку, так і ширини екструзії S на механічні властивості друкованого виробу та їх анізотропію. В якості механічних властивостей було обрано границю міцності при одновісному розтязі σ_b та відносне видовження δ як показників, що використовуються при висуненні експлуатаційних вимог конструктором для певних умов експлуатації.

Для отримання відповідей на поставлені в роботі питання у лабораторних умовах за допомогою принтеру MakerBot Replicator+ із використанням філаменту PowerPlant Filament діаметром 1,75 мм друкували зразки (рис. 3.1) з наступними характеристиками:

1. Довжина робочої частини $l = 60$ мм.
2. Габарити прямокутного перерізу робочої частини $13 \text{ мм} \times 7 \text{ мм}$.
3. Площа перерізу робочої частини $S_p = 91 \text{ мм}^2$.

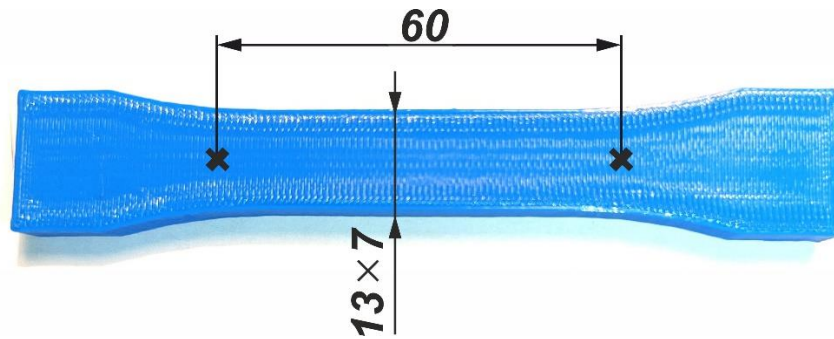


Рисунок 3.1 – Типовий зовнішній вигляд випробувального зразку, надрукованого за допомогою PowerPlant Filament

Для змінення куту нахилу шарів α , який орієнтує їх до вектору діючого зусилля при навантаженні виробу, випробувальні зразки (див. рис. 3.1) друкували під різними кутами нахилу α до головної площі, а саме до площини платформи друкування 3D принтеру. Це досягалося за допомогою спеціального, попередньо надрукованого пристосування, яке слугувало підложкою майбутнього зразку (рис. 3.2).

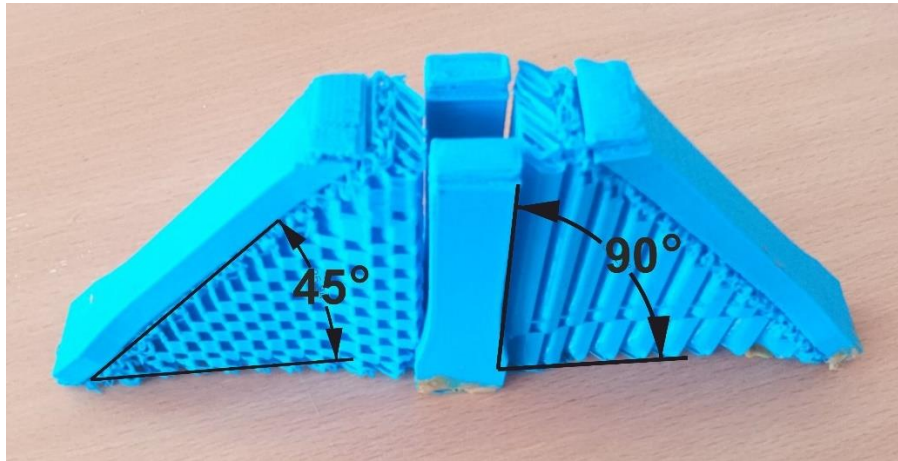


Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд попередньо надрукованого пристосування, що забезпечувало друк зразків під різними кутами α до платформи

За допомогою таких пристосувань було можливим орієнтувати шари зразків до вектору діючого навантаження при випробуваннях з наступними кутами: $\alpha=45^\circ$ та $\alpha=90^\circ$. Друк зразків з нульовим кутом ($\alpha=0^\circ$) до діючого навантаження виконували безпосередньо на столі-платформі 3D принтеру з положенням, показаним на рис. 3.3.

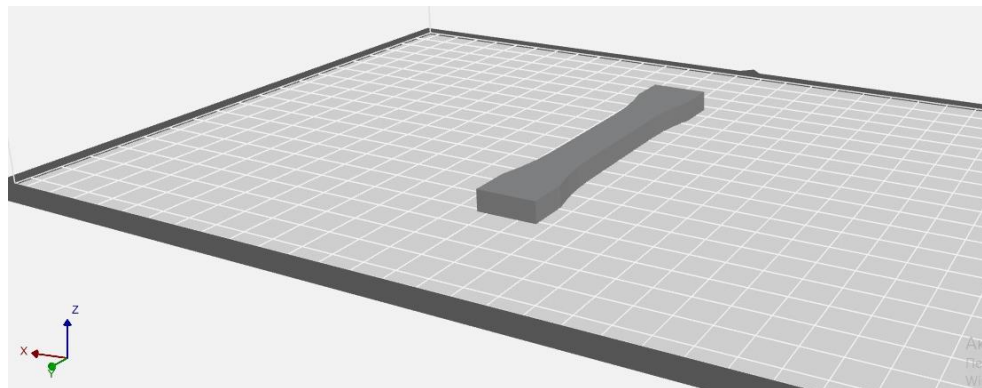
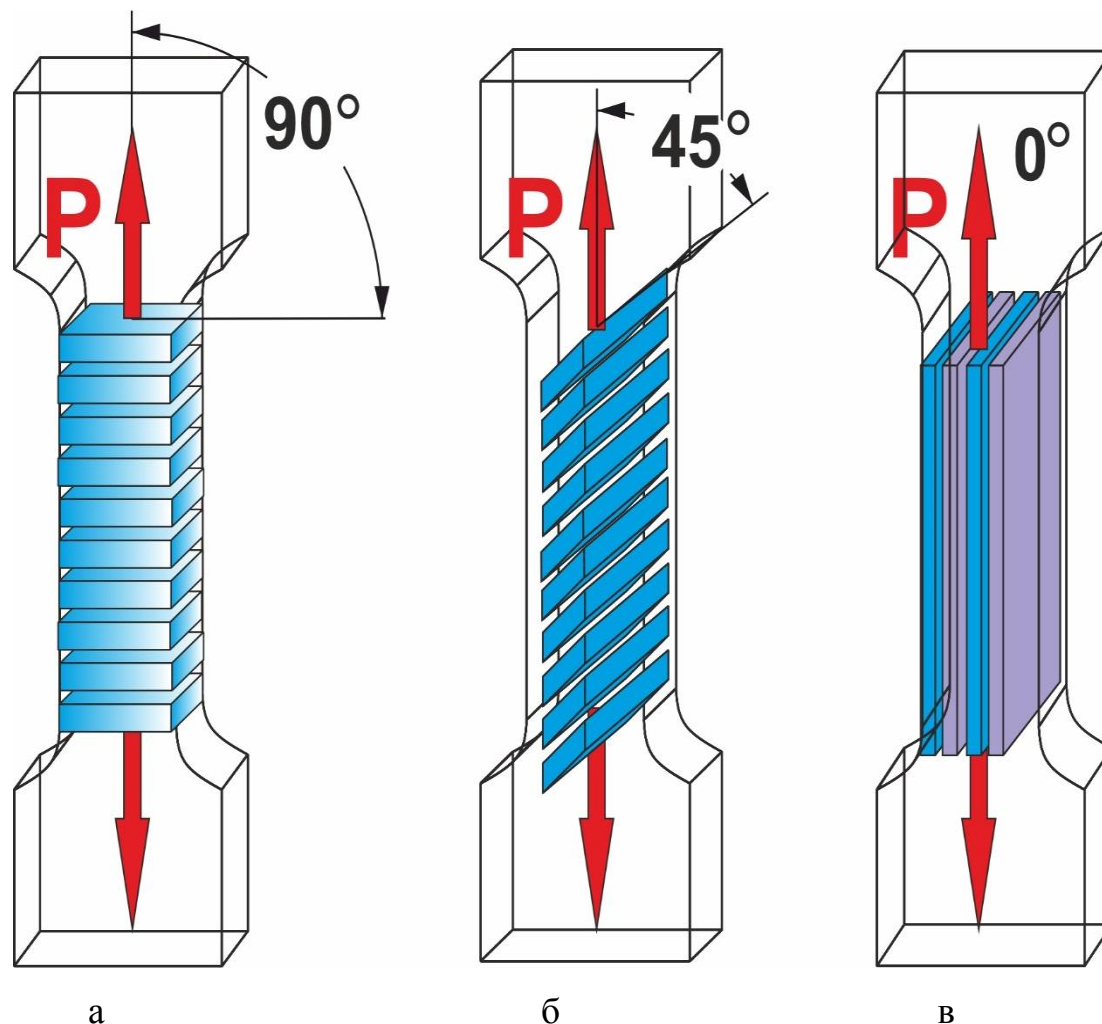


Рисунок 3.3 – Положення виробу-зразку на столі-платформі 3D принтеру при друці з нульовим кутом ($\alpha=0^\circ$) до діючого навантаження

Таким чином, у роботі отримували різнорідні випробувальні зразки, які відмінювалися між собою не лише кутом нахилу шарів α до вектору розтягуючого

зусилля P (див. рис. 3.4), але й які надруковані з різною шириною екструзії полімеру S , яка в нашій роботі мала наступні значення: 0,2; 0,3 та 0,4 мм.

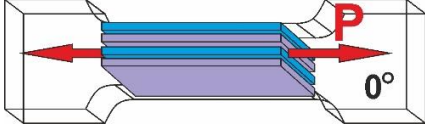
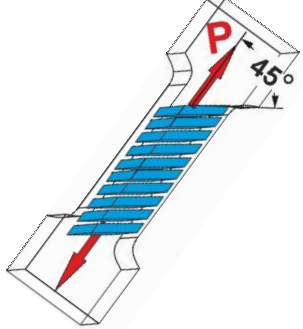
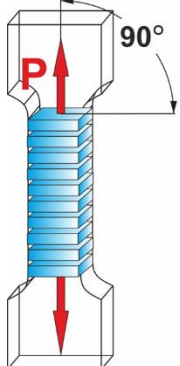


а – кут розташування шарів до вектору P $\alpha=90^\circ$; б – $\alpha=45^\circ$ та в – $\alpha=0^\circ$

Рисунок 3.4 – Умовна схема орієнтування друкованих шарів в структурі випробувального зразку відносно вектору розтягуючого зусилля P

Варіанти отриманих зразків із схемами розташування зразків на платформі 3D принтеру та напрямом дії вектору розтягуючого зусилля P при випробуваннях, а також ширина екструзії S наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Варіанти та схеми отриманих зразків

Номер варіанту зразка	Розташування зразку на платформі	Схема розташування зразку на платформі 3D принтеру та напрям дії вектору розтягуючого зусилля Р при випробуваннях	Ширина екструзії S, мм
1	Горизонтальне $\alpha = 0^\circ$		0,2
2			0,3
3			0,4
4	Нахиліне $\alpha = 45^\circ$		0,2
5			0,3
6			0,4
7	Вертикальне $\alpha = 90^\circ$		0,2
8			0,3
9			0,4

З метою визначення механічних властивостей, отримані зразки піддавали випробуванням на розтяг на двоколонній сервопривідній універсальній випробувальній машині, призначеної для визначення механічних характеристик матеріалів та виробів марки UIT STM 100 (див. рис. 2.2), яка дозволяла не лише розтягувати та розривати зразки, але й вибудовувати на моніторі графік розтягу в координатах: діюче навантаження Р (кгс); видовження зразку Δl (мм).

При дослідженнях на розтяг друківаних зразків звертало на себе увагу доволі крихке їх руйнування (рис. 3.5). При цьому, подальше вимірювання остаточної довжини зразків після розтягу та розриву показало майже не змінення робочої довжини зразку до (l_0) та після (l_k) випробувань, а розрахунок відносного видовження δ виявив доволі не суттєвий розбіг між різними варіантами зразків і знаходився в межах від 0 до 0,5 %.

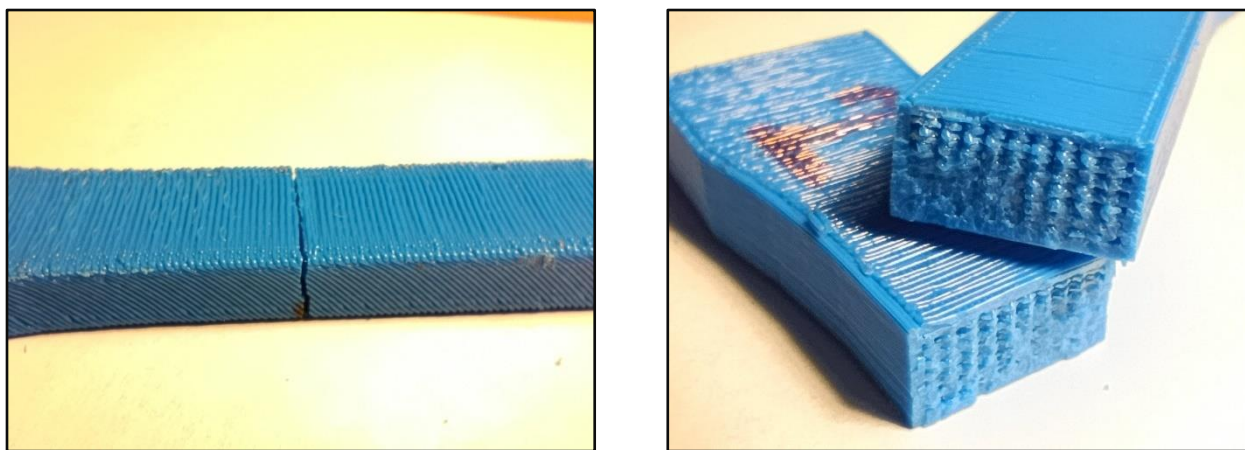


Рисунок 3.5 – Типові злами 3D-друкованих зразків

У зв'язку з цим виявлення впливу різних факторів друку та анізотропії по відношенню до відносного видовження δ в даній роботі вважали недоцільним і не проводили, а головну увагу приділили границі міцності σ_B .

Отримані результати визначення границі міцності дослідних зразків наведені у табл. 3.2. Аналіз отриманих результатів показав, що на міцність 3D-друкованих зразків доволі суттєво впливали одночасно як кут нахилу шарів α , так й ширина екструзії S .

Таблиця 3.2 – Результати визначення границі міцності σ_B

Номер варіанту зразка	Кут нахилу шарів до осі	Ширина екструзії S, мм	Міцність σ_B , МПа
1	$\alpha = 0^\circ$	0,2	32,23
2		0,3	29,35
3		0,4	27,83
4	$\alpha = 45^\circ$	0,2	25,66
5		0,3	23,12
6		0,4	20,78
7	$\alpha = 90^\circ$	0,2	20,03
8		0,3	16,26
9		0,4	14,05

Так, найбільшою міцністю характеризувалися зразки з повздовжнім розташуванням шарів ($\alpha = 0^\circ$), при чому для варіантів зразків з найменшою шириною екструзії S міцність складала майже 33 МПа – це найбільше значення σ_B у порівнянні з іншими варіантами. Найменші показники міцності визначалися для варіантів зразків з поперечним розташуванням друкованих шарів ($\alpha = 90^\circ$). А саме, наприклад, для варіанту №9, для якого ширина екструзії становила $S = 0,4$ мм, даний показник механічної властивості не перевищував 14,05 МПа, що виявилось найнижчим показником міцності у порівнянні з іншими варіантами.

Таким чином, аналіз показав, що як збільшення кута нахилу друкованих шарів α , так і збільшення ширини екструзії S погіршують характеристики міцності матеріалу. Для виявлення ступеню цього впливу у роботі будували математичну модель, де в якості незалежних факторів було обрано показники α та S, а в якості функції відклику – значення границі міцності матеріалу σ_B . Після комп'ютерного

статистичного аналізу, проведеного за допомогою програми Minitab[®], було отримано рівняння наступного виду:

$$\sigma_B = 40,58 - 0,1230 \times \alpha - 52,7 \times S - 0,0878 \times \alpha \times S \quad (3.1)$$

Кореляційний аналіз отриманої математичної моделі показав доволі суттєвий кореляційний зв'язок між розрахунковими даними σ_B та їх фактичними значеннями із протоколу випробувань, коефіцієнт кореляції при цьому дорівнював $r = 0,92$. Такі результати дають можливість використовувати отриману модель для прогнозування міцності 3D друкованих виробів при зміні режимів друку в межах, що були задіяні у даній роботі.

Для більш наглядного розуміння впливу досліджуваних у роботі параметрів 3D друку на міцність матеріалу, будували графічне відображення отриманої математичної моделі (рис. 3.6).

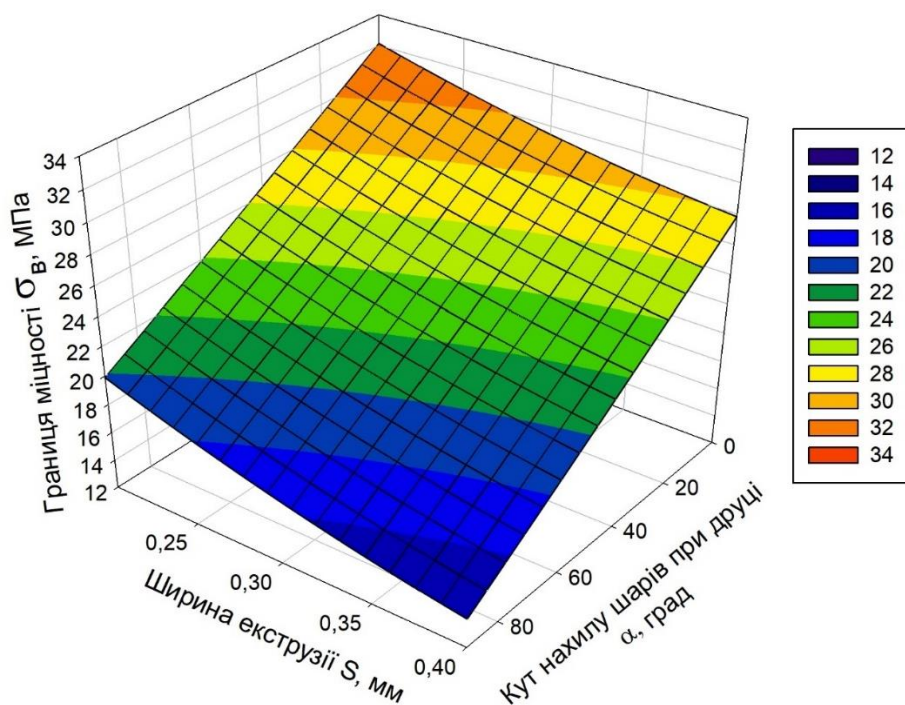


Рисунок 3.6 – Залежність границі міцності 3D друкованого виробу від ширини екструзії S та кута нахилу шарів α

Із аналізу побудованого графіку стає очевидним, що збільшення і ширини екструзії S , і куту нахилу α негативно впливають на отримувану міцність, при цьому параметр α впливає більш суттєво, особливо при перпендикулярному розташуванні друкованих шарів полімеру до вектору розтягуючого зусилля при випробуваннях на міцність.

Кількісний розрахунок коефіцієнта анізотропії λ у даній роботі проводили шляхом знаходження відношення максимального до мінімального значень міцності, виміряних у взаємо перпендикулярних напрямках. В якості таких вважали варіанти зразків з кутами відповідно $\alpha = 0^\circ$ та $\alpha = 90^\circ$, при цьому для збереження умов експерименту, при розрахунку дотримувалися однакових значень ширини екструзії S . Отримані результати наведені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати визначення коефіцієнта анізотропії λ

Значення ширини екструзії S , мм	Розрахунок коефіцієнта анізотропії λ
0,2	$\lambda = \frac{32,23}{20,03} = 1,61$
0,3	$\lambda = \frac{29,35}{16,29} = 1,80$
0,4	$\lambda = \frac{27,83}{14,05} = 1,98$

Розрахунок коефіцієнтів анізотропії λ (див. табл. 3.2) показав наявність суттєвої анізотропності міцності у 3D друкованих матеріалах. Крім того очевидно, що із збільшенням параметру 3D друку S анізотропія міцності у друкованих виробах посилюється з 1,61 до 1,98. Такі результати досліджень можна пояснити зменшенням міжшарової адгезії у 3D друкованих матеріалах при збільшенні кута α , тобто зменшується зчеплення двох різних шарів полімеру у місці їхнього контакту.

Таким чином, результати проведених досліджень показали, що 3D друківані вироби, надруківані на найбільш розповсюджених та бюджетних 3D принтерах, як то MakerBot Replicator+ за допомогою філаменту PowerPlant Filament характеризуються значною анізотропією міцності. Цей факт необхідно враховувати при виготовленні виробів для певних умов експлуатації за для забезпечення надійності та довговічності як деталей так і механізму в цілому, особливо, якщо такі вироби будуть працювати в умовах різнонаправлених векторів дії навантажуючого зусилля, а саме при проектуванні орієнтація майбутнього виробу на платформі друку повинна розташовуватися таким чином, щоб його шари мали нульовий кут нахилу до найбільшого вектору навантаження при експлуатації.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження були отримані наступні результати:

1. Досліджено вплив двох параметрів 3D друку, а саме кут нахилу шарів α та ширина екструзії S на міцність полімерного матеріалу у друкованих виробках. Показано, що міцність суттєво залежить від них і лінійно знижується при їх збільшенні.

2. У роботі побудовано математичну модель впливу вказаних параметрів на міцність матеріалу у друкованих виробках. Дана модель дає можливість кількісно оцінити вплив як куту нахилу шарів α , так й ширини екструзії S .

3. У роботі також було проведено кількісний розрахунок коефіцієнта анізотропії λ полімерного матеріалу у 3D друкованих виробках. Показано, що анізотропія в таких матеріалах є суттєвою, а коефіцієнт анізотропії λ може сягати 1,98.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer, 2021. 512 p.
2. Tymrak B.M., Kreiger M., Pearce J.M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers. Rapid Prototyping Journal. 2014. Vol. 20(2). P. 127–135.
3. Popescu D., Zapciu A., Amza C., Baciu F., Barsan E. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. Polymers. 2018. Vol. 10(7). P. 1–18.
4. Chacón J.M., Caminero M.A., García-Plaza E., Núñez P.J. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modeling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. Materials & Design. 2017. Vol. 124. P. 143–157.
5. Kuznetsov V., Solonin A., Urzhumtsev D. Strength characteristics of PLA samples depending on layer thickness and printing orientation. Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 65. P. 234–241.
6. Ziemian C.W., Ziemian R., Haile K. Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by FDM. Rapid Prototyping Journal. 2012. Vol. 18(4) . P. 264–270.
7. Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. Materials & Design. 2010. Vol. 31(1) . P. 287–295.
8. Singh R., Singh S., Singh G. Mechanical properties evaluation of FDM printed parts: Experimental approach. Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 18. P. 3642–3647.
9. Будзан Т., Грубінко В. Адитивні технології у промисловості: аналіз матеріалів та процесів. Київ: Наукова думка, 2020. 320 с.

10. Скуріхін А.Д., Євтушенко В.М. Полімери для 3D-друку: властивості та застосування. Харків: Факт, 2018. 256 с.
11. ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing – General principles – Terminology. ISO, 2021.
12. ISO 527-1:2019. Plastics – Determination of tensile properties – Part 1: General principles. ISO, 2019.
13. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. 9th edition. Wiley, 2017. 704 p.
14. Myers R.H., Montgomery D.C. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. 4th edition. Wiley, 2016. 464 p.
15. Піджарий О.В., Кашпур С.О. Полімерні матеріали та клеї: властивості, застосування, перспективи. Львів: Світ, 2017. 288 с.