

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістра
(ступінь вищої освіти)

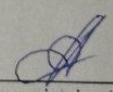
на тему **ВПЛИВ ОРІЄНТУВАННЯ ШАРІВ, ОТРИМАНИХ З 3D
ДРУКОМ, НА МІЦНІСТЬ ДЕТАЛІ ВІДНОСНО НАПРЯМКУ
РОЗТЯГУ**

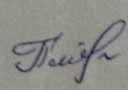
Виконав: студент 2 курсу, групи БАД-212м

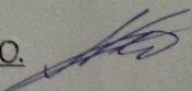
Спеціальності 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

«Композиційні та порошкові матеріали,
покриття»

САПА А. 
(прізвище та ініціали)

Керівник к.б.н., доц. ПЕТРУША Ю. 
(прізвище та ініціали)

Рецензент к.т.н., доц. КАПУСТЯН О. 
(прізвище та ініціали)

2023

Форма № 25

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олександр МІТЯЄВ« 17 » 10 2023 року

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

САПИ Артема Віталійовича(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Вплив орієнтування шарів, отриманих 3D друком, на міцність деталі відносно напрямку розтягу»

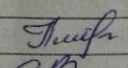
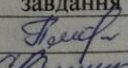
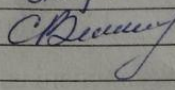
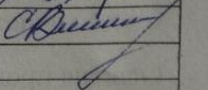
керівник проєкту (роботи) Юлія Юріївна ПЕТРУША, к.б.н., доцент(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» жовтня 2023 року № 3912. Строк подання студентом проєкту (роботи) 15 грудня 2023 р.3. Вихідні дані до проєкту (роботи) вихідні характеристики матеріалу для виготовлення зразків; обладнання та устаткування

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Вплив технологічних параметрів на міцність готових виробів. 2. Аналіз параметрів процесу друку, які впливають на механічні властивості. 3. Матеріали та методики дослідження. 4. Визначення впливу орієнтації зразку в процесі друку на міцність. 5. Дослідження впливу орієнтування шарів на міцність зразків, виготовлених FDM методом. 6. Висновки

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

Презентація

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Технічні	ПЕТРУША Ю.Ю., к.б.н., доц.		
Нормоконтр.	САВЧЕНКО В.О., к.т.н., доц.		

7. Дата видачі завдання « 17 » жовтня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

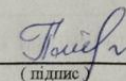
№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Вступ	26.10.2023	
2	Аналіз параметрів процесу друку, які впливають на механічні властивості	30.10.2023	
3	Матеріали та методики досліджень	10.11.2023	
4	Дослідження впливу орієнтування шарів на міцність зразків, виготовлених FDM методом	04.12.2023	
5	Висновки	11.12.2023	
6	Перелік джерел посилань	15.12.2023	

Студент(ка)


 (підпис)

 Артем САПА
 (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)


 (підпис)

 Юлія ПЕТРУША
 (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Робота складається з 55 сторінок, 24 рисунка, 8 таблиць, 22 джерела.

Об'єкт досліджень – механічні властивості конструкцій, виготовлених методом 3D-друку.

Мета роботи – аналіз впливу орієнтування шарів при виготовленні деталей методом 3D-друку на їх міцність та оцінка доцільності зменшення товщини шару для підвищення міцності конструкції при однакових інших параметрах друку.

Метод дослідження – комплексний з використанням стандартних методик, що викладені в українській та зарубіжній літературі.

У дипломній роботі вирішуються питання впливу орієнтування шарів відносно діючого навантаження деталей, виготовлених методом 3D-друку, на їх міцність; впливу кута нахилу шару на тип руйнування зразків та їх відносне видовження перед руйнуванням; порівняння значень отриманих механічних властивостей зразків з різною товщиною шару при однакових інших параметрах друку та кутах нахилу шару відносно діючого навантаження.

Дипломна робота включає такі складові: літературний огляд технічної інформації за темою дипломної роботи; опис характеристик матеріалів та технологій, пов'язаних з виготовленням зразків та їх випробуванням на розтяг; методики, що були застосовані в процесі досліджень; обробка експериментальних даних; порівняння отриманих значень випробувань; висновки.

3D-ДРУК, ЗРАЗОК, МІЦНІСТЬ, ВІДНОСНЕ ВИДОВЖЕННЯ, ТОВЩИНА ШАРУ, РУЙНУВАННЯ, КУТ НАХИЛУ ШАРУ

ABSTRACT

The work consists of 55 pages, 24 figures, 8 tables, 22 sources.

The object of research is the mechanical properties of structures made by 3D printing.

The purpose of the work is to analyze the impact of layer orientation in the manufacture of parts by 3D printing on their strength and to assess the feasibility of reducing the layer thickness to increase the strength of the structure with the same other printing parameters.

The research method is complex with the use of standard methods set out in Ukrainian and foreign literature.

The thesis addresses the issues of the influence of the orientation of the layers relative to the effective load of parts made by 3D printing on their strength; the influence of the angle of inclination of the layer on the type of fracture of samples and their relative elongation before fracture; comparison of the values of the obtained mechanical properties of samples with different layer thicknesses with the same other printing parameters and the angles of inclination of the layer relative to the acting load.

The thesis includes the following components: a literary review of technical information on the topic of the thesis; description of the characteristics of materials and technologies related to the manufacture of samples and their tensile testing; methods used in the research process; processing of experimental data; comparison of the test values obtained; conclusions.

3D PRINTING, SAMPLE, STRENGTH, ELONGATION, LAYER THICKNESS, FRACTURE, LAYER SLOPE ANGLE

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних познач, одиниць і термінів.....	8
Вступ.....	9
Розділ 1 Вплив технологічних параметрів на міцність готових виробів	
виготовлених адитивним методом	12
1.1 Класифікація методів адитивного виробництва	12
1.1.1 Лазерна полімеризація.....	13
1.1.2 Лазерне плавлення	15
1.1.3 Екструзійні методи.....	17
1.1.4 Струменеві методи.....	18
1.1.5 Клейові методи.....	19
1.1.6 Електронно-променевий метод	20
1.2 Загальні технологічні параметри FDM 3D-принтера	20
1.3 Аналіз параметрів процесу друку, які впливають на механічні	
властивості	22
1.4 Визначення впливу товщини шару, швидкості друку та	
щільності заповнення на механічні властивості.....	24
1.5 Визначення впливу орієнтації зразку в процесі друку	
на міцність	27
1.5.1 Вплив растрової орієнтації зразку на міцність	28
1.6 Визначення мети та задач дослідження	33
Розділ 2 Матеріали та методики дослідження.....	34
2.1 Загальні вказівки	34
2.2 Методика проведення випробування на одноосьовий розтяг	34
2.3 Підготовка та виготовлення зразків.....	35
2.4 Матеріал зразків	38
2.5 Обладнання для випробування на розтяг	39

Розділ 3	Дослідження впливу орієнтування шарів на міцність зразків, виготовлених FDM методом	41
3.1	Аналіз впливу орієнтування шарів на міцність при товщині шару 0,2 мм	42
3.2	Аналіз впливу орієнтування шарів на міцність при товщині шару 0,1 мм	47
	Висновки	52
	Перелік джерел посилань	53

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

ASTM – American Society for Testing and Materials (американське товариство з випробування матеріалів);

coPET – copolymer Polyethylene Terephthalate (сополімер поліетилентерефталату);

FDM – Fused deposition modeling (моделювання методом пошарового наплавлення);

PLA – polylactic acid (полімолочна кислота, полілактид)

AM – адитивне виробництво;

ϵ – відносне видовження;

σ – напруження;

S – товщина шару.

ВСТУП

3D-друк стає широко популярним у широкому діапазоні застосувань, і сучасний виробничий світ прагне замінити звичайні методи 3D-друком, де це можливо. Це здебільшого пов'язано з низкою можливих переваг, які може запропонувати 3D-друк порівняно зі звичайними енергоємними методами: можливість виготовляти складні геометрії як єдину одиницю/деталь без з'єднань, нижчі витрати на матеріали та робочу силу, хороша обробка поверхні, менша енергія, одноетапна температура обробки, менша складність процесу (модель CAD-друк-встановлення), обробка майже чистої форми, швидкий час виробництва, короткий час виконання, нижча загальна вартість порівняно зі звичайними технологіями тощо. 3D-друк також відомий як адитивне виробництво [1].

Адитивне виробництво (AM) – це технологія, яка дозволяє виготовляти фізичні компоненти з віртуальних тривимірних (3D) комп'ютерних моделей шляхом створення компонентів шар за шаром, доки деталь не буде готова. У порівнянні з субтрактивними виробничими процесами, у яких починається з блоку матеріалу та видаляється будь-який непотрібний матеріал (або вирізаючи його вручну, або використовуючи машину, таку як верстат з ЧПК), поки не залишиться бажана частина, адитивне виробництво починається з нуля і створює деталь один шар за раз, «друкуючи» кожен новий шар поверх попереднього, доки деталь не буде завершена. Залежно від конкретної технології, що використовується, товщина шару коливається від кількох мікрон до приблизно 0,25 мм [2].

Техніка швидкого прототипування є однією з найбільш перспективних технік для скорочення часу розробки продукту шляхом реалізації прототипу або компонента прототипу, який можна безпосередньо використовувати в збірках, тестуванні продукту або інструментів для коротко- чи середньосерійного виробництва. Одним з методів швидкого прототипування, які широко

використовуються сьогодні, є пошарове наплавлення (FDM) і майже половина обладнання, яке представлено на ринку, належить до цієї категорії. Оскільки цей процес можна використовувати для різноманітних застосувань, а вартість прототипу, як правило, висока, існує потреба в оптимізації параметрів процесу як з технологічної, так і з економічної точки зору. Якість прототипу проявляється кількома параметрами. Для багатьох інженерних застосувань обробка поверхні є важливим критерієм. У минулому було зроблено кілька спроб провести систематичний аналіз помилок і якості прототипів. В тому числі досліджували проблему оптимізації, враховуючи напрямок спрямованості побудови моделі. Виявилось, що вибір правильної орієнтації призвів до мінімального часу виготовлення. Також проводилось порівняння часу, вартості та точності у випадку інструментів для лиття по моделі, виготовленої за допомогою техніки стереолітографії [3].

Основна перевага використання цієї техніки полягає в тому, що вона може виробляти продукти майже чистої форми без створення фізичної форми для бажаної форми продукту. Потрібну частину/об'єкт можна намалювати як тривимірний об'єкт за допомогою комп'ютерних програмних пакетів [1]. Згодом ці програмні 3D-файли можна конвертувати у формат стереолітографії (STL), який є форматом, який може зрозуміти 3D-принтер. Типові 3D-принтери містять сопло для друку, яке може рухатися в трьох вимірах (x , y та z), а також може працювати з одним або кількома матеріалами одночасно. Деталі виготовляються шар за шаром, керуючись 3D-моделлю CAD і даними її стереолітографічної роботи [4].

Зараз проводяться численні дослідження, щоб перевірити можливість використання композитних матеріалів у 3D-друку через обмеження існуючих матеріалів. На даний час основними видами матеріалу для ФДМ є термопластичні полімерні матеріали з низькою температурою плавлення. Однак міцність цих матеріалів може бути недостатньою для деяких високоефективних застосувань. Тому були зроблені спроби покращити властивості друкарських ниток шляхом додавання частинок, таких як короткі

волокна, наночастинок та інших відповідних добавок [5]. Завдяки цим обширним дослідженням і розробкам у сфері FDM, армовані волокном нитки стають популярними і в даний час доступні для практичного застосування.

Наразі точність методів FDM досить важко передбачити, оскільки ці процеси пов'язані з численними змінними, які сильно взаємозалежні. Таким чином, зміна одного параметра може викликати послідовні зміни кількох інших параметрів одночасно. Це може спричинити проблеми з прогнозуванням поведінки обробки, водночас спричиняючи труднощі з кращим керуванням процесом, щоб отримати високоякісні друковані деталі [1].

РОЗДІЛ 1

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА МІЦНІСТЬ ГОТОВИХ ВИРОБІВ ВИГОТОВЛЕНИХ АДИТИВНИМ МЕТОДОМ

1.1 Класифікація методів адитивного виробництва

Зараз доступна велика кількість процесів адитивного виробництва. Вони відрізняються способом нанесення шарів для створення деталей, принципом роботи та матеріалами, які можна використовувати. Деякі методи плавлять або розм'якшують матеріали для створення шарів, наприклад, селективне лазерне плавлення (SLM), селективне лазерне спікання (SLS) і моделювання пошаровим наплавленням (FDM), тоді як інші затверджують рідкі матеріали, наприклад, стереолітографія (SLA). Кожен метод має свої переваги та недоліки, тому деякі компанії пропонують вибір між порошком і полімером для матеріалу, з якого створюється об'єкт. Основними міркуваннями при виборі машини є, як правило, її швидкість, вартість друкованого прототипу, вартість і діапазон матеріалів. В даний час існує значна тенденція до адитивного виробництва структурних, несучих конструкцій, використовуючи переваги свободи проектування такого процесу. Ці структури повинні бути побудовані з металу, тому увага приділяється таким процесам, як SLS/SLM, DMD та EBM для промислового використання [6].

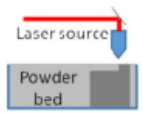
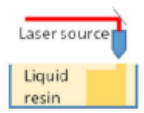
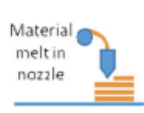
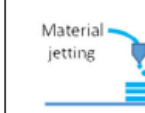
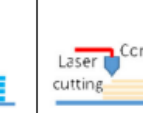
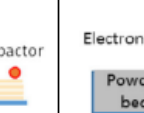
Узагальнена класифікація методів адитивного виробництва надана у таблиці 1.1.

1.1.1 Лазерна полімеризація

Стереолітографія (SLA) – заснована на принципі фотополімеризації fotocутливих мономерних смол під дією ультрафіолетового випромінювання.

Джерелом УФ-випромінювання є малопотужний лазер. Машина SLA в основному складається з вбудованої платформи, яка занурена у ванну з рідкою смолою, і лазерного джерела, включаючи відповідне апаратне та програмне забезпечення для керування [6].

Таблиця 1.1 – Класифікація методів адитивного виробництва

Additive Manufacturing (AM) Processes														
Process	Laser Based AM Processes					Extrusion Thermal	Material Jetting	Material Adhesion	Electron Beam					
	Laser Melting		Laser Polymerization											
Process Schematic														
Name Material	SLS	■	DMD	■	SLA	■	FDM	■	3DP	■	LOM	■	EBM	■
	SLM	■	LENS	■	SGC	■	Robocasting	■	IJP	■	SFP	■		
	DMLS	■	SLC	■	LTP	■			MJM	■				
			LPD	■	BIS	■			BPM	■				
					HIS	■			Thermojet	■				
Bulk Material Type		Powder	■	Liquid	■	Solid	■							

Шар деталі полімеризується на поверхні смоли лазером відповідно до даних зрізу комп'ютерної моделі. Після того, як контур шару полімеризований, платформа занурюється в смолу на один шар нижче. Лезо очищає поверхню, щоб забезпечити рівність, і створюється наступний шар, одночасно прикріплюючись до попереднього [6].

Рідинна термолімеризація (LTP) – це процес, подібний до SLA тим, що деталь створюється шляхом твердіння послідовних шарів рідкого полімеру. Однак полімери, які використовуються в LTP, є термореактивними, а не фотополімерами, і, отже, затвердіння викликається тепловою енергією, а не світлом. Термічний характер процесу ускладнює контроль розміру зони полімеризації через розсіювання тепла, тому деталі, виготовлені цим методом, менш точні. Незважаючи на це, процес має відносно високу пропускну здатність і може розглядатися у випадках, де точність не є важливою [6].

Інтерференційне затвердіння променем (BIS) – засновано на точковому затвердінні фоточутливих полімерів на перетині двох лазерних променів, що мають різну довжину хвилі. Перший лазер збуджує рідкий полімер до оборотного метастабільного стану, який згодом полімеризується випромінюванням іншого лазера. Процес пов'язаний з різними технічними обмеженнями, такими як недостатнє поглинання лазерного випромінювання на великих глибинах, ефекти затінення вже затверділого матеріалу та дифракція лазерного світла, що призводить до труднощів в отриманні точного перетину променів [6].

Затвердіння твердого ґрунту (SGC) – це технологія адитивного виробництва на основі фотополімерів, у якій виготовлення геометрії шару здійснюється за допомогою потужної УФ-лампи або лазерного джерела через маску [6].

Голографічне інтерференційне затвердіння (HIS) – у цьому процесі голографічне зображення проектується на рідкий світлочутливий полімер, що міститься в ємності, таким чином, щоб уся поверхня полімеру затверділа, а не точка за точкою. За своєю суттю процес дійсно схожий на SGC [6]. Загальна схема процесу лазерної полімеризації представлена на рис. 1.1.

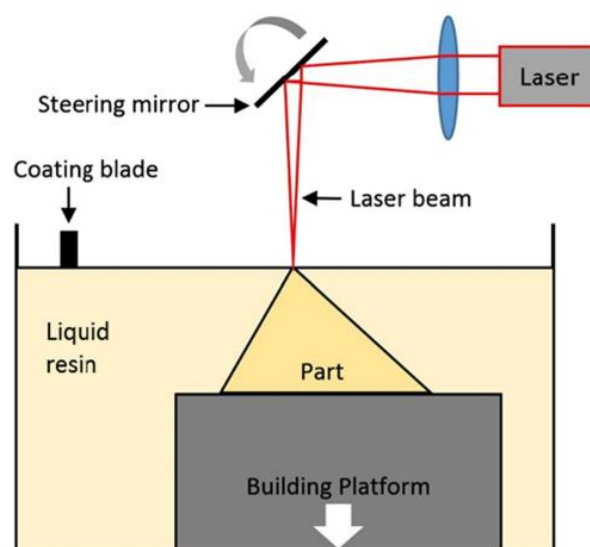


Рисунок 1.1 – Схема процесу лазерної полімеризації

1.1.2 Лазерне плавлення

Вибіркове лазерне спікання (SLS) – використовує дрібнодисперсний порошок, який нагрівається лазерним променем таким чином, щоб дозволити зернам сплавитись разом. Хоча процес відомий як спікання, це не зовсім так. Перед тим, як порошок спікається лазерним променем, весь шар нагрівається трохи нижче точки плавлення матеріалу, щоб мінімізувати термічне спотворення та полегшити сплавлення попереднього шару. Після створення кожного шару шар опускається і наноситься новий шар порошку. Потім використовується обертовий ролик для рівномірного розподілу порошку. Спечений матеріал утворює деталь, тоді як порошок неспеченого матеріалу залишається на місці, щоб підтримувати структуру. Неспечений матеріал можна очистити та переробити після завершення процесу. Матеріали, які можна використовувати – металеві порошки, нейлон, нейлонові композити, пісок, віск і полікарбонати. Однак процес все ще є відносно і страждає від таких проблем, як нерівномірний розподіл теплового поля, що може призвести до теплових спотворень і тріщин на виробі. Незважаючи на це, висока точність і якість поверхні SLS роблять його одним із найбільш часто використовуваних процесів обробки металів [6].

Селективне лазерне плавлення (SLM) – є процесом, подібним до SLS, обидва є екземплярами однієї концепції, але відрізняються технічними деталями. Замість спікання в процесі SLM відбувається плавлення порошку для формування деталі. Тому потужність лазерного променю зазвичай вище.

Пряме лазерне спікання металу (DMLS) – ще одна комерційна назва, яка використовується для опису процесу адитивного виробництва на основі лазера, подібного до SLS/SLM. Однак, хоча SLS/SLM здатний обробляти різноманітні матеріали, DMLS обробляє лише металевий порошок [6].

Лазерне порошкове осадження (LPD). У цьому багатошаровому процесі виробництва потік порошку/повітря вводиться безпосередньо в точку

фокусування лазерного променя на підкладці. Варіантами цього процесу є SLC і DMD [6].

Вибіркове лазерне наплавлення (SLC) – це ще один комерційний метод обробки матеріалів, який використовує лазер як джерело нагріву для розплавлення металевго порошку, який наноситься на підкладку. Ця техніка використовується як процес швидкого виробництва для створення точкових і пошарових деталей. Він був запроваджений як засіб створення функціональних металевих деталей із геометричною формою, наближеною до чистої, і має значну перевагу перед традиційними методами. Це пов'язано з прямим виготовленням деталі майже кінцевої форми порівняно з двоетапним процесом, що включає проміжний етап підготовки прес-форми у звичайних методах швидкого виробництва [6].

Пряме осадження металу (DMD) – це адитивна техніка виробництва, яка використовує лазер як джерело енергії для спікання або плавлення порошкоподібного матеріалу (зазвичай металу), при цьому лазер автоматично націлюється на точки в просторі, визначені 3D-моделлю, з'єднуючи матеріал разом для створення міцної структури. Принцип роботи дуже близький до процесу SLS/SLM, хоча й не має порошкового шару. Натомість порошок подається кількома соплами (зазвичай 3) безпосередньо до обробної головки, подібної до лінзи [6]. Загальна схема процесу лазерного плавлення представлена на рисунку 1.2.

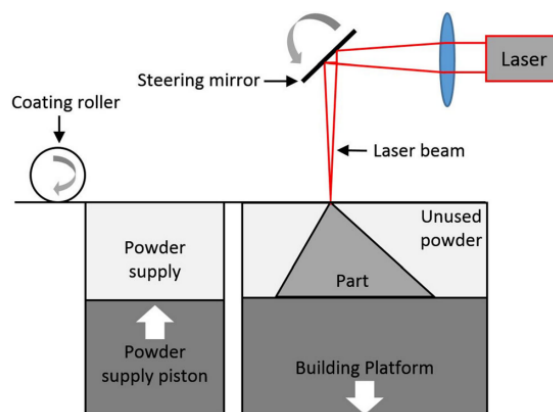


Рисунок 1.2 – Схема процесу лазерного плавлення

1.1.3 Екструзійні методи

У моделюванні пошаровим наплавленням (FDM) використовується рухома головка, яка наносить нитку розплавленого термопластичного матеріалу на підкладку. Матеріал нагрівається до такої температури, щоб він затвердів одразу після екструзії та згодом сплавлявся з попередніми шарами. Головка системи FDM зазвичай включає дві насадки, одну для матеріалу деталі, а іншу для матеріалу основи. Перевагою системи є те, що її можна розглядати як об'єкт для створення настільних прототипів, оскільки він використовує дешеві, нетоксичні матеріали без запаху різноманітних кольорів і типів, такі як акрилонітрилбутадієнстирол (ABS), медичний ABS, PLA, віск для лиття за моделлю та еластомери. Простота процесу FDM, відносно дешеве обладнання та сировина роблять його використання ідеальним для любителів, а також для виробництва недорогих пластикових деталей. Проте точність і якість поверхні відносно низькі в порівнянні з процесами на основі порошку [6].

Robocasting – це техніка виготовлення довільної форми, яка базується на пошаровому осадженні високонавантажених колоїдних суспензій для щільної кераміки та композитів. Процес, по суті, не містить зв'язуючих, містить менше ніж 1 % органіки, а деталі можна виготовити, висушити та повністю спекти менш ніж за 24 години [6]. Загальна схема процесу екструзії наведена на рисунку 1.3.

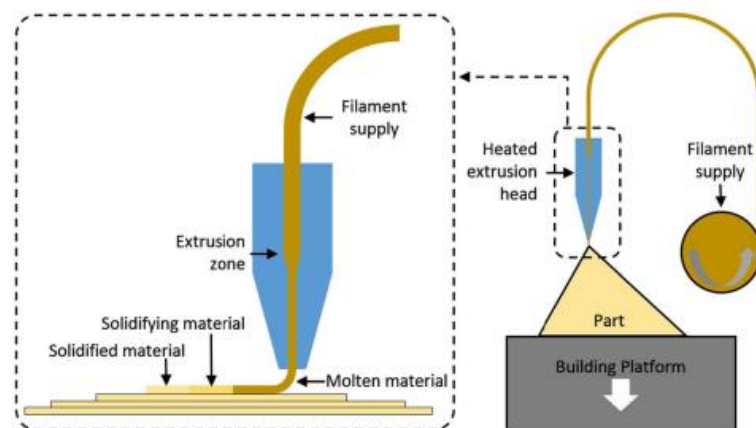


Рисунок 1.3 – Схема процесу екструзії

1.1.4 Струменеві методи

Багатоструменеве моделювання (МММ): принцип, що лежить в основі МММ, – це принцип шарування, який використовується в більшості інших систем швидкого прототипування. МММ будує моделі, використовуючи техніку, схожу на струменевий друк, що застосовується в трьох вимірах. Головка МММ рухається в ХУ-площині, наносить спеціальний полімерний матеріал лише там, де це необхідно, будуючи один шар моделі. УФ-лампа спалахує через кожен прохід, щоб полімеризувати нанесений полімер. Після завершення шару платформа опускається на товщину шару (Z-вісь) і головка починає будувати наступний шар [6].

Thermojet – це процес, схожий на багатоструменеве моделювання. Система створює пластикові моделі, схожі на віск, хоча й з меншою точністю, ніж SLA. Машина використовує головку з широкою площею з кількома розпилювачами. Ці струминні головки розпилюють крихітні краплі розплавленого рідкого матеріалу, який охолоджується та твердіє під час удару, утворюючи твердий матеріал. Цей процес зазвичай використовується для створення шаблонів лиття в ювелірній промисловості та інших сферах точного лиття. Схема струменевого методу наведена на рисунку 1.4 [6].

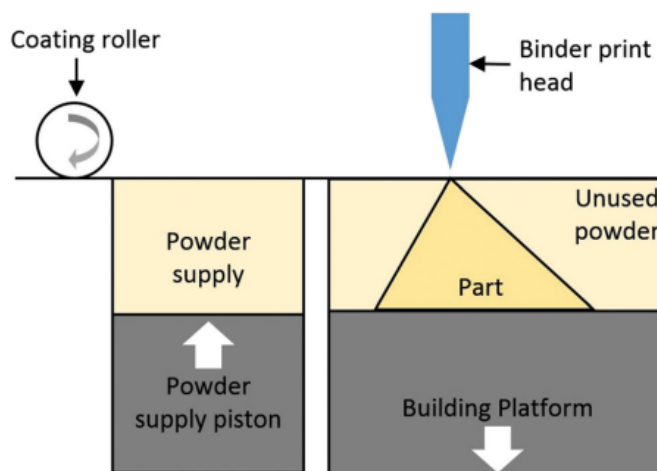


Рисунок 1.4 – Схема струменевого методу

1.1.5 Клейові методи

Ламінація (LOM): матеріал, який використовується – особливий вид паперу, на одну зі сторін якого нанесено термочутливий клей. Папір подається з рулону і скріплюється з попереднім шаром за допомогою нагрітого валика, який активує клей паперу. Контур шару вирізаний лазером, який ретельно модульований для проникнення на глибину товщиною рівно в один шар (паперу). Надлишки відходів обрізаються до прямокутників, щоб полегшити їх видалення, але залишаються на місці під час встановлення, щоб використовуватися як опора. Лист матеріалу, який використовується, є ширшим, ніж площа робочої зони, тому, коли шар розрізається, краї листа залишаються недоторканими, щоб їх можна було відтягнути приймальним роликком і, таким чином, постійно подавати матеріал до наступного шару (рис. 1.5) [6].

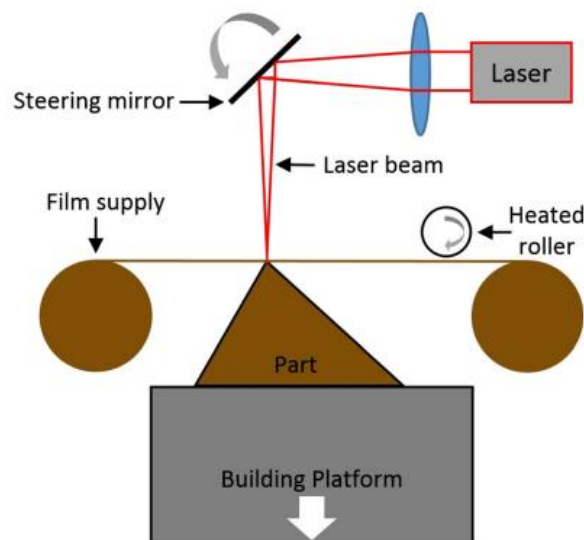


Рисунок 1.5 – Схема клейового методу

Полімеризація твердої плівки (SFP): процес заснований на повній полімеризації напівполімеризованої пластикової плівки під дією відповідного джерела світла. Напівполімеризована плівка спочатку укладається на попередньо затверділу частину, а потім освітлюється таким чином, щоб з'єднання досяглося після повної полімеризації. Надлишок плівки, який не

освітлюється, можна видалити шляхом розчинення у відповідному розчиннику, залишаючи бажану частину [6].

1.1.6 Електронно-променевий метод

Електронно-променевий метод (ЕВМ) ідентичний методу лазерного плавлення, але замість лазерного променя в якості джерела енергії використовується електронний промінь для плавлення або спікання матеріалу.

ЕВМ є відносно новим, але швидко зростаючим процесом, подібним до SLS, хоча він підходить лише для виготовлення металевих деталей. Порошок розплавляється за допомогою електронного променя, який живиться високою напругою. Процес відбувається в камері високого вакууму, щоб уникнути проблем з окисненням. ЕВМ також може обробляти широкий спектр попередньо легованих металів. У порівнянні з SLS, ЕВМ може запропонувати набагато вищу пропускну здатність і більш рівномірний розподіл теплового поля, однак точність і якість поверхні нижчі [6]. Схема електронно-променевого методу наведена на рисунку 1.6.

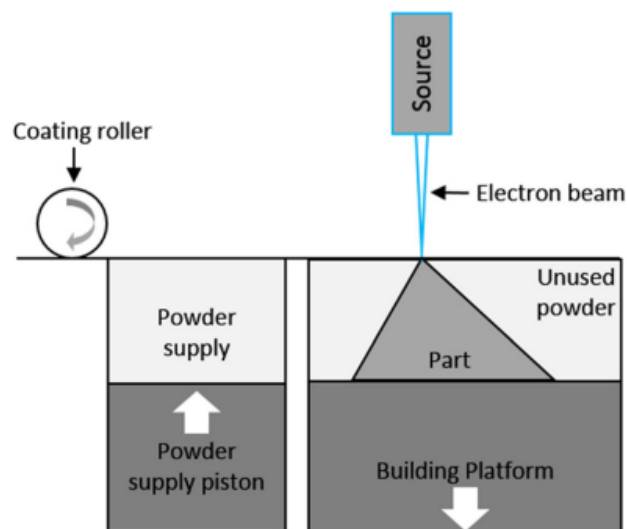


Рисунок 1.6 – Схема електронно-променевого методу

1.2 Загальні технологічні параметри FDM 3D-принтера

Серед різних методів 3D-друку найпоширенішим є моделювання пошаровим наплавленням (FDM), яке базується на процесі екструзії, при якій тверда нитка термопластичного полімеру плавиться та подається до сопла для виготовлення деталей над нагрітою або ненагрітою платформою. Простота і низька вартість процесу FDM є його основними перевагами, тоді як недоліки, такі як залежність механічних властивостей, точності розмірів і шорсткості поверхні від параметрів процесу, обмежують масове виробництво продукції [7].

Таким чином, важливо вибрати та оптимізувати параметри процесу для досягнення бажаних якісних характеристик друківаних деталей.

Основні параметри процесу, які впливають на якість і кінцеві властивості зразка, надрукованого методом FDM, можна розділити на три загальні категорії:

а) Параметри нарізки:

- товщина шару;
- швидкість друку;
- діаметр сопла;
- коефіцієнт екструзії;
- щільність заповнення;
- шаблон заповнення;
- кількість стінок;
- ширина стінки;
- ширина лінії заповнення;
- растрова орієнтація;
- зазор між лініями заповнення.

б) Орієнтація на платформі: зразки можна надрукувати та зробити горизонтально, вертикально або поперечно.

в) Температурні умови: включає температуру навколишнього середовища, температуру екструдера та температуру платформи.

На рисунку 1.7 показано схему FDM 3D-принтера, а саме: нитка термопластичного полімеру (Filament), екструдер, блок нагріву та підтримання температури плавлення полімеру (Temperature control unit), сопло (nozzle) та платформа (Platform). Також зазначені деякі з вищезгаданих параметрів процесу, такі як ширина стінки (Wall Thickness), ширина лінії заповнення (Width of each layer), зазор між стінками (Wall-to-wall gap), товщина шару (Layer Thickness), зазор між лініями заповнення (Air gap), кут друку (Printing angle), кількість стінок (Number of walls).

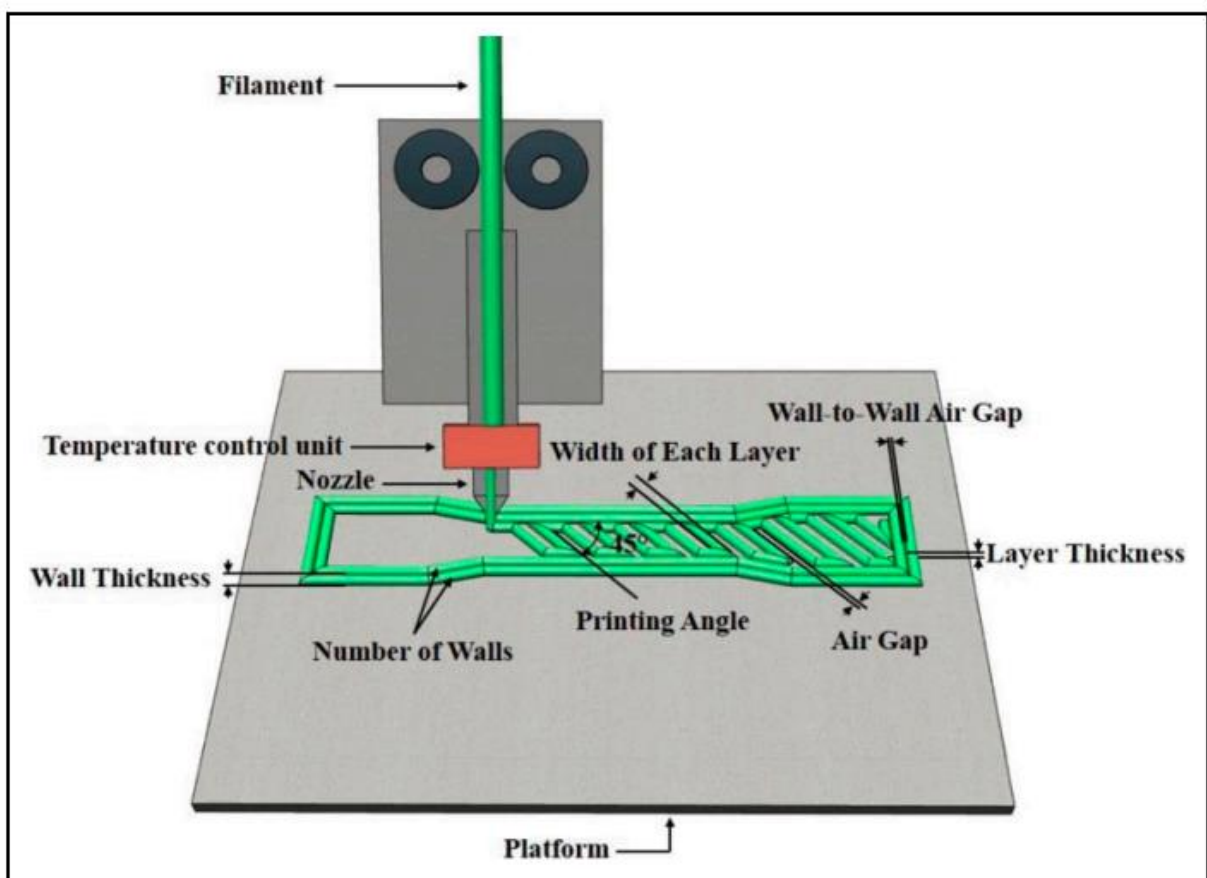


Рисунок 1.7 – Схема та технологічні параметри FDM 3D-принтера

Було проведено чимало досліджень, щоб проаналізувати вплив параметрів процесу на кінцеві властивості полімерних зразків, надрукованих FDM-3D та точність розмірів [8].

1.3 Аналіз параметрів процесу друку, які впливають на механічні властивості

Шорсткість поверхні та механічні властивості були найбільш вивченими. Оскільки механічні властивості визначають застосування та термін служби друківаних деталей, багато зусиль було зосереджено на впливі параметрів процесу на механічні властивості виготовлених деталей [9]. Міцність на розтяг, вигин і стиск є найбільш оцінюваними властивостями, тоді як деформація руйнування не оцінювалася для деталей, надруківаних на 3D. Yao T. та ін. вивчали вплив температури сопла, товщини шару та швидкості друку на механічні властивості надруківаних FDM-3D зразків [10].

Кілька дослідницьких груп вивчали вплив параметрів процесу друку, включаючи товщину шару, орієнтацію на платформі, кут друку, швидкість друку, щільність заповнення, малюнок заповнення та температуру екструзії на механічні властивості зразків, надруківаних за допомогою ниток PLA та ABS. Chac'on JM та ін. перевірили триточкове згинання зразка PLA, надруківаного горизонтально, і виявив, що найкращі механічні властивості отримано при зменшенні товщини шару та збільшенні швидкості подачі [11]. Wang S. та ін. досліджували вплив чотирьох параметрів процесу FDM (тобто кут друку, товщину шару, швидкість подачі та температуру сопла) на механічні властивості надруківаних FDM-3D зразків, виконуючи випробування на одноосьовий розтяг та динамічний механічний аналіз зразків PLA за різних температур [12].

Більшість досліджень зосереджено на впливі кута друку, товщини шару, температури сопла, малюнка заповнення та щільності заповнення на міцність зразків, надруківаних FDM-3D, і менше уваги приділяється іншим механічним властивостям, таким як модуль пружності та деформація руйнування як важливі властивості в інженерному проектуванні.

Для подальшого аналізу обрані такі змінні фактори, як щільність заповнення, товщина шару та швидкість друку. Інші параметри залишалися

незмінними. Діапазон деяких параметрів процесу може змінюватися в залежності від технічних особливостей принтера. Наприклад, більшість звичайних 3D-принтерів не здатні друкувати на дуже високій швидкості. За швидкості друку 60 мм/с або вище нитка не плавиться належним чином і, отже, шари друкуватимуться погано. З цієї причини було обрано дві швидкості, які часто використовуються в реальності, тобто 20 мм/с і 40 мм/с. Що стосується рівнів щільності заповнення, то вони можуть варіюватися від 0 до 100%. Надруковані зразки зазвичай дуже порожнисті та нестабільні при щільності заповнення менше 20%. Щільність заповнення 100% також збільшує час друку та вагу зразка. З цих причин було обрано чотири рівні 20%, 40%, 60% і 80%. Програмне забезпечення для нарізки, таке як Cura, зазвичай дозволяє варіювати товщину шару в діапазоні 0,1...0,3 мм. Товщина шару 0,1 мм і 0,2 мм є двома найбільш часто використовуваними значеннями в реальності, і їх вибір залежить від форми та кривизни моделі.

1.4 Визначення впливу товщини шару, швидкості друку та щільності заповнення на механічні властивості

Як показано в таблиці 1.2, розглядалися щільність заповнення з чотирма різними рівнями, товщина шару та швидкість друку з двома різними рівнями, інші параметри залишались незмінними.

У дослідженні був використаний матеріал – полімолочна кислота (PLA), яка є термопластичним полімером у формі нитки діаметром 1,75 мм.

Таблиця 1.2 – Параметри зразків

№ зразка	Товщина шару, мм	Швидкість друку, мм/с	Щільність заповнення, %
1	0,1	20	20
2	0,2	40	20
3	0,1	20	40
4	0,2	40	40
5	0,2	20	60
6	0,1	40	60
7	0,2	20	80
8	0,1	40	80

Для підготовки зразка на розтяг він був змодельований відповідно до типу I стандарту ASTM D638 [13] та експортований у формат STL. Потім файл було перетворено на G-код, щоб його можна було прочитати платою керування FDM 3D-принтеру. Усі інші параметри процесу, такі як товщина початкового шару, ширина кожного шару, товщина стінки, кут растру та кількість стінок, залишалися постійними для всіх зразків. Кут растру вибрано +45 оскільки іншими дослідниками було доведено, що цей кут дає кращі механічні властивості, ніж інші [14]. Візерунок заповнення обраний лінійним. Зразок для випробування наведений на рисунку 1.8.

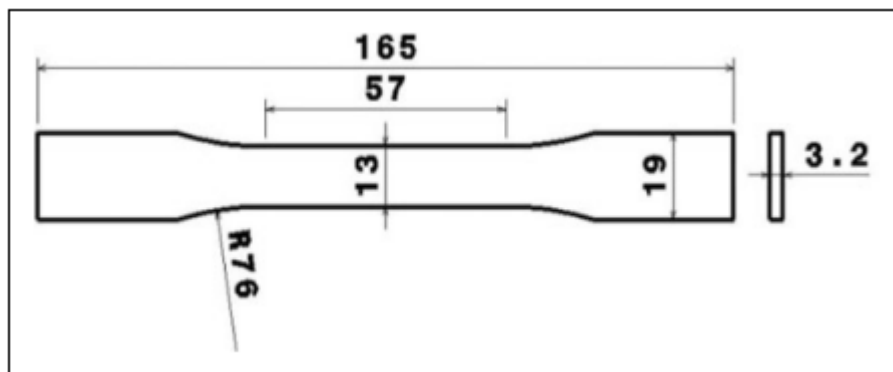


Рисунок 1.8 – Зразок для випробування

Щоб дослідити механічні властивості надрукованих FDM-3D зразків PLA, кожен зразок був випробуваний при кімнатній температурі за допомогою квазістатичного випробування на розтяг зі швидкістю навантаження 1 мм/хв. Для кожного експерименту було надруковано та протестовано три зразки.

На рисунку 1.9 показані криві напруга-деформація для восьми експериментів, перелічених у таблиці 1.2. Щоб усунути вплив варіацій у розмірах зразків на експериментальні результати, від п'яти до семи зразків було надруковано для кожного експерименту та три зразки з мінімальними варіаціями в довжині, ширині та товщині були обрані для аналізу на розтяг. Результати цих трьох зразків показали відносно добру повторюваність.

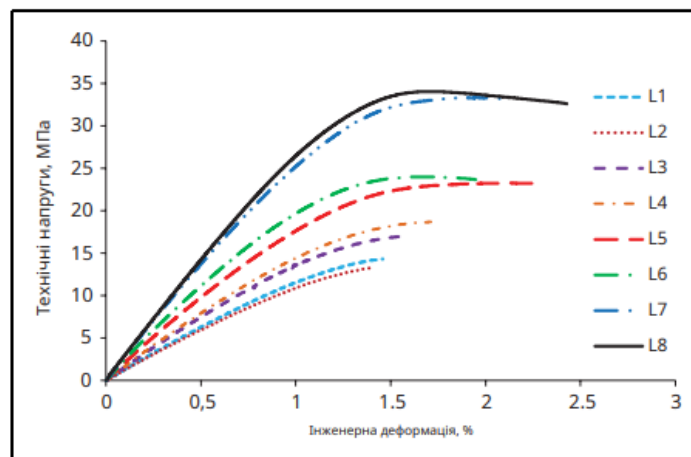


Рисунок 1.9 – Криві напруга-деформація

Зразки №1 та №3 з однаковою товщиною шару та швидкістю друку, але різною щільністю заповнення, показали, що завдяки збільшенню щільності заповнення як питома жорсткість, так і міцність зменшилися, а деформація руйнування зростає. Це підтверджує, що модуль пружності, межа міцності на розрив, деформація руйнування та вага зразка були збільшені за рахунок збільшення щільності заповнення. Але величина збільшення жорсткості та міцності (приблизно 18%) не така значна, як збільшення ваги (приблизно 29%).

На рисунку 1.10 показано поперечний переріз руйнування восьми випробуваних зразків. Поверхні руйнування всіх зразків були перпендикулярні до напрямку навантаження, що вказує на квазікрихку поведінку.

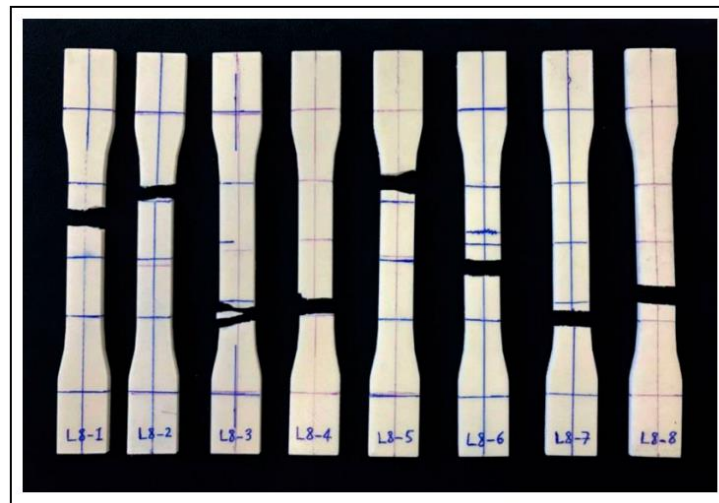


Рисунок 1.10 – Переріз руйнування зразків [7]

1.5 Визначення впливу орієнтації зразку в процесі друку на міцність

Протягом багатьох років проводилися дослідження, щоб маніпулювати факторами машинного процесу, щоб дослідити вплив на механічні властивості деталей, надрукованих FDM. Sood та ін. досліджували вплив п'яти факторів процесу (товщина шару, орієнтація конструкції, кут растру, ширина растру та повітряний зазор), з трьома рівнями, призначеними кожному фактору процесу, на властивості розтягування друкованих деталей відповідно до ISO 527:1966 стандартний зразок. Для кожного експерименту було надруковано три зразки. Результат автора для міцності на розрив друкованих деталей становив приблизно від 9 МПа до 18 МПа [15].

Подібним чином Alhubail провів випробування на розтяг FDM-друкованих деталей з використанням п'яти змінних факторів (товщина шару, ширина растру, ширина контуру, орієнтація растру та повітряний зазор) відповідно із двома рівнями, призначеними кожному фактору. Він дійшов висновку, що певні

комбінації параметрів процесу можуть покращити міцність на розрив друкованих деталей (від 19 МПа до 36 МПа) [16].

Ziemian та ін. (2012) досліджували вплив чотирьох різних кутів растрової орієнтації (поздовжньої, діагональної, поперечної та хрест-навхрест) на механічні властивості друкованої частини. Для кожного експерименту було надруковано від п'яти до десяти зразків. Автори прийшли до висновку, що друковані деталі з растром, вирівняним за довгим розміром (поздовжнім або 0°) зразка, мали найвищий межа міцності на розрив, близько 25 МПа, тоді як поперечна орієнтація растру, 90° або перпендикулярна довгому розміру, мала найнижчу межу міцності на розрив, близько 14 МПа [17].

Górski та ін. досліджували вплив орієнтації конструкції з п'ятьма різними наборами орієнтації X і Y відносно платформи на властивості матеріалу. Для кожного експерименту було надруковано три зразки. Міцність на розрив була найвищою в орієнтації $X=90^\circ$ і $Y=0^\circ$ (горизонтально), близько 22 МПа, і найменшою в орієнтації $Y=90^\circ$ (вертикальна), близько 11 МПа [18].

Tumrak та ін. досліджували вплив двох змінних факторів, орієнтації шару та орієнтації растру, з трьома та двома рівнями відповідно. Було надруковано та протестовано десять зразків. Його висновки полягали в тому, що середня міцність на розрив була вищою для меншої висоти шару, а деталі, надруковані з растровою орієнтацією $0^\circ/90^\circ$, дають вищу міцність порівняно з растровою орієнтацією $45^\circ/-45^\circ$ [19].

Ahn та ін. мали п'ять змінних факторів (повітряний зазор, ширина растру, температура екструдера, орієнтація растру та колір нитки) з двома рівнями для кожного фактору. Кожна експериментальна серія складається з 3-5 зразків, надрукованих відповідно до стандартів ASTM D3039. Автори дійшли висновку, що повітряний проміжок і фактори орієнтації растру значною мірою впливають на міцність на розрив друкованих деталей, тоді як інші три фактори (ширина растру, температура екструдера та колір нитки) мало впливають на властивості матеріалу [20].

Bertoldi та ін. дійшли висновку, що орієнтація конструкції (один із факторів) значною мірою впливає на міцність на розрив деталей, надрукованих FDM. Зразки, розроблені відповідно до стандарту ASTM D5937-96 для формованих пластикових деталей, були надруковані та протестовані. Межа міцності для зразків, надрукованих збоку дав найвищий результат для $X=90^\circ$ і $Y=0^\circ$ і найнижчий при друку у вертикальній орієнтації [21].

1.5.1 Вплив растрової орієнтації зразку на міцність

З огляду на те, що все ще існують певні неясності щодо впливу певних параметрів процесу, було оцінено вплив орієнтації (0° , 45° , 90°) та розмірного ефекту (різна товщина) на основні властивості розтягування.

В якості матеріалу для зразків була обрана полімолочна кислота (PLA) – це термопласт на біологічній основі, здатний до біокомпосту, який широко використовується в різних галузях промисловості завдяки своїй чудовій механічній міцності. Щоб забезпечити якість друкованої частини, температура сопла та вбудованої платформи контролювалася на рівні близько 60°C і 220°C відповідно. Була визначена щільність заповнення 100% у програмному забезпеченні для друку з растровими кутами ± 45 градусів для заповнення.

Після процесу 3D-друку були отримані зразки, геометричні параметри яких відповідали рекомендаціям стандарту ISO 527-1 (2012).

Для отримання основних геометричних властивостей і властивостей при розтягуванні друкованих зразків FDM використовувалися різні орієнтації друку. На рисунку 1.11 показано схематичний вигляд орієнтації друку (0 , 45 і 90°). На цьому ж рисунку представлено напрямок вирощування (Growing direction). Всі зразки виготовлені в горизонтальній площині.

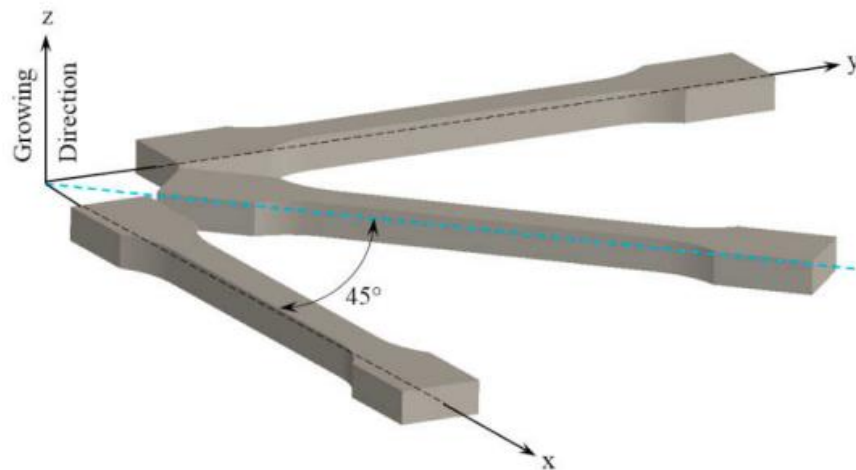


Рисунок 1.11 – Орієнтація друку зразків

Випробування на розтяг проводилися на електромеханічній випробувальній машині відповідно до ISO 527-1 (2012) стандарт. Всі випробування проводились до точки руйнування зі швидкістю завантаження 2 мм/хв, за кімнатної температури. Для вимірювання деформацій використовувався кліпонний екстензометр. Для кожного виду зразків було випробувано серія з п'яти екземплярів.

Зразок на розтяг до та після випробування наведено на рисунку 1.12.

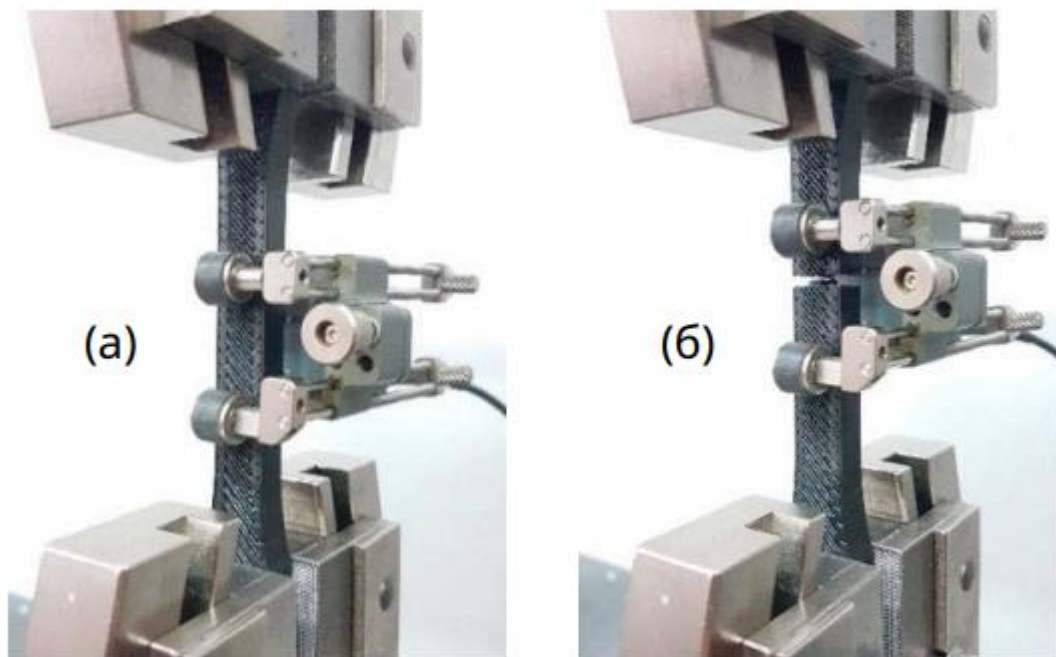


Рисунок 1.12 – Зразок на розтяг до (а) та після (б) випробування

Відносна товщина та ширина зразків були досліджені з точки зору розмірів. Геометричні похибки розраховували як відношення реального (виміряного) до номінального (проектного) розміру. Теоретичні розміри та реальні вимірювання розміру зразка були використані для обчислення геометричних похибок ширини та товщини по осі Z. Кожне вимірювання проводили 3 рази, і для побудови використовували середнє значення розмірів у кожній орієнтації друку. На рисунку 1.13 показано зміну відносних похибок відповідно до орієнтації друку.

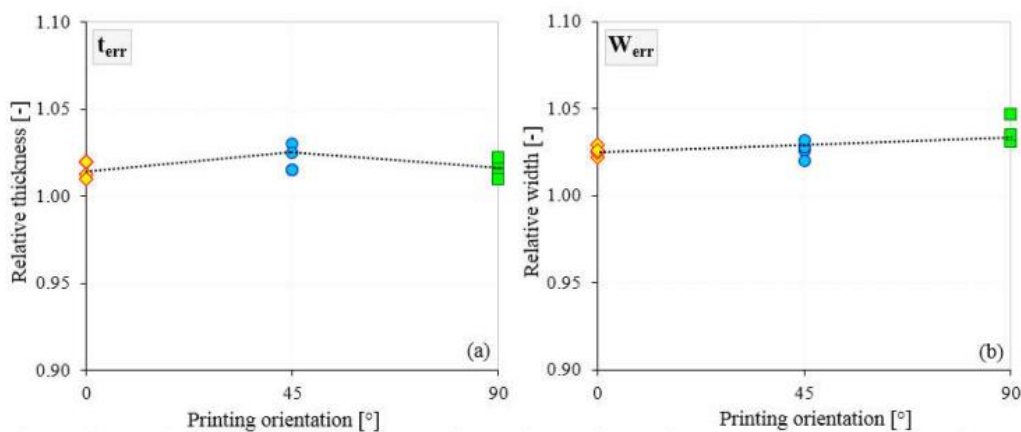


Рисунок 1.13 – Геометричні похибки товщини (a) та ширини (b)

Незалежно від орієнтації друку, обидва геометричні параметри (товщина і ширина) мають відносну похибку нижче 4%, що означає достатню точність розмірів. Однак похибки ширини приблизно вдвічі перевищують похибки товщини. Цей аспект може бути пов'язаний з різним розміром зразків у двох напрямках, так як ширина в 3 рази більша за товщину. Що стосується ефекту орієнтації, обидва виміри демонструють майже однакову тенденцію зі збільшенням кута орієнтації. Похибки товщини мають максимум, що легко виявляється, при 45°, а похибки ширини змінюються лінійно при орієнтації в діапазоні 0-90°. З іншого боку, найменша похибка товщини отримана при орієнтації 90° (1,52%), тоді як ширина зазнає найменшої похибки при орієнтації 0° (2,5%).

Після випробувань на розтяг були оброблені дані про навантаження та переміщення для кожної групи зразків. На рисунку 1.14 наведено криві навантаження-переміщення зразків в залежності від орієнтації друку.

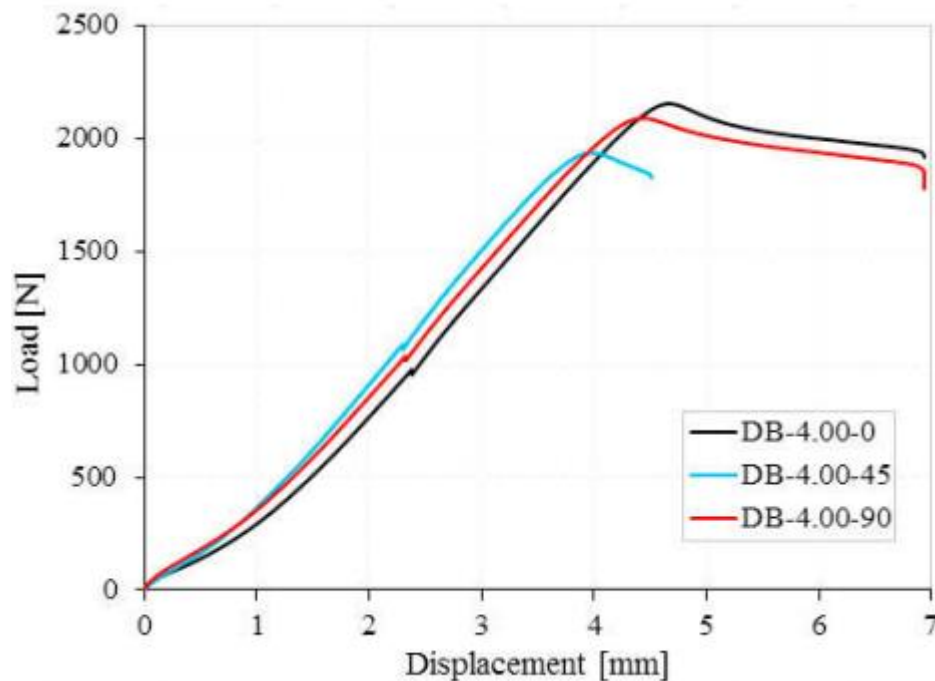


Рисунок 1.14 – Криві навантаження-переміщення

Усі криві показують лінійну пружну зону, з якої визначається модуль Юнга відповідно до стандарту ISO 527-1 (2012). За межами цієї зони криві мають точку максимуму, яку легко визначити. Це максимальне навантаження використовується для визначення міцності на розрив зразків. Легко помітити, що зразки з орієнтацією 0° та 90° мають приблизно однакове навантаження при руйнуванні. Причому як навантаження на руйнування, так і відповідні їм переміщення для двох зразків майже збігаються. З іншого боку, порівняно з орієнтацією 0° та 90° , 45° дає нижчі значення для всіх максимальних навантажень, навантаження на руйнування і переміщення при навантаженні на руйнування.

На рисунку 1.15 показано зміну модуля Юнга та межі міцності на розрив зі зміною орієнтації.

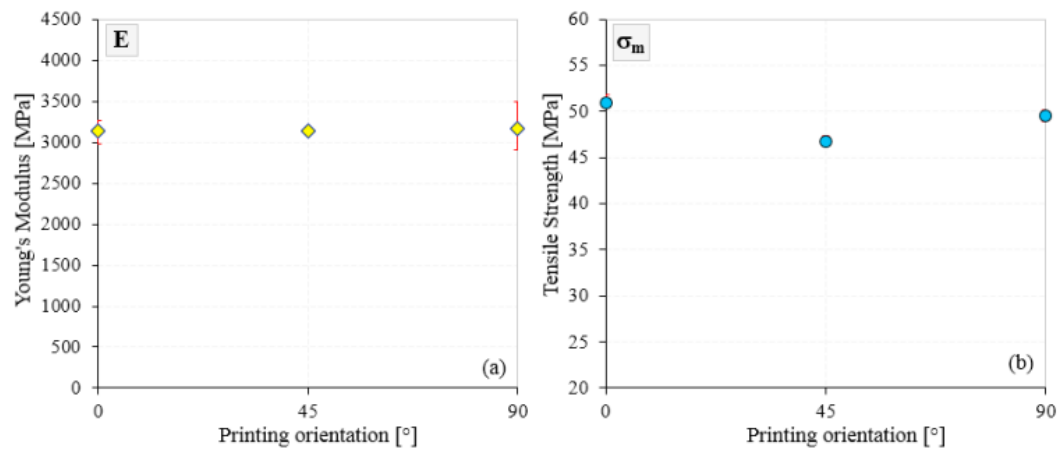


Рисунок 1.15 – Вплив орієнтації друку на модуль Юнга (a) та межу міцності (b)

Як зазначалося вище, завдяки практичному перекриттю лінійно-пружних зон зразки мають майже однакове значення модуля Юнга. У зразків з орієнтацією 90° спостерігаються незначно вищі значення, лише 1,18 %, порівняно зі зразками з орієнтацією 45°. З іншого боку, міцність на розрив демонструє значні відмінності зі зміною орієнтації друку. При цьому видно, що найвищі значення мають зразки з орієнтацією 0° (50,88 МПа), а найнижчі (46,77 МПа) – зразки з орієнтацією 45° [22].

1.6 Визначення мети та задач дослідження

Головною метою дипломної роботи є дослідження механічних властивостей конструкцій, виготовлених за допомогою FDM 3D-друку, аналіз залежності механічних характеристик від орієнтування шарів відносно діючого навантаження при двох різних товщинах шару та впливу кута нахилу шару на тип руйнування. Задачею роботи є випробування отриманих за технологією FDM зразків на розтяг, аналіз отриманих результатів та оцінка доцільності зменшення товщини шару з метою підвищення міцності конструкції при несприятливих кутах нахилу шару відносно напрямку навантаження.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Загальні вказівки

Механічні властивості матеріалів надзвичайно важливі при конструюванні деталей, оскільки вони використовуються для визначення розмірів елементів конструкцій. Одна з найважливіших властивостей матеріалу – міцність, визначається випробуванням на розтяг. Результати випробувань використовуються для вибору матеріалу, який відповідає заданим умовам, і прогнозування поведінки деталі під дією навантаження. Зокрема до властивостей, які безпосередньо вимірюються під час випробування на розтягування, відноситься межа міцності на розтяг та відносне подовження. Для отримання механічних характеристик матеріалів найчастіше використовують випробування на одноосьовий розтяг.

Наразі немає загальновизнаних нормативних документів, які б встановлювали норми проведення випробувань на розтяг зразків, що виготовлені адитивним методом. В зв'язку з чим доводиться використовувати загальні стандарти, що регламентують вимоги щодо проведення випробувань для полімерних матеріалів. До таких стандартів відносяться ISO 527-2:2012 та ASTM D638-1:2014.

2.2 Методика проведення випробування на одноосьовий розтяг

Сутність методу полягає у тому, що зразок розтягують вздовж його головної осі з постійною швидкістю, у процесі розтягу вимірюють навантаження, яке витримує зразок та видовження зразку.

Затискачі обладнання для проведення випробування повинні бути розташовані так, щоб повздовжня вісь зразку співпадала з напрямком навантаження. При цьому затискачі не повинні викликати передчасне руйнування зразку у місцях затиску та прослизання зразку відносно губок затискачів.

Перед проведенням випробувань обидва кінці кожного зразку маркуються індивідуальним номером, при цьому спосіб маркування не повинен викликати руйнування зразку у місці маркування, та проводяться виміри ширини та товщини робочої зони зразку для подальшого обчислення його поперечного перерізу.

За отриманими результатами навантаження визначають міцність при розтязі та руйнуванні за формулою:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

де: F – діюче навантаження, Н;

A_0 – початкова площа поперечного перерізу, мм².

За результатами обчислень складається діаграма навантаження-подовження (діаграма Гука).

2.3 Підготовка та виготовлення зразків

Для проведення випробувань була розроблена комп'ютерна модель зразку, після чого файл конвертовано у відповідний формат для 3D-друку.

Зразки, на яких проводились випробування, були виготовлені відповідно до геометрії та розмірів, що відповідають зразку типу 1BA за стандартом ISO 527-2.

Форма та геометричні розміри зразків наведені на рисунку 2.1 та у таблиці 2.1 відповідно.

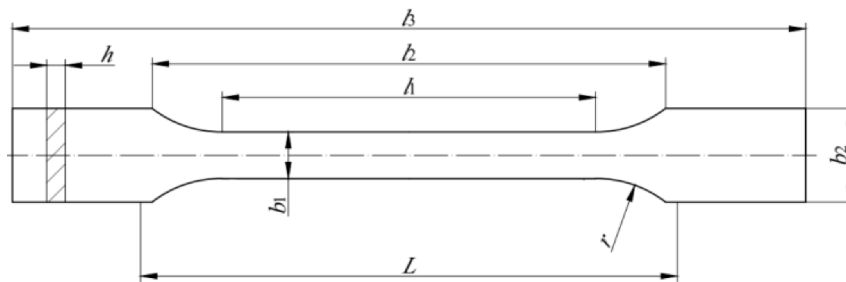


Рисунок 2.1 – Випробувальний зразок типу 1BA за стандартом ISO 527-2

Таблиця 2.1 – Розміри зразку типу 1BA за стандартом ISO 527-2

Параметр	Позначення	Розмір, мм
Загальна довжина	l_3	75
Робоча частина	l_1	$30 \pm 0,5$
Радіус	r	30
Відстань між широкими частинами з паралельними сторонами	l_2	58 ± 2
Ширина голівки	b_2	$10 \pm 0,5$
Ширина робочої частини	b_1	$5 \pm 0,5$
Товщина	h	2
Відстань між затискачами	L	58 ± 2

Змінними величинами при виготовленні зразків були кут нахилу шару відносно головної осі зразка та товщина шару. Величина заповнення для всіх зразків становить 100%, тобто у зразках відсутні повітряні проміжки. Всі інші технологічні параметри друку для всіх зразків були незмінними. Для кожного досліджуваного випадку виготовлено по 2 зразки.

Зміна кута нахилу шарів відносно головної осі зразків при виготовленні виконувалась завдяки зміні орієнтування зразків на платформі 3D-принтеру. Крок зміни кута обраний у 10° . Схема розташування зразків при виготовленні на

платформі показана на рисунку 2.2. Зміна товщини шару виконувалась відповідними налаштуваннями 3D-принтеру. Конструкція 3D-принтеру, на якому виконувалось виготовлення зразків передбачає накладання шарів паралельно платформі.

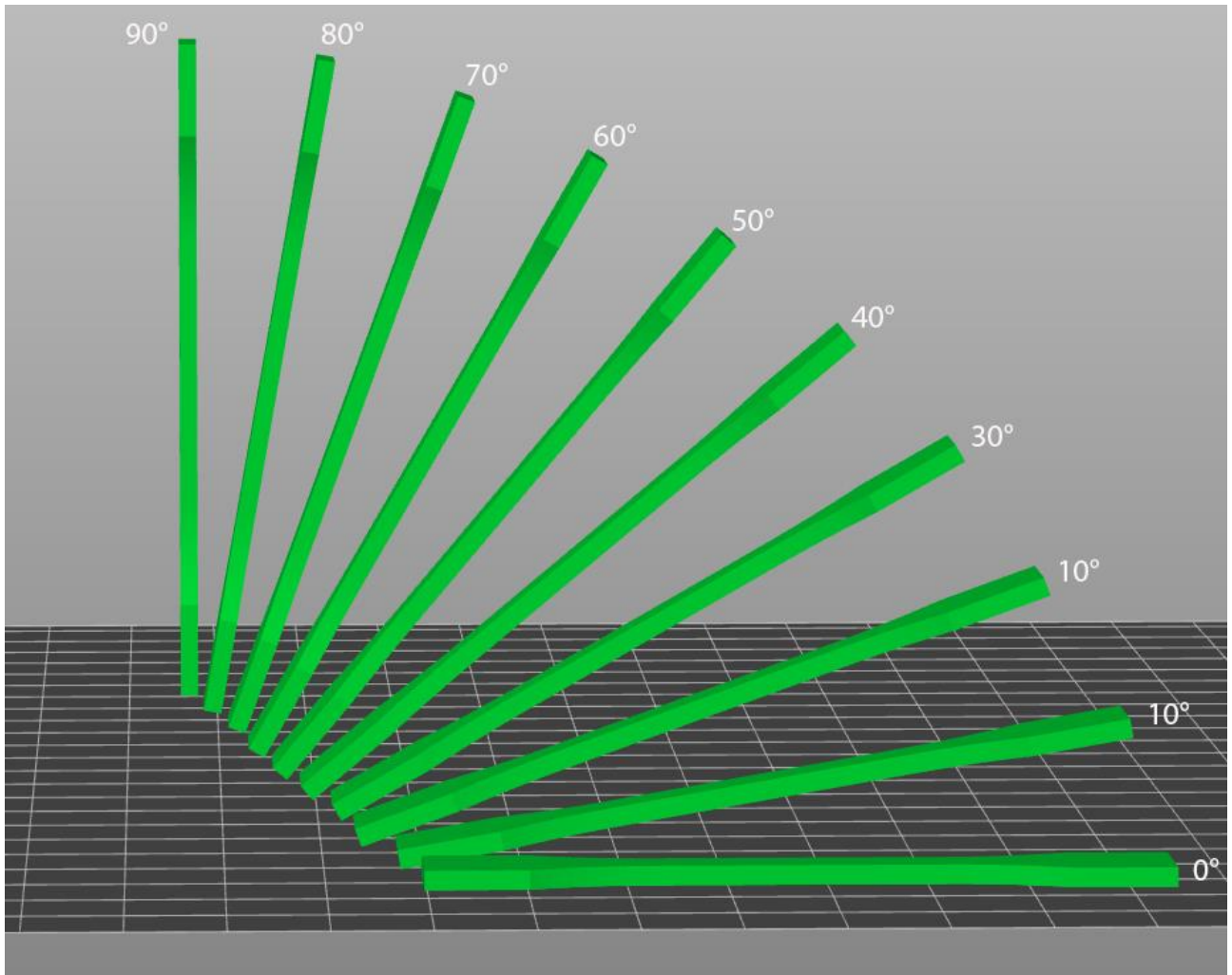


Рисунок 2.2 – Схема розташування зразків на платформі при зміні кута нахилу

Відповідно загалом виготовлено 20 зразків з товщиною шару $S=0,2\text{мм}$ та 20 зразків з товщиною шару $S=0,1\text{мм}$ при десятих різних кутах нахилу шару для кожної товщини шару.

2.4 Матеріал зразків

Для виготовлення зразків для випробувань був обраний матеріал соPET торгової марки Monofilament виробництва України, як один з найрозповсюджених матеріалів для FDM 3D-друку. Діаметр нитки, яка використовувалась становить 1,75мм. Зразки були виготовлені на 3D-принтері Creality Ender 3.

Матеріал соPET відрізняється достатньо високою міцністю, хімічною стійкістю та відноситься до інженерних пластиків. Вироби з цього матеріалу мають достатньо широкий експлуатаційний діапазон. Жорсткість соPET близька до показників ABS пластику, який широко використовується у промисловості, але при цьому він практично не має усадки та є більш безпечним у використанні так як не виділяє шкідливих речовин при плавленні в процесі 3D-друку.

Загальні механічні характеристики матеріалу соPET наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Характеристики матеріалу соPET

Характеристика	Показник
Щільність	1,27 г/см ³
Міцність на розтяг	52 МПа
Міцність на згин	70 МПа
Стійкість до згину	10 разів
Модуль пружності при розтязі	2100 МПа
Температура плавлення	200°C
Рекомендована температура друку	220-240°C
Рекомендована температура платформи	40-70°C
Температурний діапазон експлуатації	від -40 до +70°C
Лінійна маса при діаметрі 1,75мм	330 м/кг

2.5 Обладнання для випробування на розтяг

Випробування на розтяг проводилось на власному стенді для випробувань, виготовленому для виконання дипломної роботи. Зовнішній вигляд стенду зображений на рисунку 2.3.

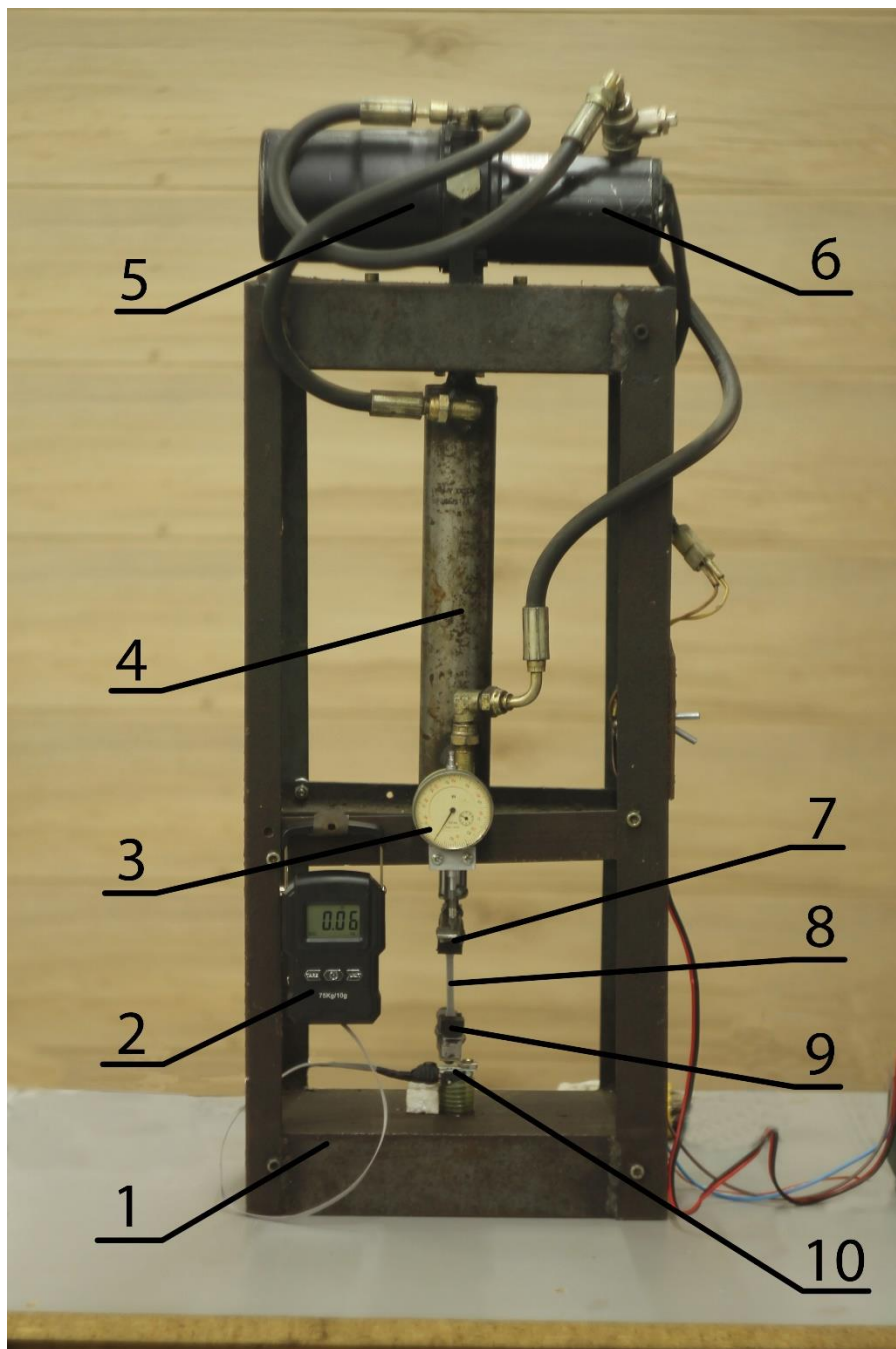


Рисунок 2.3 – Стенд для випробування зразків на розтяг

Зазначений стенд являє собою жорстку раму 1, у верхній частині якої закріплений гідравлічний циліндр 4. Гідроциліндр приводиться у дію за рахунок тиску мастила, який розвивається гідравлічним насосом 5. Гідронасос приводиться у дію електродвигуном 6, керування обертами якого виконується шляхом широтно-імпульсної модуляції його напруги живлення. За рахунок зміни обертів електродвигуна відбувається відповідна зміна продуктивності гідронасосу, що в свою чергу дозволяє керувати швидкістю переміщення штоку гідроциліндру, на якому закріплений рухомий затискач 7, без зменшення зусилля, яке він розвиває.

У нижній частині стенду розташований тензометричний чутливий елемент 10, закріплений до нижньої частини рами та жорстко зв'язаний з нерухомим затискачем 9.

Досліджуваний зразок 8 закріплюється відповідно між рухомим затискачем 7 та нерухомим затискачем 9. Зусилля, яке прикладається до зразка сприймається тензометричним чутливим елементом, після чого інтерпретується показчиком зусилля 2. Діапазон вимірювання комплекту показчика з тензометричним чутливим елементом складає 75кгс при заявленій точності 0,01кгс.

Для подальшого обчислення відносного видовження, у зв'язку з неможливістю використання екстензометру, використовується індикатор часового типу ИЧ-10 з точністю вимірювання 0,01мм, за допомогою якого виконується замір поточного переміщення штоку гідроциліндру та відповідно – збільшення довжини зразку.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОРІЄНТУВАННЯ ШАРІВ НА МІЦНІСТЬ ЗРАЗКІВ, ВИГОТОВЛЕНИМ FDM МЕТОДОМ

Для оцінки впливу орієнтування шарів на міцність були виготовлені зразки з кутом нахилу шарів відносно діючого навантаження від 0° до 90° з кроком у 10° . Дослідження виконувалось для двох товщин шару, які найчастіше використовуються на практиці:

- $S=0,2$ мм – для більшості деталей;
- $S=0,1$ мм – для деталей, до яких висуваються підвищені вимоги з точності.

Температури екструдера та платформи обрані у відповідності до рекомендованих виробником матеріалу та становили:

- 220°C – для екструдера;
- 70°C – для платформи.

Ширина стінок периметрів для всіх зразків була обрана у 0,4 мм, компенсація тонких ліній за рахунок зміни ширини стінки була вимкнена. Кількість стінок периметрів для всіх зразків обрані таким чином, щоб друк в робочій зоні виконувався без заповнення та складався тільки зі стінок периметрів.

Всі інші технологічні параметри друку, такі як коефіцієнт екструзії, компенсація вздовж вертикальної осі, відсоток перекриття стінок та інші, були налаштовані оптимальним чином для конкретного 3D-принтеру, на якому виконувалось виготовлення зразків та залишались незмінними.


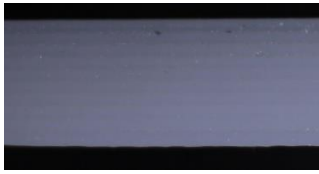

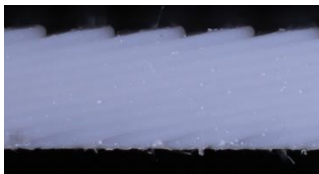

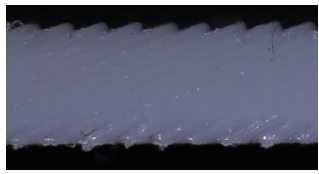


Для компенсування можливої зміни геометрії зразків під дією температурних викривлень платформи – всі зразки друкувались на підкладці товщиною 1 мм.

3.1 Аналіз впливу орієнтування шарів на міцність при товщині шару 0,2 мм


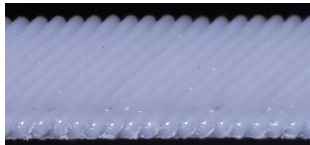



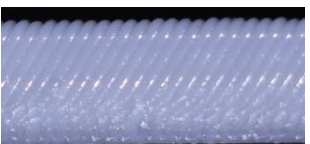



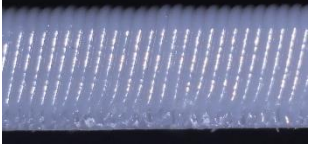


Для проведення дослідження були виготовлені 20 зразків з товщиною кожного шару 0,2 мм та кутом нахилу шару від 0° до 90° з кроком у 10° по 2 зразка для кожного кута відповідно.

Зміна кута нахилу шару виконувалась за допомогою зміни орієнтування зразка на платформі при виготовленні у відповідності до рисунку 2.2. Загальний зовнішній вигляд зразків та макрофотографії розташування шарів для кожного кута нахилу наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Загальний зовнішній вигляд зразків та розташування шарів при товщині шару 0,2 мм

Кут	Загальний вигляд	Вигляд шарів
1	2	3
0°		
10°		
20°		
30°		

Кінець таблиці 3.1

1	2	3
40°		
50°		
60°		
70°		
80°		
90°		

Після виготовлення зразків, на кожному з них з двох боків було нанесене маркування індивідуального номеру методом, який не призводить до руйнування зразка у місцях нанесення маркування – за допомогою перманентного маркера.

Після підготовки зразків були виконані випробування зразків на міцність при одноосьовому розтязі у відповідності до методики. Для подальшого обчислення напружень та відносного видовження проводилась відео-реєстрація показань діючого навантаження та переміщення для кожного експерименту.

Макрофотографії зовнішнього вигляду місць руйнування зразків наведені на рисунку 3.1.

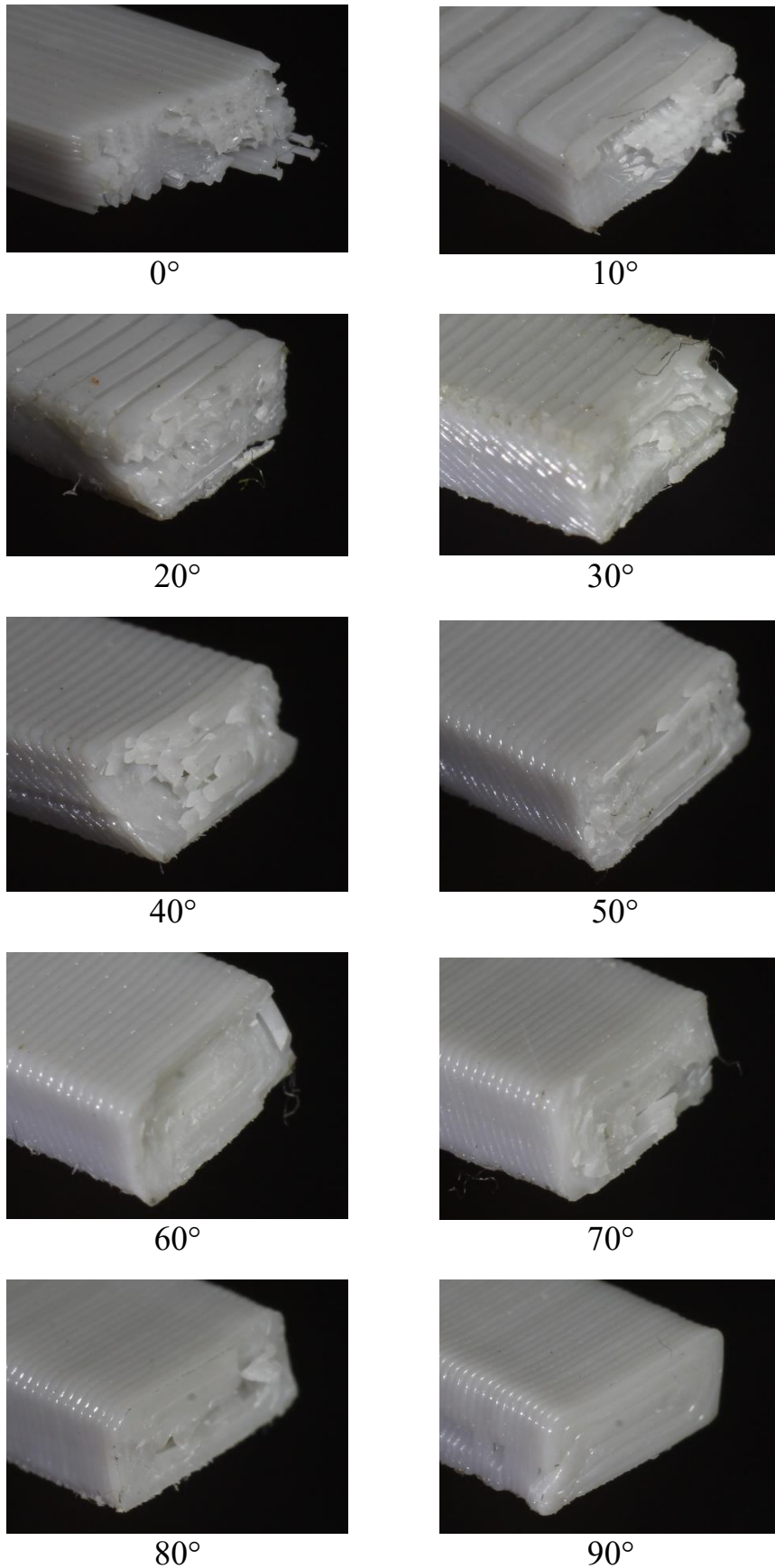


Рисунок 3.1 – Макрофотографії місць руйнування зразків при $S=0,2$ мм

За результатами обробки отриманої в ході проведення експериментів інформації у відповідності до методики були обчислені:

- σ_p – максимальне напруження руйнування, обчислене за формулою (2.1), де для зменшення впливу можливих погрішностей геометрії зразків, в якості A_0 була використана площа поперечного перерізу, обчислена за фактично вимірними розмірами робочої зони для кожного зразку;

- ε_p – відносне видовження при руйнуванні, обчислене виходячи з початкової відстані між затискачами $L=58$ мм та фактичного збільшення цієї відстані в момент руйнування за показаннями індикатора ИЧ-10 [13].

Отримані значення напруження та відносного видовження при руйнуванні для кожного кута нахилу шару наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення напружень руйнування та відносного видовження

	Кут нахилу шару відносно діючого навантаження									
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
σ_p , МПа	51,45	39,34	39,24	39,80	12,46	13,68	12,51	12,60	11,67	10,40
ε_p , %	5,59	4,27	3,91	4,55	1,91	1,77	1,82	1,73	1,59	1,73

Для подальшої побудови діаграми залежності «напруження-деформація» (діаграма Гука) для кожного кута нахилу, за допомогою покадрового перегляду отриманих в процесі проведення експериментів відеозаписів, були обрані 10 точок для кожного зразку з відповідними для них показаннями діючого навантаження та переміщення.

Після обробки обраних значень за допомогою програмного забезпечення MS Excel, були отримані відповідні діаграми, які наведені на рисунках 3.2 та 3.3 для кутів нахилу від 0° до 40° та від 50° до 90° відповідно.

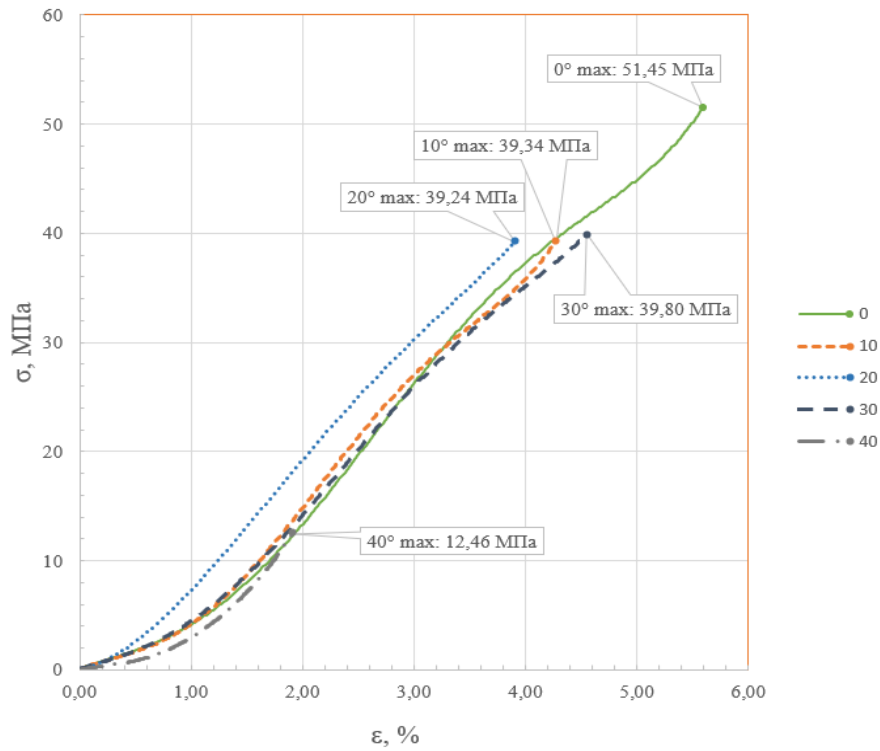


Рисунок 3.2 – Діаграма залежності «напруження-деформація» для кутів від 0° до 40° та товщині шару $S=0,2$ мм

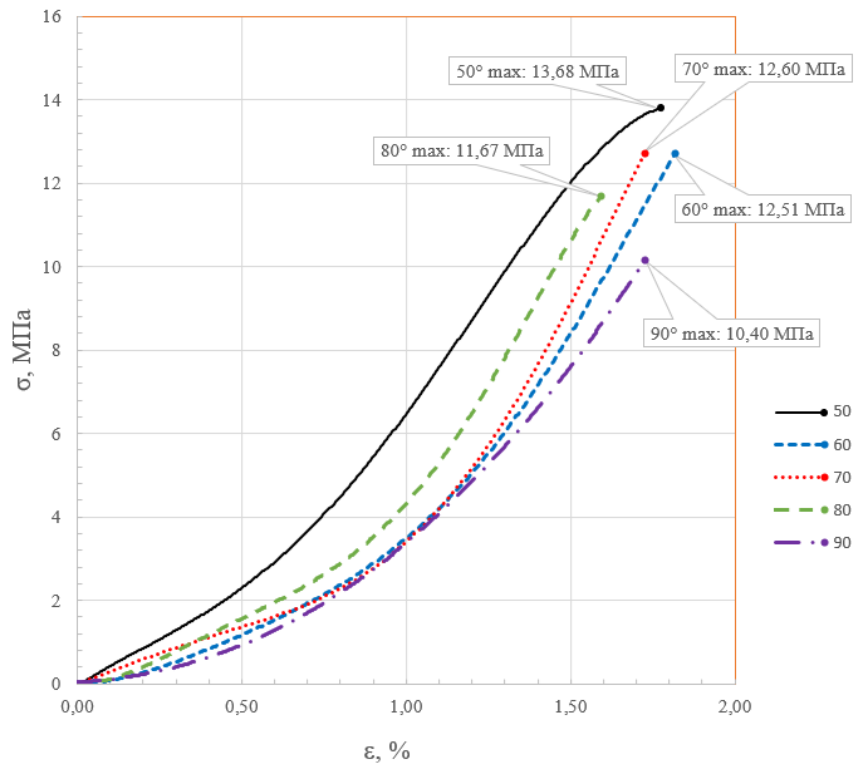


Рисунок 3.3 – Діаграма залежності «напруження-деформація» для кутів від 50° до 90° та товщині шару $S=0,2$ мм








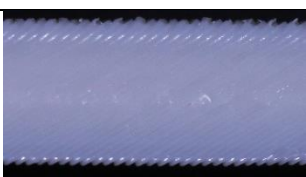



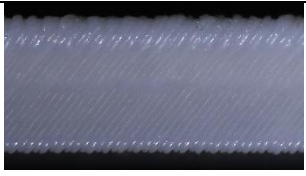

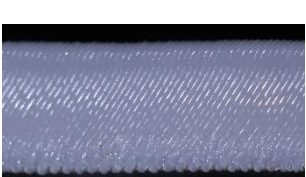

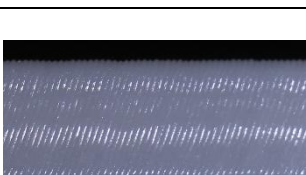
Проаналізувавши отримані діаграми можна побачити, що починаючи з кута нахилу шару, який дорівнює 40° , відбувається значне зниження міцності зразка. Виходячи з того, що надалі майже не відбуваються зміни у напруженнях руйнування зразків можна зробити висновок, що показники міцності для кутів від 40° та більше є фактично – міжшаровою міцністю для даних параметрів друку. Також це припущення підтверджують макрофотографії місць руйнування, на яких можна побачити, що для вказаних кутів руйнування відбувається частково (для кута 40°) або повністю (для кутів від 50° до 90°) по межі розташування шарів.

3.2 Аналіз впливу орієнтування шарів на міцність при товщині шару 0,1 мм


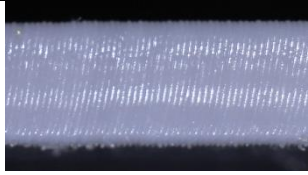

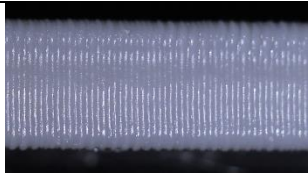
Для проведення дослідження були виготовлені 20 зразків з товщиною кожного шару 0,1 мм та кутом нахилу шару від 0° до 90° з кроком у 10° по 2 зразка для кожного кута відповідно. Загальний зовнішній вигляд зразків та макрофотографії розташування шарів для кожного кута нахилу наведені у таблиці 3.3.

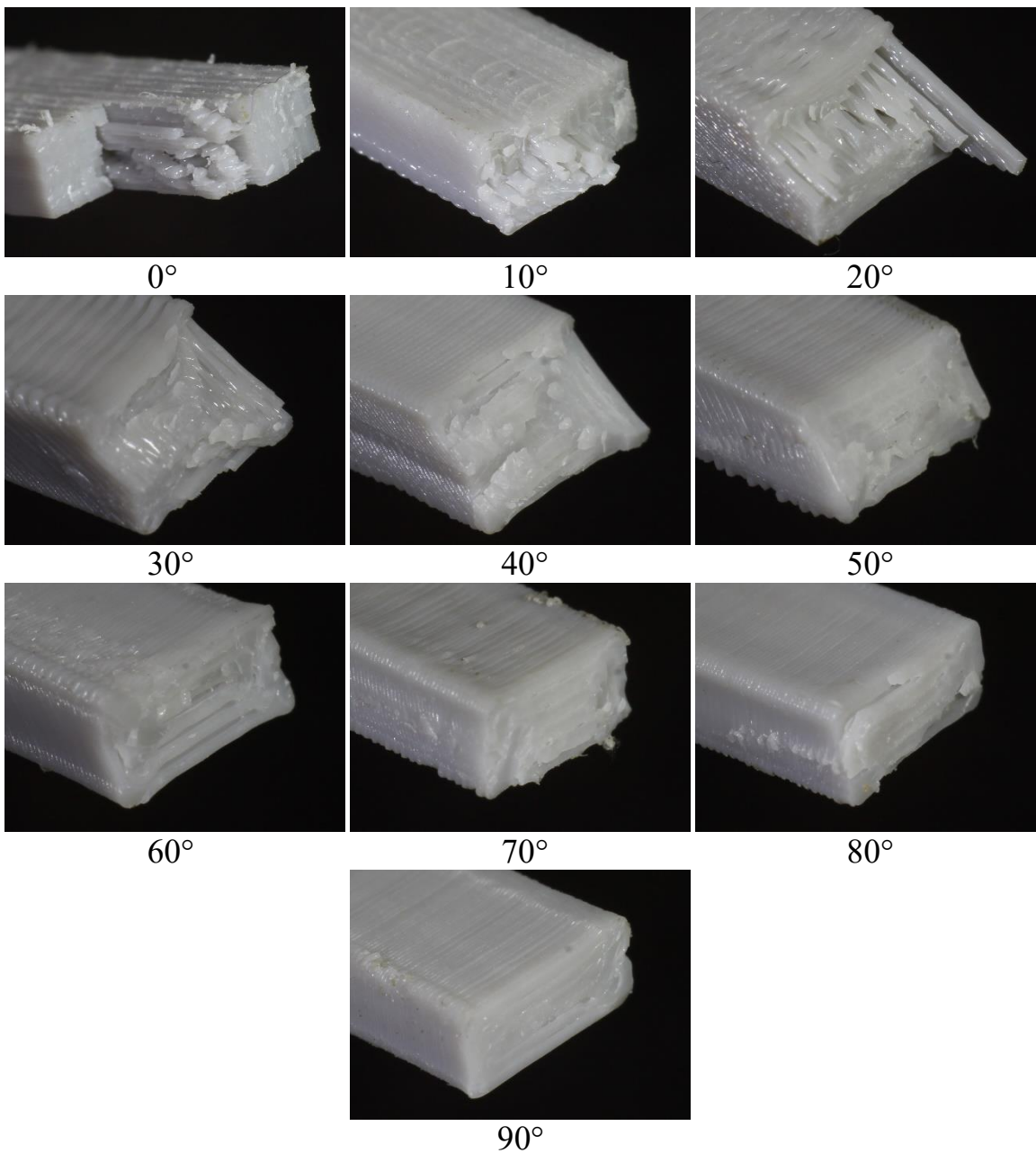
Після виготовлення зразків було виконане випробування зразків на міцність при одноосьовому розтязі аналогічно описаному в розділі 3.1. Макрофотографії зовнішнього вигляду місць руйнування зразків наведені на рисунку 3.4.

Таблиця 3.3 – Загальний зовнішній вигляд зразків та розташування шарів при товщині шару 0,1 мм

Кут	Загальний вигляд	Вигляд шарів
1	2	3
0°		
10°		
20°		
30°		
40°		
50°		
60°		
70°		

Кінець таблиці 3.3

1	2	3
80°		
90°		

Рисунок 3.4 – Макрофотографії місць руйнування зразків при $S=0,1$ мм

Обчислені значення напруження та відносного видовження при руйнуванні для кожного кута нахилу шару наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення напружень руйнування та відносного видовження

	Кут нахилу шару відносно діючого навантаження									
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
σ_p , МПа	44,54	42,41	12,48	14,7	5,93	3,17	3,49	2,10	2,69	3,97
ε_p , %	5,18	5,00	2,38	2,50	1,75	1,18	1,45	1,18	1,18	1,23

Для подальшої побудови діаграми залежності «напруження-деформація» для кожного кута нахилу були обрані 10 точок для кожного зразку з відповідними для них показаннями діючого навантаження та переміщення. Після обробки обраних значень були отримані відповідні діаграми, які наведені на рисунках 3.5 та 3.6 для кутів нахилу від 0° до 40° та від 50° до 90° відповідно.

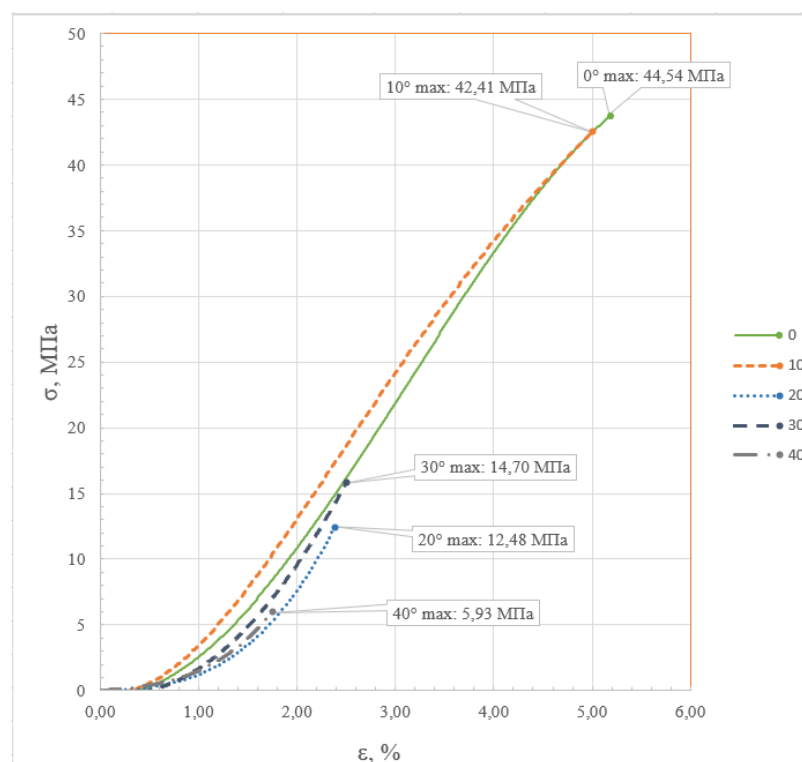


Рисунок 3.5 – Діаграма залежності «напруження-деформація» для кутів від 0° до 40° та товщині шару $S=0,1$ мм

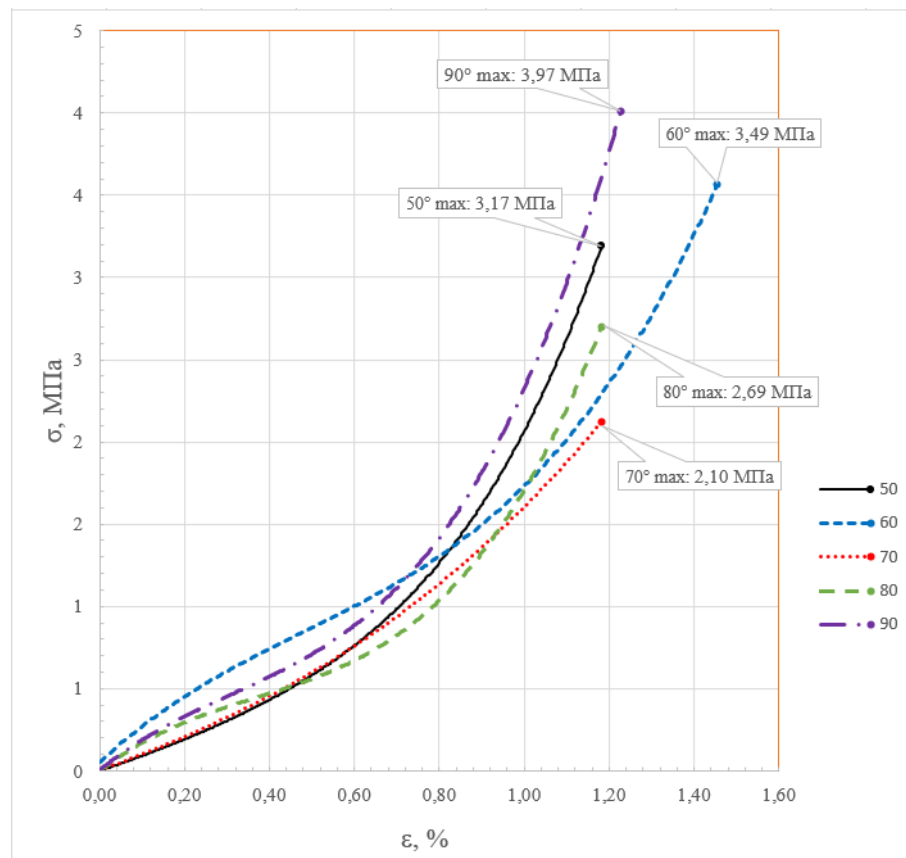


Рисунок 3.6 – Діаграма залежності «напруження-деформація» для кутів від 50° до 90° та товщині шару $S=0,1$ мм

Проаналізувавши отримані діаграми можна побачити, що значне зниження міцності зразка при товщині шару 0,1 мм починається раніше ніж при товщині шару у 0,2 мм, а саме – з кута нахилу шару, який дорівнює 20°. Враховуючи те, що ширина лінії при виготовленні зразків залишалась незмінною (0,4 мм для обох товщин шарів), можна припустити що зниження міцності зразків при $S=0,1$ мм може бути викликане нестабільним розподілом матеріалу при відношенні товщини шару до ширини лінії менше ніж 50%, що в свою чергу призвело до зменшення міжшарової міцності. Виходячи з того, що надалі майже не відбуваються зміни у напруженнях руйнування зразків можна зробити висновок, що показники міцності для кутів від 20° та більше є фактично – міжшаровою міцністю для даних параметрів друку. Також на макрофотографіях місць руйнування видно, що починаючи з кута 20° руйнування відбувається частково або повністю по межі розташування шарів.

ВИСНОВКИ

Об'єктом досліджень були механічні властивості конструкцій, виготовлених методом FDM 3D-друку. Метою роботи був аналіз впливу орієнтування шарів на їх міцність та оцінка доцільності зменшення товщини шару для підвищення міцності конструкції при однакових інших параметрах друку. За результатами проведеної роботи можна зробити наступні висновки:

1. Для навантажених деталей кут нахилу шарів при їх виготовленні методом FDM 3D-друку, є критичним параметром, що значно може впливати на їх міцність та, відповідно, експлуатаційні властивості.

2. При кутах нахилу шару відносно діючого навантаження до 10° міцність зразка близька до заявленої виробником міцності самого матеріалу. Виходячи з цього, навантажені деталі при виготовленні методом FDM 3D-друку необхідно орієнтувати таким чином, щоб подальше найбільше навантаження в експлуатації відбувалось у напрямку розташування шарів.

3. Для параметрів товщини шару у 0,2 мм при ширині лінії у 0,4 мм, які найбільш часто використовуються на практиці, граничним кутом нахилу шарів є кут 30° . Подальше збільшення кута нахилу призводить до більш ніж трьохкратного зниження міцності, що може призвести до руйнування деталі в процесі експлуатації.

4. При використанні товщини шару у 0,2 мм, починаючи з кута нахилу шару у 40° границею міцності всього зразка є фактично – міжшарова міцність, що свідчить про необхідність додаткового підбору інших параметрів друку для забезпечення її підвищення.

5. При зменшенні товщини шару з 0,2 мм до 0,1 мм, при однакових ширинах лінії, спостерігається зниження міцності починаючи вже з кута нахилу 20° . Враховуючи те, що зменшення товщини шару до 0,1 мм при ширині лінії у 0,4 мм крім зазначеного вище ще й призводить до збільшення часу виготовлення деталі – використання такого співвідношення параметрів є недоцільним.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Abeykoon C., Sri-Amphorn P., Fernando A. Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2020. Vol. 3, Is. 3. p. 284-297.
2. Diegel O. Additive Manufacturing: An Overview. *Comprehensive Materials Processing*. 2014. Vol. 3. p. 3-18.
3. Anitha R., Arunachalam S., Radhakrishnan P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *J. Mater. Process. Technol.* 2001. Vol. 118, Is. 1-3. p. 385-388.
4. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer: New York, 2015. 498 p.
5. Wang X., Jiang M., Zhou Z. et al. 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective. *Composites. Part B: Engineering*. 2017. Vol. 110. p. 442-458.
6. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *Int J Adv Manuf Technol*. 2016. Vol. 83. p. 389-405.
7. Sheoran A. J., Kumar H. Fused deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: review and reflection on present research. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 21, Is. 3. p. 1659-1672.
8. Heidari-Rarani M., Ezati N., Sadeghi P., Badrossamay M. R. Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2022. Vol. 35, Is. 12. p. 2435-2452.

9. Popescu D., Zapciu A., Amza C. et al. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: a review. *Polymer Testing*. 2018. Vol. 69. p. 157-166.
10. Yao T., Deng Z., Zhang K. et al. A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations. *Composites. Part B: Engineering*. 2019. Vol. 163, Is. 15. p. 393-402.
11. Chacón J. M., Caminero M. A., García-Plaza E. et al. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*. 2017. Vol. 124. p. 143-157.
12. Wang S., Ma Y., Deng Z. et al. Effects of fused deposition modeling process parameters on tensile, dynamic mechanical properties of 3D printed polylactic acid materials. *Polymer Testing*. 2020. Vol. 86, Is. 34. p. 106-483.
13. ASTM D638-14. Standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014. 16 p.
14. Li H., Wang T., Sun J. et al. The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties. *Rapid Prototyping Journal; Bradford*. 2018. Vol. 24, Is. 1. p. 80-92.
15. 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, Is. 1. p. 287-295.
16. Alhubail M. Statistical-based optimization of process parameters of fused deposition modelling for improved quality : thesis ... degree of Doctor of Philosophy. University of Portsmouth, 2012. 175 p.
17. Ziemian C., Sharma M., Ziemian S. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling. *Mechanical Engineering*. 2012. p. 159-180.
18. Górski F., Kuczko W., Wichniarek R. Influence of process parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using fused deposition modelling

technology. *Advances in Science and Technology – Research Journal*. 2013. Vol. 7, Is. 19. p. 27-35.

19. Tymrak B. M., Kreiger M., Pearce J. M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*. 2014. Vol. 58. p. 242-246.

20. Ahn S.-H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P. K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*. 2002. Vol. 8, Is. 4. p. 248-257.

21. Bertoldi M., Yardimci M. Mechanical characterization of parts processed via fused deposition. *Proc. 9th Solid Freeform Fabrication Symposium*. The University of Texas at Austin, Austin, TX. 1998. p. 557-565.

22. Maloch J., Hnátková E., Žaludek M. Effect of processing parameters on mechanical properties of 3D printed samples. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 919. p. 230-235.