

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____

(підпис)

« 25 » листопада 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Нікуліну Олексію Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Експериментальне дослідження адгезії деталей до робочої поверхні конвейерного 3D принтеру

Затверджена наказом по університету від 22.11.2024 р. № 1231СТ

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 31.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 3D-принтер: Anycubic Mega X;

3.2 Прилад для вимірів: ручний електронний динамометр;

3.3 Матеріал столу принтера: поліуретан та силікон;

3.4 Філамент: СОРЕТ;

3.5 Форма деталей: квадрат, коло, зірка;

3.6 Площа контакту деталей зі столом принтера: 900 мм².

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: _____

4.1 Аналіз технічного завдання;

4.2 Теоретична частина;

4.3 Аналіз досліджень у галузі;

4.4 Розрахункова частина;

4.5 Охорона праці;

4.6 Висновки;

4.7 Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Слайди (презентація у форматі ppt, 18 слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	25.11 – 26.11.24	вик.
2	Аналіз досліджень у галузі 3D-друку	27.11 – 03.12.24	вик.
3	Аналіз літературних джерел на тему адгезії та її впливу на 3D-друк	04.12 – 08.12.24	вик.
4	Збір інформації про фізичні та хімічні властивості матеріалів конвеєрних стрічок	9.12 – 14.12.24	вик.
5	Планування та підготовка до проведення експерименту	15.12 – 20.12.24	вик.
6	Проведення експерименту та аналіз його результатів	20.12 – 30.12.24	вик.
7	Оформлення пояснювальної записки	01.07 – 07.01.25	вик.
8	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	07.01 – 10.01.25	вик.
	Подання роботи на рецензію	11.01 – 12.01.25	вик.
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	12.01 – 13.01.25	вик.
11	Подання атестаційної роботи в ЕК	13.01.2025	вик.

Дата видачі завдання 25.11.2024 р.

Здобувач _____
(підпис)

Нікулін О.Д.

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Разумов-Фризюк Є.А.
(посада, прізвище, ініціали)

Я, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

3 січня 2025 р.

Нікулін О.Д.



РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 74 с., 13 табл., 36 рис., 2 дод., 13 джерел

АВТОМАТИЗАЦІЯ, 3D-ПРИНТЕР, АДГЕЗІЯ, КОНВЕЄР, МОДЕЛЬ, ЕКСТРУДЕР, ФАКТОРИ.

Мета роботи – визначити вплив параметрів друку на силу адгезії друкованих деталей до робочої поверхні конвеєрного 3D-принтера.

Об’єкт дослідження – адгезія друкованих деталей до робочої поверхні конвеєрного 3D-принтера.

Предмет дослідження – вплив параметрів друку на силу адгезії друкованих деталей різної форми до робочої поверхні конвеєрного 3D-принтера.

У роботі було проаналізовано явище адгезії та вплив його на якість 3D-друку, розглянуто особливі вимоги до матеріалів стрічок конвеєрного 3D-принтеру, на основі проаналізованих досліджень інших авторів було складено план та проведено власне дослідження з експериментом. Під час підготовки до проведення експерименту, було досліджено фактори що впливають на силу адгезії та вимоги до матеріалу стрічки принтеру;

Було проведено експеримент для встановлення залежності між силою адгезії та наступними параметрами друку:

- температура екструдера;
- температура столу принтеру;
- швидкість друку;
- форма деталей.

За допомогою багатфакторного аналізу було проаналізовано вплив досліджуваних факторів на адгезію, та побудовано математичну модель цієї залежності.

ABSTRACT

Explanatory note: 74 p., 13 tabl., 36 pic., 2 applications, 13 sources,

AAUTOMATION, 3D PRINTER, ADHESION, CONVEYOR, MODEL, EXTRUDER, FACTORS

Objective of the work: to determine the influence of printing parameters on the adhesion force of printed parts to the working surface of a conveyor 3D printer.

Object of research: the adhesion of printed parts to the working surface of a conveyor 3D printer.

Subject of research: the influence of printing parameters on the adhesion force of printed parts of different shapes to the working surface of a conveyor 3D printer.

The study analyzed the phenomenon of adhesion and its impact on 3D printing quality. It examined the specific requirements for conveyor belt materials in conveyor 3D printers. Based on the analysis of studies conducted by other researchers, a plan was developed, and an independent experiment was carried out.

During the preparation for the experiment, the factors influencing the adhesion force and the requirements for the printer belt material were investigated.

An experiment was conducted to establish the relationship between adhesion force and the following printing parameters:

- extruder temperature;
- printer bed temperature;
- printing speed;
- shape of the parts.

Using multifactor analysis, the influence of the studied factors on adhesion was analyzed, and a mathematical model of this relationship was constructed.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	7
Вступ	8
1 Теоретична частина	9
1.1 Аналіз області дослідження	9
1.1.1 Основні фактори, що впливають на адгезію в 3D-друці	10
1.1.2 Проблематика	12
1.1.3 Попередні дослідження	13
1.1.4 Актуальність дослідження	13
1.2 Фізичні властивості	13
1.2.1 Змочування поверхні твердого тіла рідиною	14
1.2.2 Адгезія між твердим тілом і рідиною	15
1.2.3 Термостійкість матеріалів	18
1.2.4 Зносостійкість матеріалів	20
1.2.5 Гнучкість і міцність матеріалу	21
1.3 Ресурси для пошуку	22
1.4 Постановка задач дослідження	23
2 Аналіз існуючих розробок в області визначення адгезії у 3d-друці	25
2.1 Дослідження вибору матеріалу конвейєрної стрічки 3D-принтера ...	25
2.2 Дослідження сили адгезії полімерів до тканин під час 3D-друку	28
2.3 Висновки за результатами аналізу існуючих досліджень	34
3 Експериментальна частина	35
3.1 Описання експерименту	35
3.2 Лабораторне обладнання	35
3.2.1 3D-принтер	35
3.2.2 Вимірювальний прилад	36

	6
3.2.3 Поверхня для друку	37
3.2.4 Філамент для друку	38
3.2.5 Форма деталей	38
3.3 Проведення експерименту	39
3.4 Аналіз результатів	42
3.5 Висновки з експерименту	45
4 Розрахункова частина	46
4.1 Багатофакторний аналіз	46
4.2 Висновки з розрахункової частини	55
5 Охорона праці	56
5.1 Освітлення	56
5.2 Вентиляція	57
Висновки	59
Перелік джерел посилання	61
Додаток А Висвітлення результатів кваліфікаційної роботи	63
Додаток В Демонстраційний графічний матеріал	74

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

КІТАР – Комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки;

НДР – науково-дослідна робота;

ПЗ – програмне забезпечення;

ХНУРЕ – Харківський національний університет радіоелектроніки;

STL – stereolithography (стереолітографія);

FDM – Fused Deposition Modeling (моделювання з розплавленням шарів);

Wi-Fi – Wireless Fidelity (бездротова вірність) ;

FLEX – Flexible (гнучкий) ;

PLA – Polylactic Acid (полілактид);

PEI – Polyetherimide (поліетерімід);

TPU – Thermoplastic Polyurethane (термопластичний поліуретан).

ВСТУП

У зв'язку зі стрімким розвитком науки і техніки в усьому світі в останні десятиліття, Четверта промислова революція запровадила новий тип виробничої системи, який прийшов на зміну класичній виробничій системі, що вже не встигала за цим розвитком. Класичні промислові лінії, що складаються з вузькоспеціалізованого обладнання, ефективні для виробництва великих партій продукції, але вузька спеціалізація обладнання перешкоджає швидкій зміні процесів і продуктів. 3D-друк та універсальні роботи можуть допомогти зробити виробництво більш гнучким [1].

За допомогою 3D-друку можна швидко виготовляти дрібносерійні прототипи виробів і складні деталі, які важко виготовити традиційними методами. Це значно спрощує тестування та вдосконалення продукції перед масовим виробництвом.

Конвеєрна конструкція цього принтера виділяється серед FDM 3D принтерів. Конструктивна особливість цих принтерів полягає в тому, що вони друкують під кутом, використовуючи конвеєрну стрічку як стіл. Зазвичай кут друку становить 45 градусів, але деякі принтери можуть змінювати оптимальний кут залежно від моделі. Такі принтери спрощують процес масового виробництва і зменшують втручання людини. Це позитивно впливає на продуктивність і запобігає помилкам, спричиненим людським фактором.

Тому тема – «Експериментальне дослідження адгезії деталей до робочої поверхні конвеєрного 3D принтеру» є актуальною, та допоможе покращити розуміння впливу різних факторів на силу адгезії та більш точно налаштувати вплив адгезії на якість друку. Під час дослідження буде розглянуто вплив різних факторів на фізичні властивості матеріалу робочої поверхні та філаменту для друку, а саме: температура, вологість, фізичний стан, суміжність матеріалів, та інші [2].

1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз області дослідження

Для дослідження необхідно розглянути всі аспекти області дослідження, терміни, та особливості конструкції [3].

Адгезія – це явище зчеплення двох різнорідних поверхонь або матеріалів на молекулярному рівні внаслідок міжмолекулярної взаємодії. Адгезія в 3D-друці є одним із ключових аспектів, що впливають на якість кінцевого виробу. Від правильного зчеплення деталі з робочою поверхнею залежить стабільність друку, точність геометрії та відсутність дефектів. Особливо актуальним це питання стає для конвеєрних 3D-принтерів, де процес друку не переривається, а вироби автоматично знімаються з робочої платформи після завершення друку.

Конвеєрні 3D-принтери відрізняються від класичних тим що замість статичної платформи використовується рухомий конвеєр, що дає змогу постійно друкувати вироби без зупинок для зняття готових деталей. За конструкцією вони бувають з стрічковою та роздільною поверхнею для друку. Стрічковий принтер розроблений мною у попередній роботі [4] наведено на рисунку 1.1.

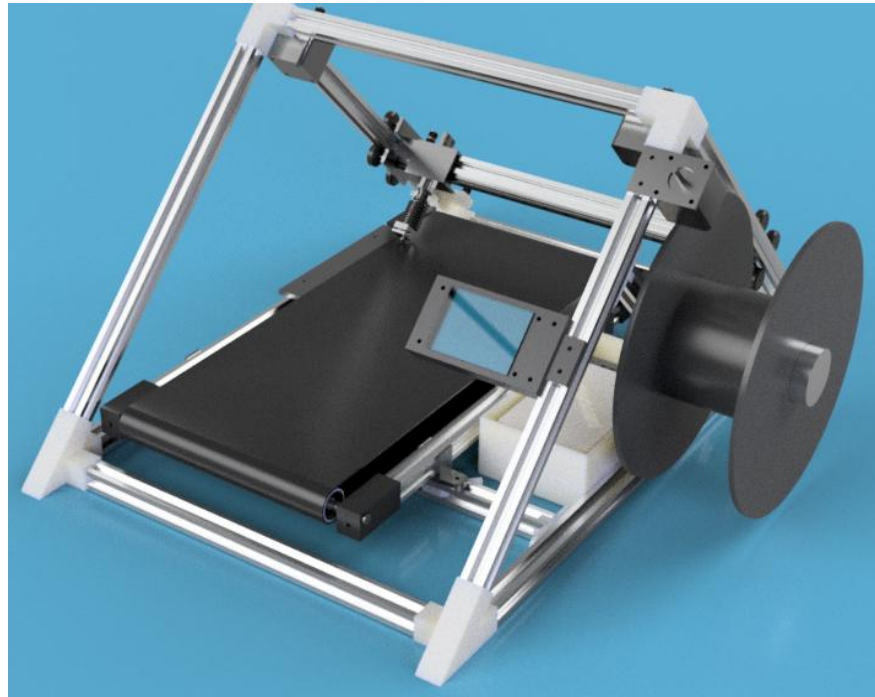


Рисунок 1.1 – Розроблена модель принтеру

Для стрічкової конструкції особливо важливо забезпечити гарну адгезію між робочою поверхнею конвеєра та матеріалом, з якого друкується виріб, так як до матеріалу ставиться додаткова вимога – гнучкість, еластичність, міцність, та властивість зберігати ці показники під дією температури та постійного напруження в наслідок натягу.

1.1.1 Основні фактори, що впливають на адгезію в 3D-друці

Вибір матеріалу робочої поверхні є найважливішим для забезпечення гарного зчеплення. Часто використовуються матеріали з високою температурною стійкістю та відповідною текстурою, наприклад у принтерів з роздільною конструкцією робочої поверхні використовуються негнучкі матеріали такі як: скло, метали, карбон або спеціальні плівки. У стрічковій конструкції використовуються гнучкі матеріали такі як: нейлон, полівінілхлорид, термополіуретан, гумові суміші [5].

Поширені дефекти друку викликані недостатньою адгезією, та викликаними зсувом деталі через це зображено на рисунку 1.2.

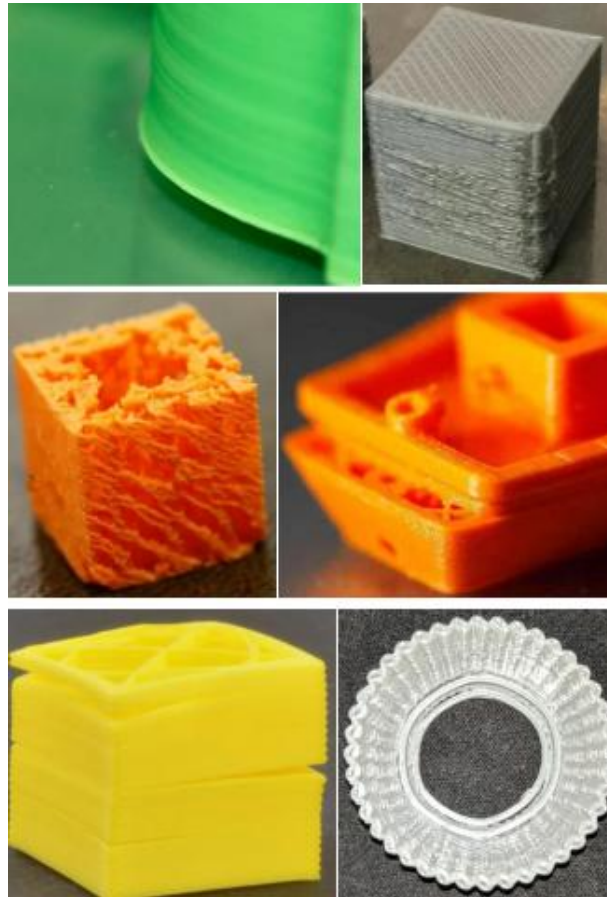


Рисунок 1.2 – Поширені дефекти друку

Правильно підбраного матеріалу недостатньо для забезпечення гарної адгезії, необхідно забезпечити правильний підігрів робочої поверхні що допомагає поліпшити адгезію пластику до неї, зменшити температурний перепад та передчасне застигання матеріалу, що приводить до нерівномірної усадки матеріалу. Однак у конвеєрних принтерах підтримка стабільної температури може бути складнішою через рух платформи.

Вибір матеріалу для друку у першу чергу обумовлено вимогами до властивостей друкованої деталі, але властивості філаменту теж варто брати до уваги при виборі матеріалу поверхні та її температури. для забезпечення необхідної якості адгезії. Різні типи пластику мають різні адгезивні властивості, наприклад, PLA зазвичай має добру адгезію до багатьох типів поверхонь, тоді як ABS потребує підігрітої платформи та може вимагати спеціальних засобів для поліпшення зчеплення (наприклад, використання клею або синтетичних покриттів).

Також вплив має текстура поверхні, пористі або рифлені матеріали, можуть покращити адгезію за рахунок механічного зчеплення.

Оптимальний вибір швидкості друку повинен давати оптимальне відношення швидкості та якості друку. Занадто висока швидкість друку може призвести до недостатньої адгезії, коли пластик не встигає достатньо затверднути і «вплавитися» в робочу поверхню.

1.1.2 Проблематика

У випадку стрічкових конвеєрних 3D-принтерів існують додаткові труднощі, пов'язані з рухом робочої поверхні, що створює додаткові сили, які можуть спричинити підлипання та зміщення або деформацію деталей під час друку. Це вимагає точного налаштування додаткових параметрів друку в порівнянні з принтерами класичної конструкції, а в особистості натяг стрічки, вибір відповідного матеріалу, рівномірний нагрів у необхідній змінній зоні через рух стрічки.

Напрямок стрічкових конвеєрних 3D-принтерів є досить новим, а тому не сильно поширеним, та на ринку представлено не так багато варіантів стрічок для них.

Важливою проблемою є – теоретична оцінка адгезії яка на даний момент є досить наближеною. Це пов'язано не лише з недосконалістю рівнянь для розрахунку міжмолекулярних сил, а з тим, що неможливо точно оцінити реальну кількість зв'язків на одиницю площі. Крім того, складно визначити справжню площу контакту, яка через шорсткість поверхні може бути значно більшою, ніж здається на перший погляд. Для підвищення міцності з'єднання часто спеціально збільшують шорсткість поверхні матеріалів шляхом відповідної обробки [6].

Тому адгезійну роботу та міцність з'єднань зазвичай визначають експериментально через безпосереднє руйнування зв'язків, що не дає змоги точно прогнозувати її величину.

Основна задача полягає в тому, щоб збалансувати параметри під час друку щоб забезпечити силу адгезії – вона повинна бути достатньою, щоб деталь залишалася стабільною під час друку, але не настільки сильною, щоб деталь не можна було легко зняти після завершення друку.

1.1.3 Попередні дослідження

У роботі буде розглянуто та проаналізовано попередні дослідження у області конвеєрних принтерів щоб зібрати досвід їх експлуатації, різні особливості конструкції та матеріалів, щоб скласти представлення про предмет дослідження.

Дослідження властивостей стрічки для конвеєрних 3D-принтерів зосереджені на адгезії, термостійкості та зносостійкості матеріалів, що використовуються для створення стрічки, а також на їхній вплив на якість друку та ефективність роботи принтера. Ці фактори будуть розглянуті далі.

1.1.4 Актуальність дослідження

Дослідження адгезії у конвеєрних 3D-принтерах є важливою складовою для забезпечення безперебійної роботи таких пристроїв. Що допоможе зменшити кількість браку та покращити якість друку, та особливо має накопичувальний ефект у середньо та великосерійних виробництвах.

Вивчення матеріалів, температурних умов, а також механічних властивостей поверхні є необхідним для створення стабільного виробничого процесу. Успішне вирішення цих питань може суттєво підвищити ефективність використання конвеєрних 3D-принтерів, та виявити оптимальні умови для роботи та проведення технічного обслуговування обладнання.

1.2 Фізичні властивості

Для дослідження необхідно добре розбиратися у фізичних властивостях які впливають на адгезію та процес друку, таких як: Зчеплення і

ковзання, термостійкість і зносостійкість матеріалів, гнучкість і міцність матеріалу.

1.2.1 Змочування поверхні твердого тіла рідиною

Так як при FDM друці відбувається нашаровування розплавленого філаменту на робочу поверхню – конвеєрну стрічку у випадку конвеєрного принтеру, або на застигнувший попередній шар, то варто розглядати процеси що відбуваються саме між твердим тілом та рідиною. Перш ніж говорити про адгезію цих тіл варто розглянути попередній цьому процес – змочування.

Змочуванням називають ізотермічний самочинний процес, який виникає при контакті поверхні твердого тіла з рідиною в результаті молекулярної взаємодії між ними [6].

Явище змочування полягає в тому, що крапля рідини, поміщена на поверхню твердого тіла, розтікається завдяки: дифузії, капілярності, леткості рідини, а також з інших причин.

Поверхневий натяг який спрямований по дотичній до відповідної поверхні діє під деяким кутом до площини контакту і його називають краєвим кутом змочування, та позначається літерою – θ . Процес змочування показано на рисунку 1.3 під літерою А, а процес не змочування під літерою Б.

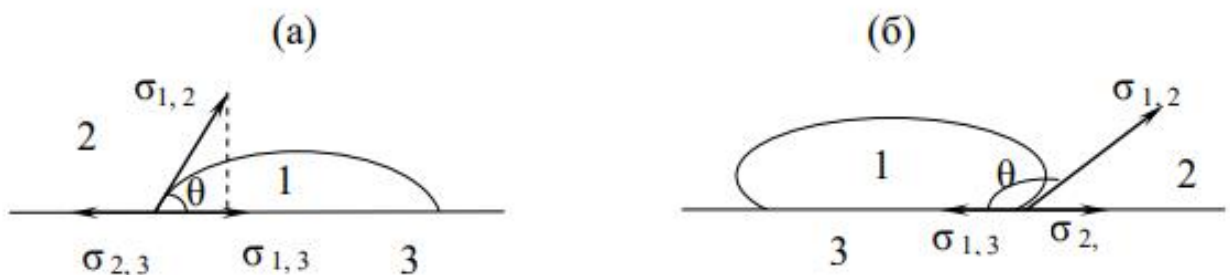


Рисунок 1.3 – Змочування краплею поверхні

На рисунку наведено переріз краплі рідини (1), поміщеної на поверхню твердого тіла (3) в атмосфері газу (2). На межі цих фаз будуть спостерігатись

поверхневі натяги $\sigma_{1,2}, \sigma_{1,3}, \sigma_{2,3}$. При прикладенні цих трьох сил до однієї точки на межі трьох фаз (точка а) крапля буде рухатися, поки не наступить їх рівновага. Умову рівноваги виражає рівняння Юнга, наведено у наступній формулі:

$$\sigma_{1,3} = \sigma_{1,2} + \sigma_{2,3} \cos \theta \quad \text{або} \quad \cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{1,2}}{\sigma_{2,3}}. \quad (1.1)$$

де $\sigma_{1,2}, \sigma_{1,3}, \sigma_{2,3}$ – сили поверхневого натягу;

$\cos \theta$ – крайовий кут змочування, який характеризує взаємовідношення поверхні твердого тіла і рідини. При змочуванні $\cos \theta > 90$, $\theta < 90$, $\sigma_{1,2} < \sigma_{1,3}$, а у випадку незмочування $\cos \theta < 90$, $\theta > 90$, $\sigma_{1,2} > \sigma_{1,3}$.

Таким чином, змочування поверхні твердого тіла рідиною може відбуватися тільки в тому випадку, коли поверхневий натяг між поверхнею твердого тіла і рідиною буде меншим, ніж поверхневий натяг між твердим тілом і газом. В протилежному випадку рідина не буде змочувати.

Поверхні твердого тіла, які змочуються рідиною, називаються ліофільними. Поверхні твердого тіла, які не змочуються рідиною, – ліофобними.

1.2.2 Адгезія між твердим тілом і рідиною

Для ефективного друку на конвеєрі необхідно забезпечити правильне зчеплення між стрічкою та друкованими об'єктами. Недостатнє зчеплення може призвести до зсуву та відпадання деталі під час друку, а надмірне – до труднощів зі зняттям об'єктів після завершення процесу, що може призвести до деформації деталі або пошкодження стрічки. Дослідження таких параметрів, як коефіцієнт тертя і адгезійна сила, допомагають налаштувати цей баланс.

Взаємодію між фазами або контактуючими поверхнями тіл різного походження називають адгезією (від лат. *adhaesio* – прилипання). Адгезія створює міцний зв'язок між двома тілами завдяки фізичним або хімічним міжмолекулярним силам.

Робота адгезії характеризує міцність адгезійного контакту і визначається роботою зворотного розриву цього контакту, віднесеною до одиниці площі, і вимірюється в тих же одиницях, що й поверхневий натяг, Дж/м².

Адгезія є результатом прагнення системи до зменшення поверхневої енергії, тому вона є самочинним процесом при відповідних умовах. Схематично адгезія та когезія показано на рисунку 1.4.

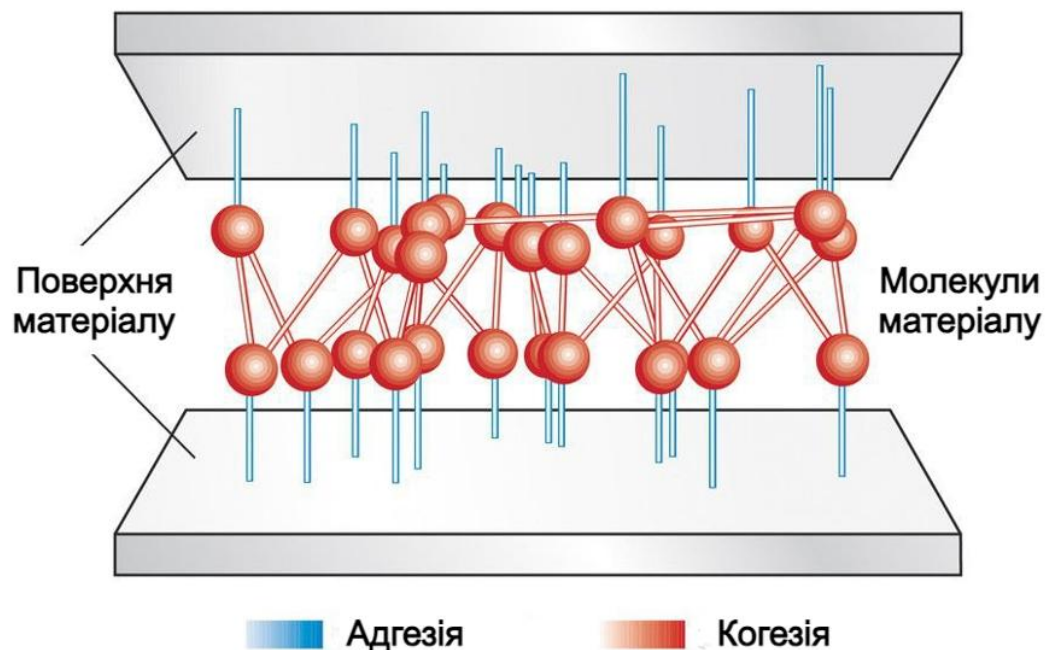


Рисунок 1.4 – Різниця між когезією та адгезією

Разом з адгезією варто розглянути та когезію, іншим видом взаємодії між молекулами, якщо адгезія – це сила взаємодії між молекулами різних матеріалів, то когезія – це сила взаємодії між молекулами одного і того ж матеріалу. Вона тримає молекули разом всередині однієї речовини.

Наприклад, когезія утримує рідину в краплі завдяки міжмолекулярним силам речовини.

Таким чином, адгезія пов'язана з силами між різними матеріалами, тоді як когезія – з силами всередині одного матеріалу, як зображено на рисунку.

Існує кілька механізмів (і відповідних теорій) адгезії, які залежать від природи взаємодіючих матеріалів та умов, за яких відбувається адгезія. Механічний механізм адгезії реалізується шляхом проникнення рідкого адгезиву в пори та тріщини поверхні твердого матеріалу. Згідно з молекулярною (адсорбційною) теорією, адгезія відбувається завдяки молекулярним силам Ван-дер-Ваальса та водневим зв'язкам. За цією теорією, чим ближче за полярністю адгезив і субстрат, тим сильніший контакт між ними [6].

Електрична теорія пояснює адгезію утворенням подвійного електричного шару між адгезивом і субстратом. Дифузійний механізм ґрунтується на взаємному проникненні атомів і молекул у поверхневі шари взаємодіючих фаз, що призводить до розмиття межі між ними та взаємного розчинення в місцях контакту.

Адгезія і змочування, як правило, супроводжують одне одного і відповідним чином характеризують міжфазну взаємодію.

Роботу адгезії можна обчислити за рівнянням Юнга, наведеним в попередньому підрозділі формула (1.1), підставивши цей вираз у рівняння Дюпре (1.2):

$$\frac{W_a}{S} = \sigma_{1,3} - \sigma_{1,2} + \sigma_{2,3}; \quad (1.2)$$

Отримуємо формулу (1.3):

$$\frac{W_a}{S \cdot \sigma_{2,3}} = 1 + \cos\theta. \quad (1.3)$$

де W_a – робота адгезії;

S – поверхня розділу фаз.

Оскільки змочування кількісно характеризується косинусом краєвого кута, то у відповідності з одержаним рівнянням воно визначається відношенням роботи адгезії до роботи когезії для змочуючої рідини.

Із рівняння (1.3) можна зробити такі висновки:

1. При повному змочуванні $\theta = 0$, $\cos\theta = 1$, $W_a = W_K$, тобто робота адгезії в цьому випадку дорівнює когезії змочуючої рідини;

2. При незмочуванні $\theta = 90^\circ$, $\cos\theta = 0$, $W_a = \frac{W_K}{2}$, тобто робота адгезії у два рази менша від роботи когезії змочуючої рідини;

3. При повному незмочуванні $\theta = 180^\circ$, $\cos\theta = -1$, $W_a = 0$, однак такий стан на практиці не реалізується, оскільки деяка адгезія завжди існує. Тому повного незмочування в реальних системах також бути не може.

1.2.3 Термостійкість матеріалів

Під час друку робоча поверхня конвеєра піддається дії високих температур, особливо коли використовуються матеріали, що потребують нагріву, як-от ABS або нейлон. Важливо знати, як матеріал стрічки реагує на температурні зміни, щоб уникнути деформацій або зносу під час роботи. Вивчення теплопровідності, температурної стабільності та термічної деформації допомагає забезпечити довговічність стрічки та стабільність друку.

Для довговічності експлуатації стрічки важливо щоб сопло не могло розплавити матеріал конвеєрного полотна, хоч у нормальному режимі роботи це не повинно відбуватися, але при неправильному налаштуванні, зникненні

напруги або обриву ременю чи інших технічних збоїв таке можливо. Приклад контакту та температурна схема поширення тепла [7] показана на рисунку 1.5.

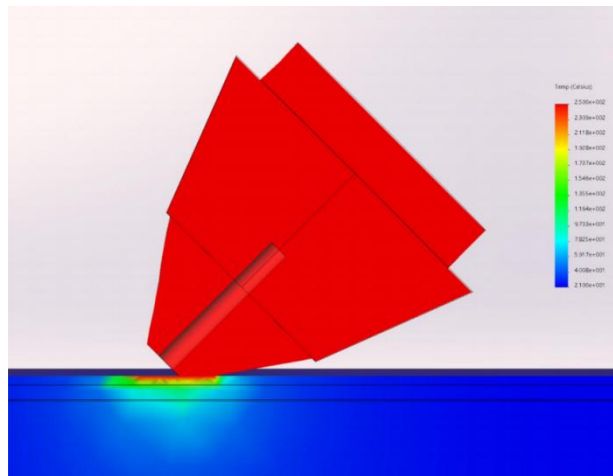


Рисунок 1.5 – Контакт сопла з стрічкою

Температура сопла залежить від виду пластику що використовується, так для більшості найпопулярніших пластиків температура складає 180 – 250°C. Матеріали, які використовуються для конвеєрних стрічок 3D-принтерів, та їх температури плавлення наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Температура плавлення матеріалів з яких виконується конвеєрні стрічки для принтерів.

Матеріал	Температура плавлення (°C)
Поліетилентерефталат (PET)	250-260
Поліамід (нейлон)	220-250
Поліпропілен (PP)	160-170
Поліетилен високої щільності (HDPE)	130-137
Поліуретан (TPU)	180-220
Поліестер (PETG)	230-250
Полімер з вуглецевим волокном (Carbon Fiber Reinforced Polymer)	230-260
Поліоксиметилен (POM, Delrin)	175-180

1.2.4 Зносостійкість матеріалів

Зносостійкість робочої поверхні конвеєрного 3D принтера грає важливу роль у якості адгезії, так як дрібні подряпини або потертості можуть вплинути на площу контакту друкованої деталі до стрічки принтеру. Також зменшення товщини стрічки приводить до послаблення сили натягу та збільшення зазору між стрічкою та соплом принтеру.

Розглянемо три показника зносостійкості:

- індекс зносу (mm^3/Nm) – об'єм матеріалу, який втрачається при терті, визначений через силу і відстань;
- оберти до руйнування (cycles) – кількість обертів або циклів до моменту руйнування матеріалу;
- твердість за шкалою Шора (Shore A/D) – показує твердість матеріалу, що часто використовується для полімерів, гуми та еластомерів.

У таблиці 1.2 розглянемо зносостійкість деяких матеріалів, які використовуються для конвеєрних стрічок у 3D-принтерах за допомогою наведених вище показників.

Таблиця 1.2 – Зносостійкість матеріалів з яких виконується конвеєрні стрічки для принтерів.

Матеріал	Твердість (Шор A/D)	Зносостійкість (mm^3/nm)	Оберти до руйнування (cycles)
TPU (термопластичний поліуретан)	85A-98A	35-100 mm^3/nm	Висока (500,000+)
Нейлон (поліамід)	70D-80D	100-300 mm^3/nm	Середня (300,000+)
PET (поліетилентерефталат)	75D-80D	70-150 mm^3/nm	Висока (500,000+)
Силікон	40A-90A	50-70 mm^3/nm	Висока (500,000+)
Поліуретан (PU)	60A-95A	50-100 mm^3/Nm	Дуже висока (500,000+)

1.2.5 Гнучкість і міцність матеріалу

Для того, щоб конвеєрний механізм працював безперебійно, матеріал стрічки повинен бути достатньо гнучким для натягування на валиках та підтримки рівномірної форми, але водночас стійким до механічних навантажень. Розглянемо фізичні властивості які визначають здатність стрічки витримувати постійне навантаження без пошкоджень та забезпечувати стабільну роботу принтеру.

Основні показники для оцінки гнучкості та міцності стрічки:

Модуль пружності або модуль Юнга (МПа) – описує здатність матеріалу протистояти деформаціям під дією навантажень. Чим вищий модуль Юнга, тим твердіший матеріал і менше деформується під навантаженням.

Міцність на розрив (МПа) – визначає максимальну силу, яку матеріал може витримати перед тим, як порватися. Гнучкість – визначається мінімальним радіусом на який можна зігнути матеріал не викликаючи його пошкодження. Коефіцієнт подовження – відсоток подовження матеріалу до моменту його розриву під дією навантаження.

Неведені показники розглянемо у таблиці наступній таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Показники міцності матеріалів з яких виконуються конвеєрні стрічки для принтерів.

Матеріал	Модуль Юнга (МПа)	Міцність на розрив (МПа)	Радіус згину (мм)	Подовження при розриві (%)
TPU (термопластичний поліуретан)	7-12	30-55	1-2	500-700%
PET (поліетилентерефталат)	2000-2900	55-75	5-8	50-150%
Нейлон (PA)	2000-3000	60-80	4-6	100-300%
Полікарбонат (PC)	2200-2500	65-70	3-5	90-120%
Поліпропілен (PP)	1400-1800	30-40	6-10	500-800%

1.3 Ресурси для пошуку

Розглянемо деякі попередні наукові публікації пов'язані з дослідженням конвеєрних стрічок 3D принтерів, які будемо шукати за допомогою наступних електронних ресурсів:

Google Scholar (scholar.google.com) є пошуковою системою для наукових статей та публікацій, яка охоплює широкий спектр матеріалів з різних галузей знань, включаючи інженерію та матеріалознавство. Для пошуку досліджень з адгезії деталей до конвеєрних стрічок 3D-принтерів можна використовувати запити на зразок "3D printer conveyor belt adhesion" або "3D printer conveyor belt properties".

SpringerLink (link.springer.com) це наукова база даних, яка публікує статті з різних дисциплін, таких як техніка, матеріалознавство, 3D-друк та інженерія. Вона містить дослідження про механічні та фізичні властивості стрічкових матеріалів для 3D-принтерів, зокрема про їх термостійкість, гнучкість та зносостійкість.

ScienceDirect (sciencedirect.com) є науковою бібліотекою, яка надає доступ до широкого вибору матеріалів з питань адитивного виробництва, властивостей полімерів та інших матеріалів. Тут можна знайти статті з аналізом фізичних та хімічних характеристик стрічок для 3D-принтерів, а також їх термостійкість і зносостійкість.

ResearchGate (researchgate.net) є платформою для дослідників, де можна знайти статті та дослідження, а також безпосередньо поставити запитання авторам. Платформа також дозволяє брати участь в обговореннях та ділитися дослідницькими результатами.

Використовуючи ці ресурси знайдемо та проаналізуємо дослідження фізичних властивостей стрічок для конвеєрних 3D-принтерів та адгезії деталей до їх робочої поверхні.

1.4 Постановка задач дослідження

Метою даного дослідження є встановлення залежності сили адгезії друкованих деталей до робочої поверхні конвеєрного 3D-принтера від основних параметрів друку. Це дозволить оптимізувати процес друку для забезпечення високої якості виробів та стабільності їх адгезії під час виготовлення.

Об'єкт дослідження – адгезія друкованих деталей до робочої поверхні конвеєрного 3D-принтера.

Предмет дослідження – вплив параметрів друку на силу адгезії друкованих деталей різної форми до робочої поверхні конвеєрного 3D-принтера.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

- провести аналіз існуючих досліджень у сфері адгезії в 3D-друці, зокрема вивчити вплив температурних та швидкісних параметрів друку на адгезію деталей, що дозволить краще зрозуміти механізми взаємодії між матеріалами і поверхнею;
- вибір форм друкованих деталей, що дозволить порівняти вплив параметрів друку на різноманітні геометричні конфігурації;
- визначення діапазонів змін параметрів друку: температури екструдера, температури столу та швидкості друку, щоб чітко окреслити область дослідження та максимально точно виміряти силу адгезії;
- провести серію експериментів із варіативністю зазначених параметрів для визначення сили адгезії друкованих деталей до робочої поверхні, що дозволить зібрати практичні дані для подальшого аналізу;
- проаналізувати отримані експериментальні дані, використовуючи методи багатофакторного аналізу, для встановлення взаємозв'язків між параметрами друку та силою адгезії, що дозволить створити точні моделі цього процесу;

- побудувати математичні моделі залежності сили адгезії від температури екструдера, температури столу та швидкості друку для кожної форми деталей (коло, квадрат, зірка), що дасть змогу передбачити результат друку для різних варіантів налаштувань

- розробити рекомендації щодо оптимальних параметрів друку для забезпечення стабільної адгезії деталей, що допоможе в практичному застосуванні отриманих даних у роботі конвеєрних 3D-принтерів.

Очікувані результати:

- визначення найбільш значущих параметрів друку, які впливають на силу адгезії, що дозволить точніше налаштовувати параметри для покращення якості друку;

- побудова математичних моделей, які описують залежність сили адгезії від параметрів друку, що забезпечить можливість прогнозування результатів для різних умов;

- надання рекомендацій для практичного використання отриманих результатів у роботі конвеєрних 3D-принтерів, що дозволить підвищити ефективність виробничих процесів;

- перевірка придатності до використання обраних матеріалів столу принтера, що допоможе в оптимізації технологічного процесу.

2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РОЗРОБОК В ОБЛАСТІ ВИЗНАЧЕННЯ АДГЕЗІЇ У 3D-ДРУЦІ

2.1 Дослідження вибору матеріалу конвейерної стрічки 3D-принтера

Почнемо з проекту авторів з Ворчестерського політехнічного інституту штат Массачусетс (США) – Shawn McCarthy, Zachary Palanchian, James Whelan під назвою Conveyor Belt 3D Printer [7].

У роботі розглядаються всі деталі конвеєрного 3D-принтера та етапи його побудови, я особливу увагу звернув на частину з вибором та експлуатацією конвеєрної стрічки. Принтер побудований авторами в ході дослідження зображено на рисунку 2.1.

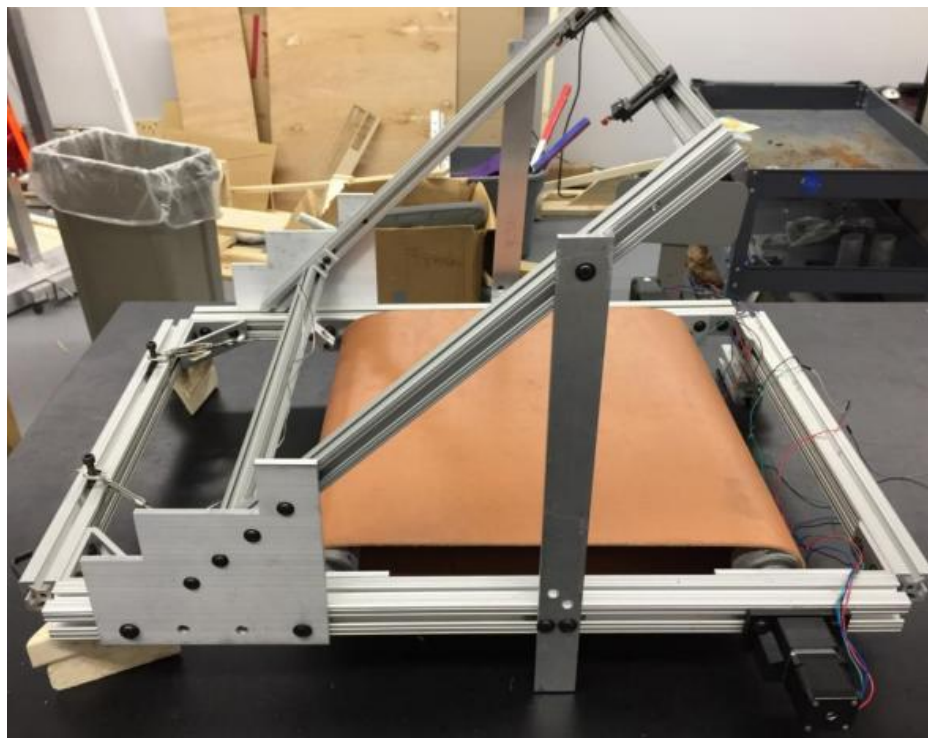


Рисунок 2.1 – Побудований стрічковий принтер

У якості стрічки було використано “Slip Top Tan Nylon”, виготовлений з композитного матеріалу: нейлону, нітрилу та поліестру. Стрічка має

рифлену поверхню для кращої адгезії, має гарну зносостійкість та міцність, заявлена стійкість до температури у 250 градусів. Стрічка зображена на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Конвеєрна стрічка Slip Top Tan Nylon

Команда авторів вирішила нанести верхнім шаром захисний матеріал, між Картон та PEI (Polyetherimide) було обрано PEI, за сукупністю факторів кращої довговічності та ціни.

PEI (Polyetherimide) – це високоефективний термопластичний полімер, який використовують для покращення властивостей основної стрічки. PEI витримує високі температури, що робить його придатним для роботи в умовах сильного нагріву. Він міцний, жорсткий та стійкий до зносу, стійкий до більшості хімічних речовин, що робить його довговічним матеріалом для використання в агресивних середовищах.

У SolidWorks було проведено аналіз теплопередачі від сопла нагрітого до 250°C, що достатньо для друку пластиком PET, а початкову температуру столу прийняли за 21°C, що відповідає кімнатній температурі. Для покращення температурної стійкості було нанесено 2 шари PEI, товщиною по

0,127 мм (5 mil). За 30 секунд контакту нагрів склав 110°C. Результат моделювання зображено на рисунку 2.3.

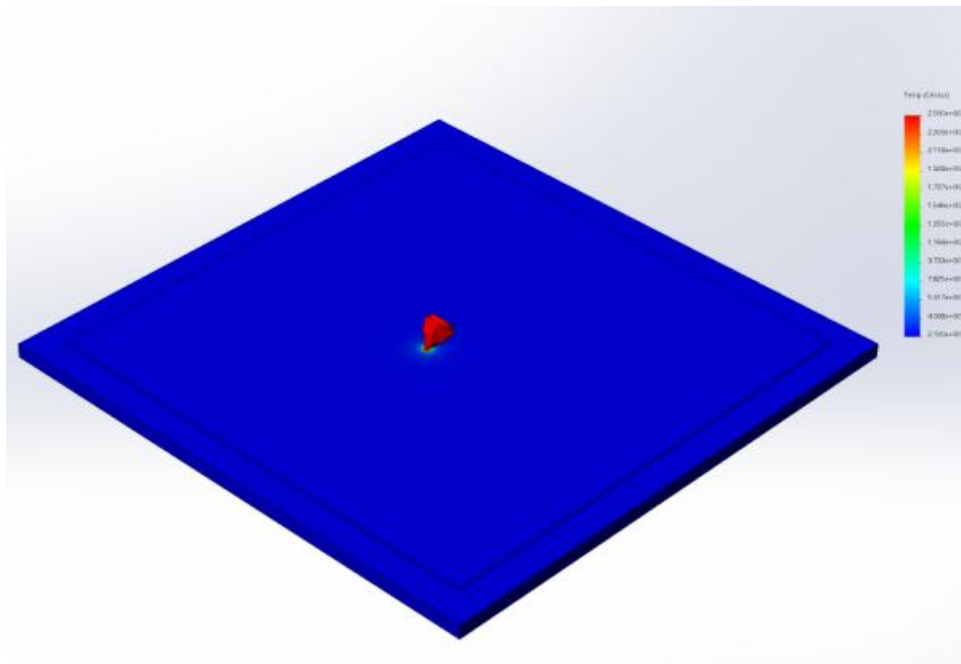


Рисунок 2.3 – Теплограма дослідження у SolidWorks

Але зауважу що прийняття температури столу за 21°C є неправильним, так як PET пластик потребує нагріву столу до 90°C. Та у висновку автори констатують що у результаті експлуатації сопло завдавало пошкоджень стрічці, що спростовує результати їх дослідження у SolidWorks.

У висновок можна сказати що автори акцентують увагу на важливості вибору матеріалу стрічки та столу з гарною теплопровідністю, та експериментальним шляхом прийшли до висновку що стіл з підігрівом варто розташовувати відносно екструдера так щоб через рух стрічки нагрівач встиг рівномірно нагріти область друку. А використання багатошарової стрічки з нейлону та двох шарів PEI, додає складнощі у експлуатації та виробництві, та не надає перевагу крім нижчої ціни, перед стрічкою з вуглецевого волокна, або суцільно з PEI.

2.2 Дослідження сили адгезії полімерів до тканин під час 3D-друку

Це дослідження було проведено вченими Лілльського університету (Université Lille Nord de France), Франція, авторів Razieh Hashemi Sanatgar, Christine Campagne, Vincent Nierstrasz. Назва роботи перекладається як – “Дослідження адгезійних властивостей прямого 3D-друку полімерів і нанокompозитів на текстильних матеріалах: вплив параметрів процесу FDM-друку” [8].

Метою даного дослідження було виявити вплив параметрів 3D FDM друку на якість адгезії полімерів до текстильних поверхонь. Для цього авторами було проведено експеримент, у якому було зафіксовано заміри сили адгезії при зміні температури сопла, температури столу, та швидкості друку.

Етапи експерименту та лабораторне обладнання показано на рис. 2.4.

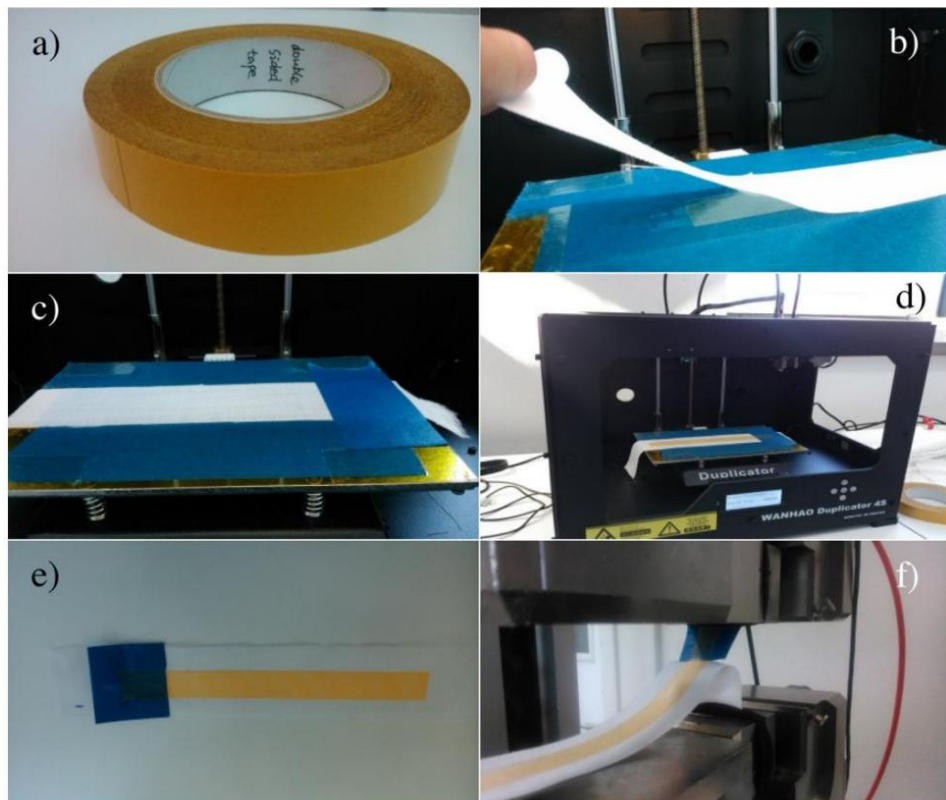


Рисунок 2.4– Етапи експерименту

Для експерименту використали такі матеріали: нейлон, PLA, PA(поліамід), було проведено 60 замірів у різних комбінаціях, результати яких наведено на рисунках 2.5-2.6.

Table 2
Statistical design of different series of adhesion tests.

Experiment	Type	Material	Considered Factor (Considered level)	Number of treatment combination	Treatment combination	Sample coding	Average of F adhesion (N/100 mm width)
1	Factorial experiment	Nylon on PA	F1(4,6,7) F2(1,2) F3(1,2,3)	18	411	S1	41.3
					412	S2	60
					413	S3	50.7
					611	S4	68
					612	S5	93.3
					613	S6	90.7
					711	S7	66.7
					712	S8	112
					713	S9	108
					421	S10	44
					422	S11	50.7
					423	S12	37.3
					621	S13	49.3
					622	S14	78.7
					623	S15	58.7
					721	S16	100
					722	S17	118.7
					723	S18	104
2*	Single factor experiment	PLA on PA	F1(1,2,3)	3	1	S19	5.3
					2	S20	8
					3	S21	12
					11	S21	12
					21	S22	28
					31	S23	41.3
3**	Factorial experiment	PLA on PA	F2(1,2,3) F4(1,2)	6	12	S24	30.7
					22	S25	57.3
					32	S26	69.3

* in constant printing speed of 83 mm/min and platform temperature of 23 °C.

** in constant printing speed of 83 mm/min and extruder temperature of 230 °C.

Рисунок 2.5– Результати експерименту

Table 3
Continuation of statistical design of different series of adhesion tests

Experiment	Type	Material	Considered Factor (Considered level)	Number of treatment combination	Treatment combination	Sample coding	Average of fabric tear strength (N/100 mm width)	Average of deposited layer break strength (N/100 mm width)
4	Factorial experiment	PLA on PLA	F1(1,2,3) F2(1,2) F3(1,2,3)	18	111	S27	21	-
					112	S28	15.3	-
					113	S29	-	5.7
					211	S30	11.7	-
					212	S31	14.5	-
					213	S32	13.7	-
					311	S33	-	15
					312	S34	-	10.7
					313	S35	12.3	-
					121	S36	15	-
					122	S37	14	-
					123	S38	-	5
					221	S39	14	-
					222	S40	12.3	-
					223	S41	12.3	-
					321	S42	-	9.7
					322	S43	-	16
					323	S44	12.7	-
					5111	S45	-	222
					5121	S46	318	-
					7111	S47	-	110
					7121	S48	358	-
					5211	S49	-	220
					5221	S50	492	-
7211	S51	-	146					
7221	S52	-	38					
5112	S53	-	30					
5122	S54	-	104					
7112	S55	-	98					
7122	S56	-	46					
5212	S57	-	116					
5222	S58	-	36					
7212	S59	-	22					
7222	S60	-	41.5					

Рисунок 2.6– Результати експерименту

Експеримент був проведений для адгезії нейлону до PA66 з урахуванням 3 різних факторів, температура екструдера: 235, 250, 260°C; температура підігріву столу: 23, 50°C; швидкість друку: 18, 50, 83 мм/хв, що становить загалом 18 комбінацій з трьома повторами. Результат експерименту для нейлону та PLA до PA66 зображено на рисунку 2.7.

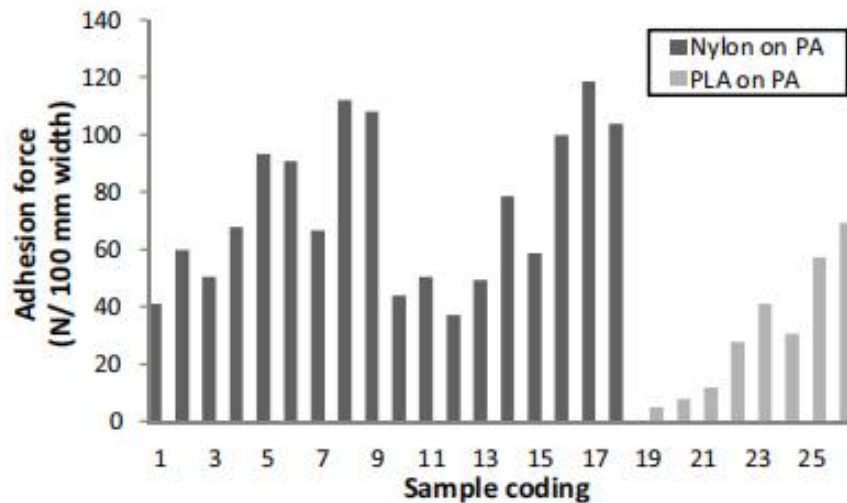


Рисунок 2.7 – Діаграма з результатами експерименту

Для розуміння закономірностей відношень різних показників до сили адгезії результат для нейлону представлено у вигляді графіків зображених на рисунках 2.8-2.10.

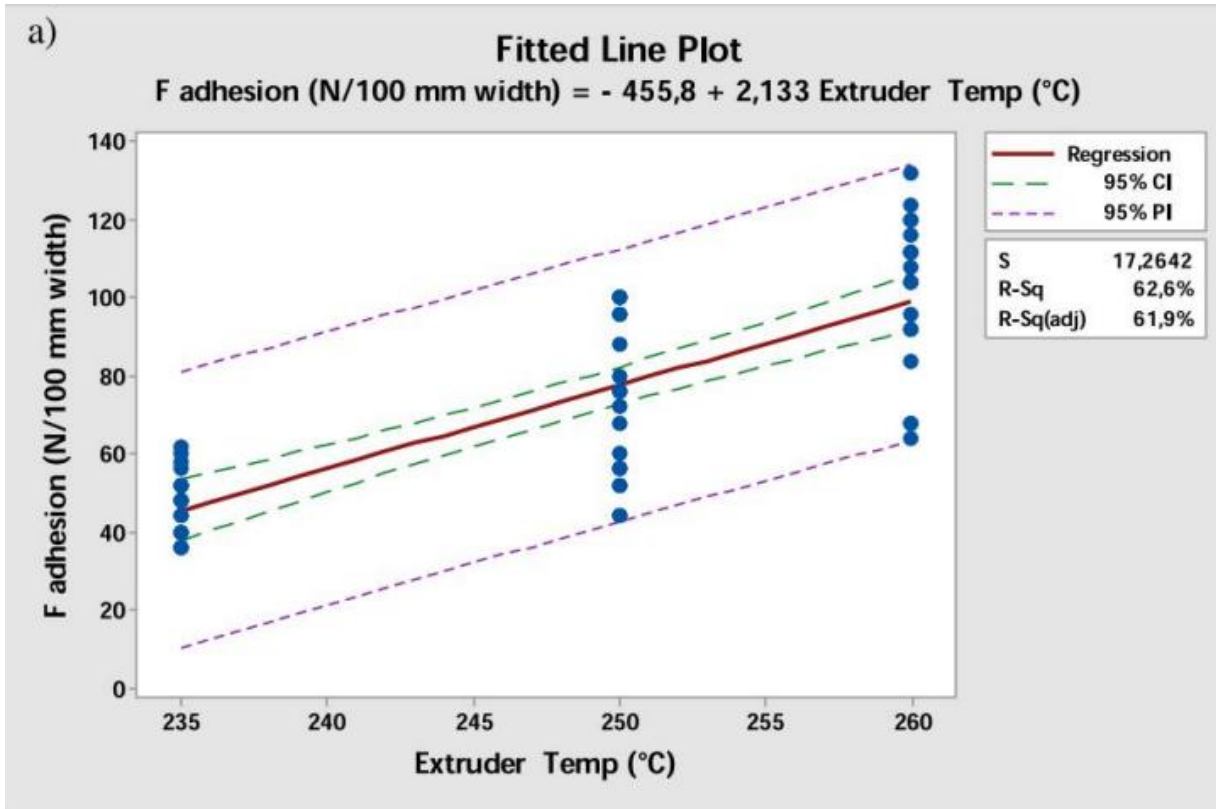


Рисунок 2.8 – Графік залежності адгезії нейлону від температури екструдера

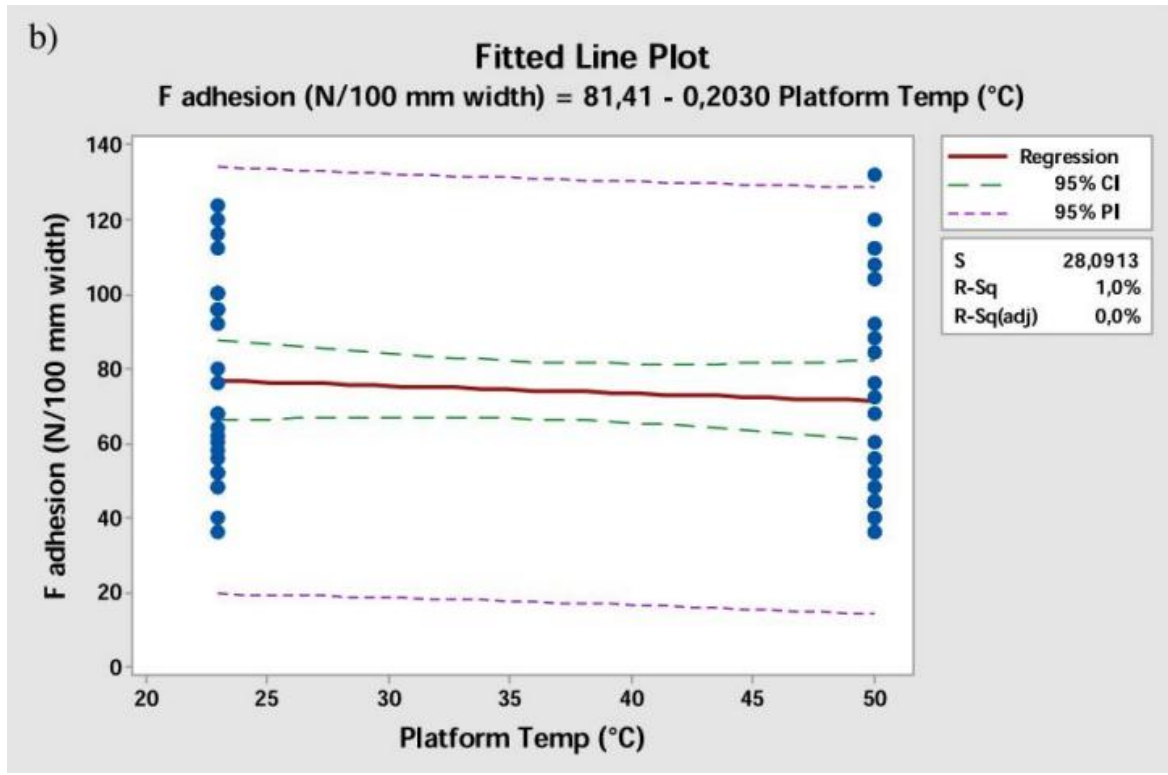


Рисунок 2.9 – Графік залежності адгезії нейлону від температури столу

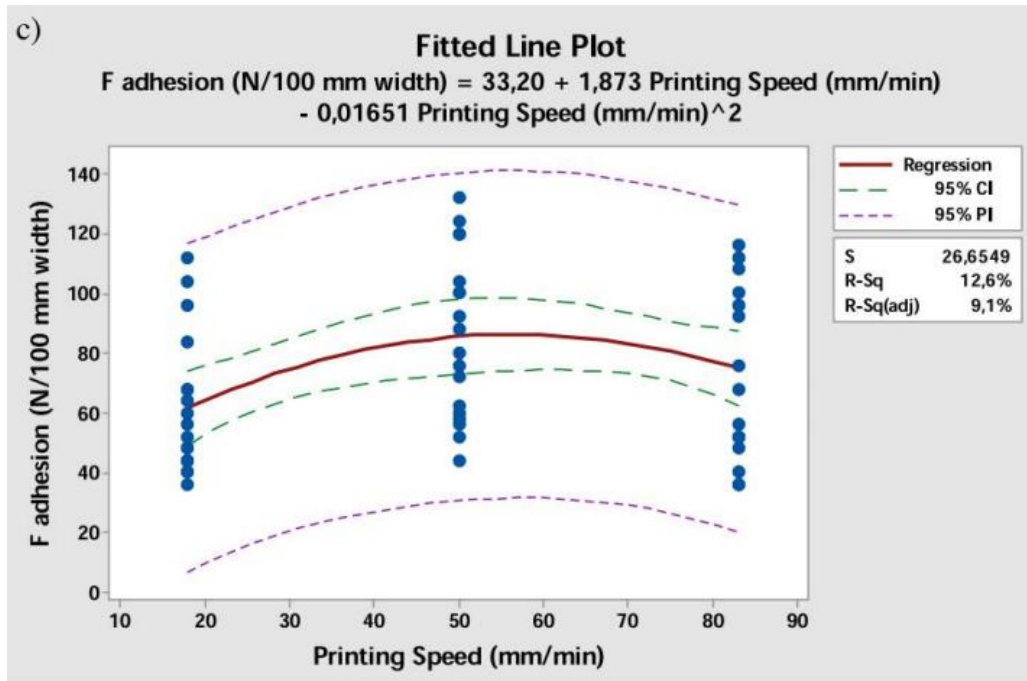


Рисунок 2.10 – Графік залежності адгезії нейлону від швидкості друку

З наведених графіків можна зробити висновок що сила адгезії нейлону до поверхні лінійно збільшується з температурою, підігрів столу для цих матеріалів не має значного впливу, а швидкість друку повинна бути середньою.

Графіки для PLA наведено на рисунках 2.11-2.13.

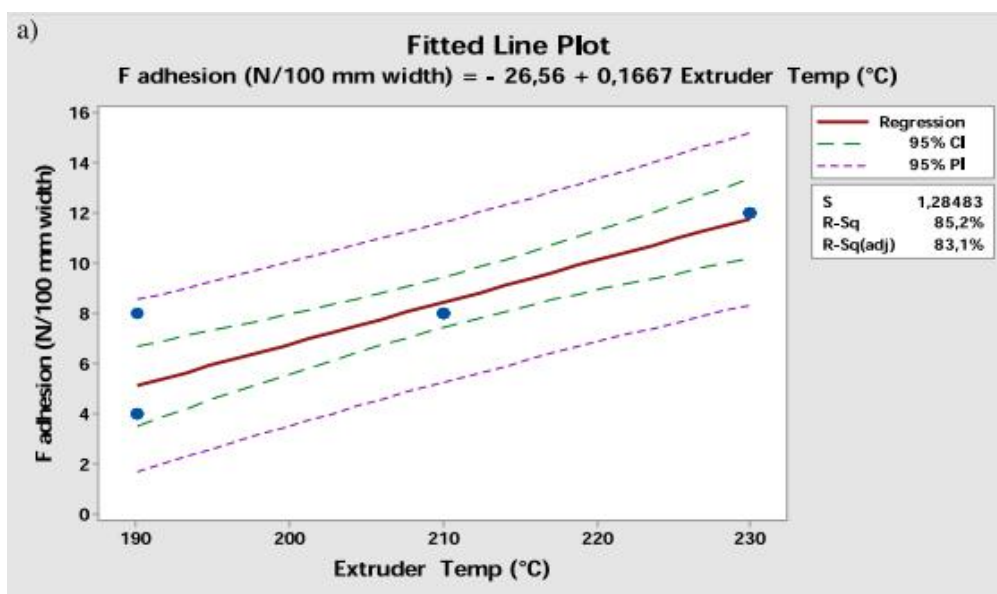


Рисунок 2.11 – Графік залежності адгезії PLA від температури екструдера

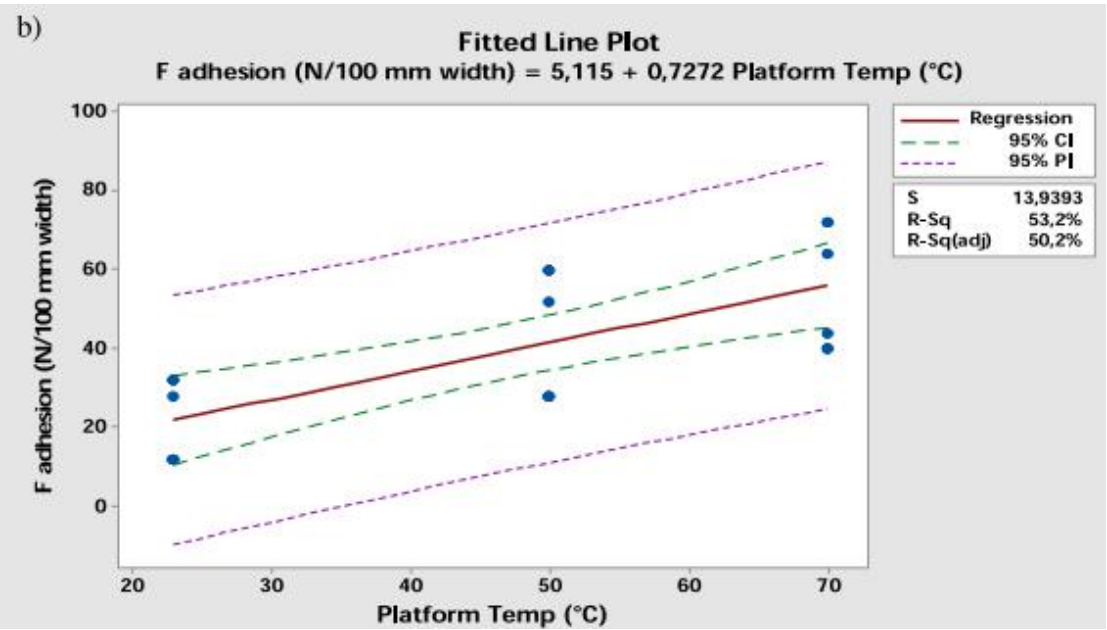


Рисунок 2.12 – Графік залежності адгезії PLA від температури столу

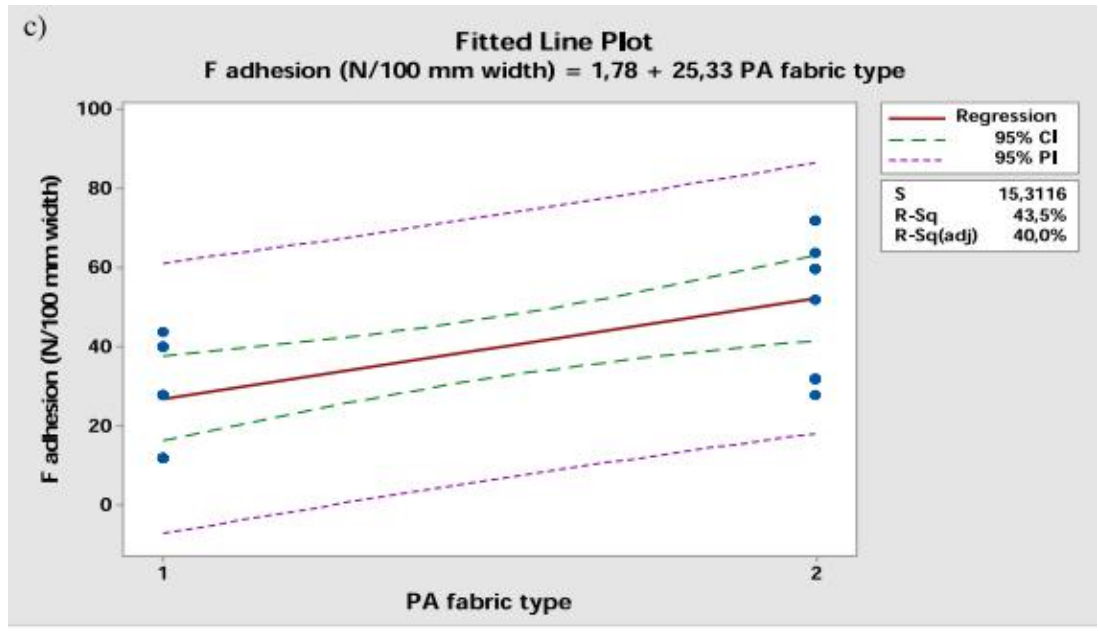


Рисунок 2.13 – Графік залежності адгезії PLA від структури поверхні (1 - більш щільна, 2- менш щільна)

З наведених графіків можна зробити висновок що сила адгезії PLA до поверхні лінійно збільшується з ростом як температури екструдеру так і столу. А зростання щільності матеріалу навпаки зменшує силу адгезії, через менше проникання філаменту у матеріал.

2.3 Висновки за результатами аналізу існуючих досліджень

З першого дослідження можна отримати уявлення про основні критерії та вимоги для вибору матеріалу конвеєрної стрічки, а також особливості їх експлуатації в умовах 3D-друку. Окремо слід звернути увагу на важливість правильного вибору матеріалу для стрічки та столу, зокрема, з високою теплопровідністю. Вибір матеріалу впливає не лише на процес друку, але й на кінцеву якість виробу. Автори дослідження експериментально дійшли до висновку, що для оптимального нагрівання робочої поверхні необхідно розташовувати нагрівач столу таким чином, щоб через рух стрічки область друку нагрівалася рівномірно. Використання багатошарової стрічки з нейлону та двох шарів PEI, незважаючи на її відносну дешевизну, ускладнює її експлуатацію і виробництво, не даючи значних переваг у порівнянні зі стрічками з вуглецевого волокна або суцільно з PEI.

З другого дослідження було отримано уявлення про методику проведення експерименту, використане обладнання та методи розрахунку результатів. Дослідження показало важливість точного контролю за параметрами процесу друку, а також дозволило зрозуміти, як різні фактори, такі як температура, швидкість друку та склад матеріалів, впливають на адгезію. Важливою частиною дослідження стало створення власноруч виготовленого філамента, що дозволило аналізувати вплив хімічного складу на кінцеву якість друку. Результати дослідження підтверджують, що розуміння впливу різних факторів на адгезію є критично важливим для досягнення високої якості друкованих деталей.

Аналіз цих досліджень допоміг мені скласти більш детальне уявлення як про конкретні методи виміру та математичного аналізу, так і про критерії та вимоги до вибору матеріалів для власного дослідження. Отримані результати стали основою для планування наступних етапів дослідження та дозволяють націлитись на вдосконалення методики для досягнення більш ефективних результатів у 3D-друці.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Описання експерименту

Метою експерименту є дослідити адгезію деталей до робочої поверхні конвейерного 3D принтеру, заміри будуть проводитись за різних параметрів друку [9], таких як: форма деталі, температура екструдера, температура столу та швидкість друку. Площа, та матеріал деталей будуть однаковими для всіх вимірів. Результати друку будуть визначені силою відриву деталі від столу, замір якої буде проводитись завдяки динамометру. За результатами вимірів буде складено таблицю.

3.2 Лабораторне обладнання

Дослідження було проведено у лабораторії Харківського національного університету, під керівництвом доц. Разумова-Фризюка Є. А. Лабораторія оснащена сучасним обладнанням, яке забезпечує високу точність вимірювань та дозволяє моделювати різні фізичні процеси. У ході експериментів використовувалося обладнання для визначення адгезії матеріалів та їх взаємодії з поверхнями яке розглянемо у наступних підрозділах.

3.2.1 3D-принтер

Для дослідження було використано 3D-принтер Anycubic Mega X. Хоч він і не має конвеєрну конструкцію, але використання матеріалу конвеєрної стрічки поверх стандартного столу дозволить провести відповідне дослідження.

Anycubic Mega X – це високопродуктивний 3D-принтер для який використовується для різних цілей, він має робочу область друку розміром $300 \times 300 \times 305$ мм, має просту конструкцію та зручний інтерфейс. Його

основні характеристики роблять його чудовим вибором для проведення експерименту. Принтер зображено на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Принтер Anycubic Mega X

3.2.2 Вимірювальний прилад

Для вимірів було використано ручний електронний кантер (рис. 3.2) з максимальною вагою виміру до 50 кілограмів, та ціною поділки у 1 грам.



Рисунок 3.2 – Електронний кантер

3.2.3 Поверхня для друку

У якості поверхонь для друку було обрано доступні побутові матеріали такі як поліуретан (рис. 3.3) та силікон (рис. 3.4) у вигляді килимків.

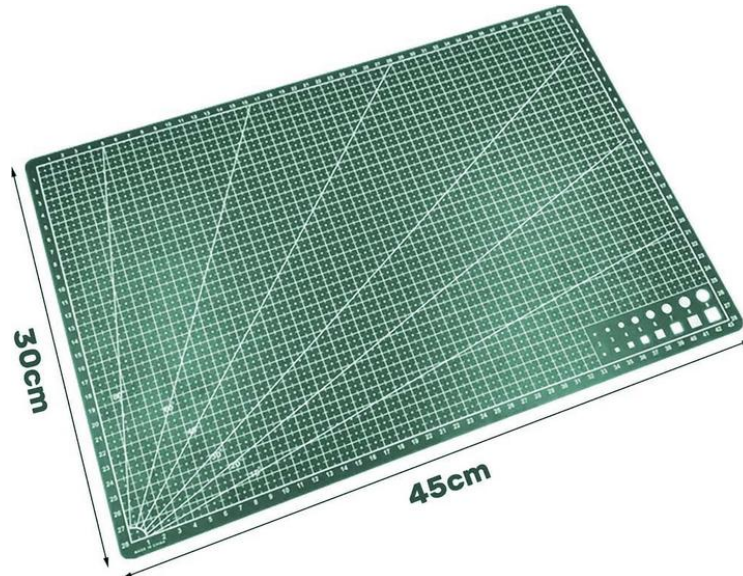


Рисунок 3.3 – Поліуретановий килимок

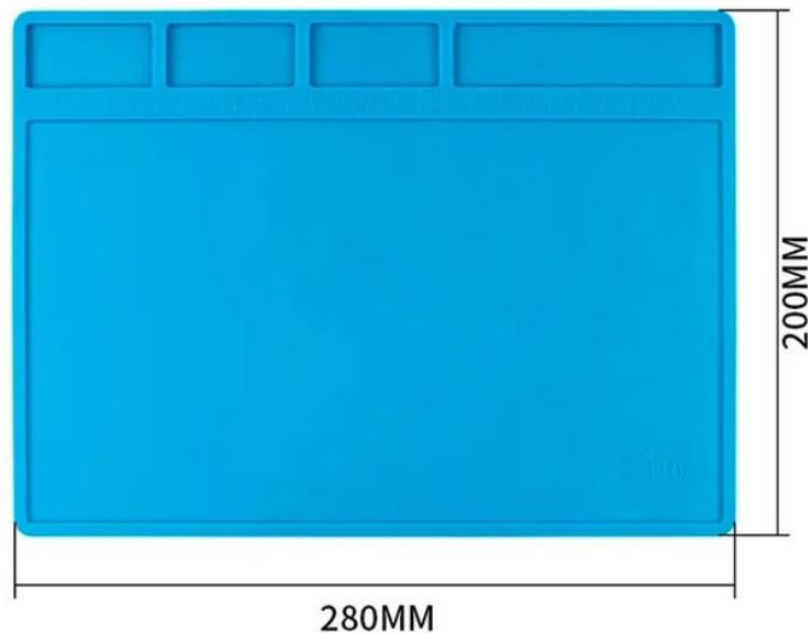


Рисунок 3.4 – Силіконовий килимок

Вони мають гарні фізичні властивості, стійкі до високих температур та гнучкі. Поліуретан витримує температуру до 160 – 230°C, силікон до 480°C.

3.2.4 Філамент для друку

У якості філаменту для друку було обрано пластик COPET за сою поширеність та універсальність. COPET (Co-Polyester Terephthalate) – це термопластичний полімер, що є модифікованим поліетилентерефталатом (PET). Він має високу міцність і термічну стабільність, що робить його ідеальним для різноманітних застосувань.

3.2.5 Форма деталей

Для дослідження впливу форми деталей на адгезію було розроблено три деталі : квадрат, коло та зірка. Деталі мають однакову площу контакту з конвеєрною стрічкою, яка складає 900 мм², були розроблені у програмі Fusion 360 та зображені на рисунках 3.5 – 3.7.



Рисунок 3.5 – Квадратна деталь

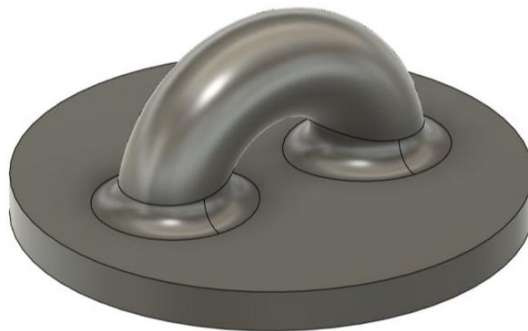


Рисунок 3.6 – Кругла деталь

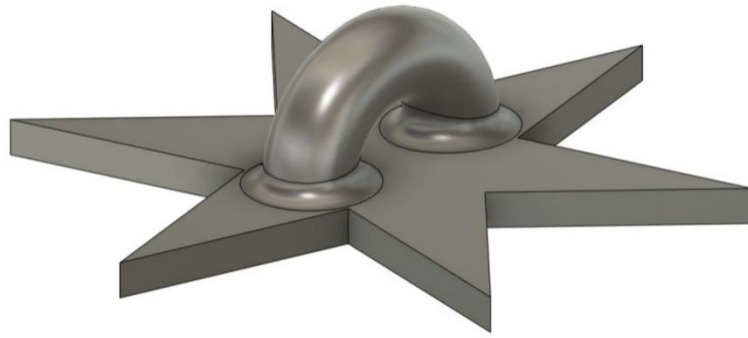


Рисунок 3.7 – Деталь форми зірка

3.3 Проведення експерименту

Експеримент було проведено особисто мною, під керівництвом к.т.н., доц. Разумова-Фризюка Є.А. Для проведення експерименту (рис. 3.8) використано наступне обладнання: 3D-принтер (рис. 3.1), кантер (рис. 3.2), та килимки (рис. 3.3-3.4), проведення експерименту зображено на рисунку 3.8.

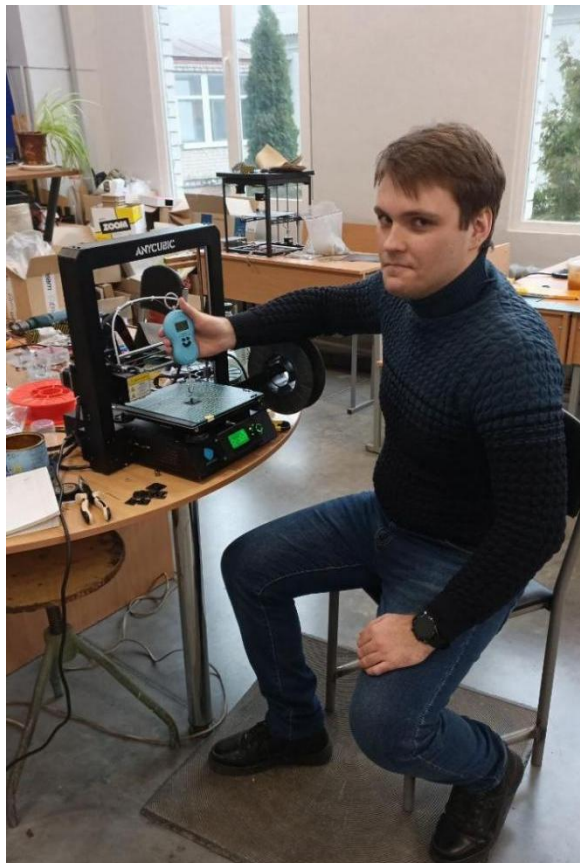


Рисунок 3.8 – Обладнання для проведення експерименту

На початку експерименту було до столу принтеру прикріплено досліджуваний матеріал(поліуретан), що відповідає матеріалу конвеєрної стрічки 3D-принтеру [10]. Стіл було від-калібровано для досягнення рівномірності друку та гарної адгезії. Закріплений килимок з поліуретану зображено на рисунку 3.9.



Рисунок 3.9 – Встановлена поверхня для дослідження

Всі деталі друкувались з каймою яка відступає від краю деталі на однакову для всіх деталей відстань. Надрукована деталь форми квадрат зображено на рисунку 3.10.

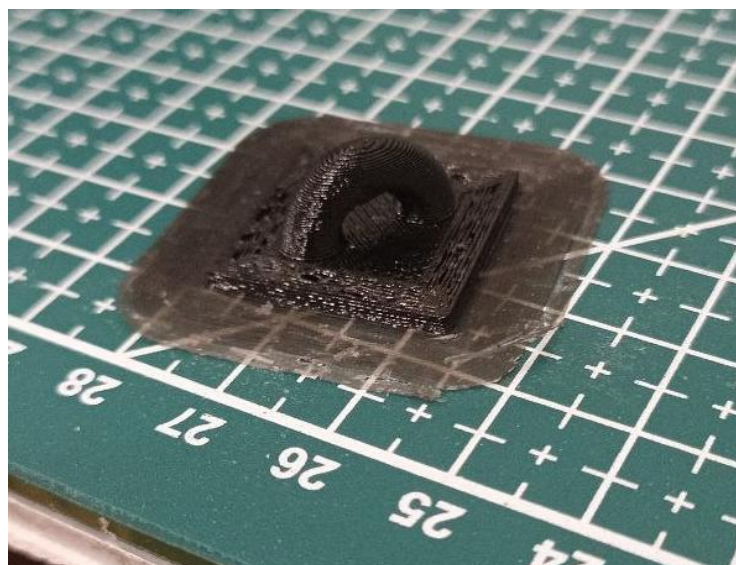


Рисунок 3.10 – Надрукована деталь форми – квадрат



Рисунок 3.11 – Надрукована деталь форми – зірка

Деталі друкувались з різними параметрами налаштування принтеру, для деталей різних форм ці параметри були однаковими. Частина надрукованих деталей наведено на рисунку 3.12.



Рисунок 3.12 – Надруковані деталі за різних параметрів друку

При спробі друку на силіконовому килимці при стандартних налаштуваннях, адгезія для закріплення першого шару була недостатньою навіть з нанесенням шару адгезивної рідини. Прнижчеи друці під екструдером утворювалась кулька з філаменту, щоб уникнути плутанини з підбором різних параметрів друку було вирішено експеримент з силіконом не продовжувати, невдала спроба наведена на рисунку 3.13.

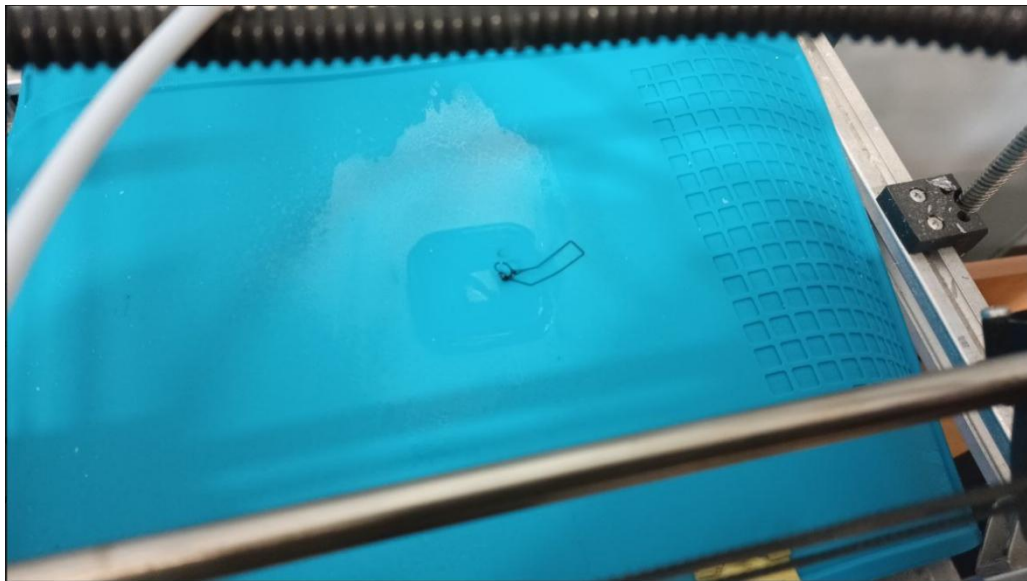


Рисунок 3.13 – Невдала спроба друку

3.4 Аналіз результатів

На поліуретановому килимку було надруковано декілька десятків деталей, всі спроби проходили у одній області килимка що привело до зносу верхнього шару матеріалу, який потрібно було коригувати калібруванням столу. У конвеєрній конструкції принтеру знос буде проходити більш рівномірно, але це не знімає недолік у зносостійкості матеріалу. Результат зносу у наслідок плавлення та дифузії з філаментом показано на рисунку 3.14.

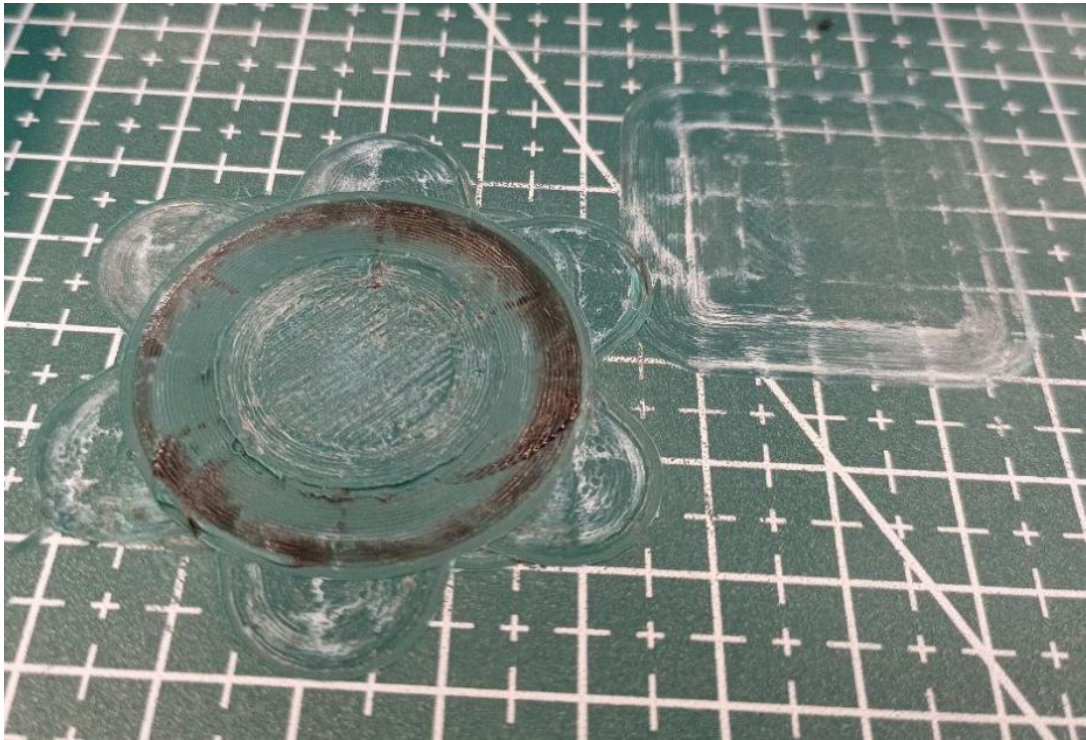


Рисунок 3.14 – Знос столу

Також при калібруванні та переміщенні нагрітого екструдера до температури вище за 150°C , відбувались випадкові контакти зі столом що приводило до розплавлення столу принтера. Пошкодження в наслідок випадкових контактів показано на рисунку 3.15.

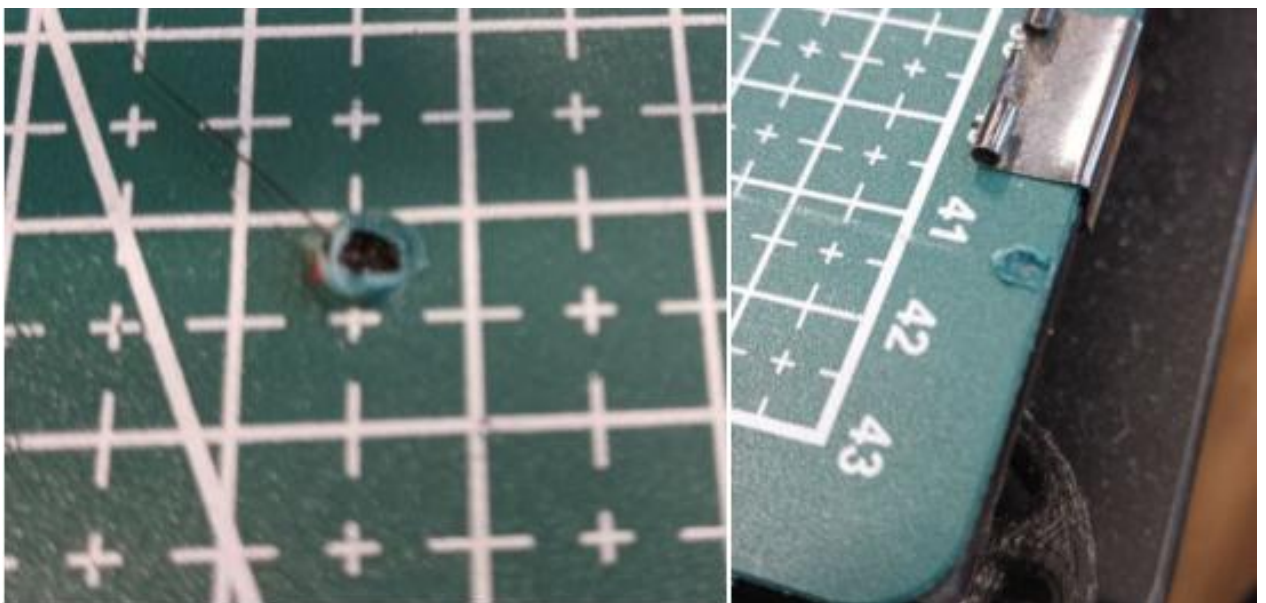


Рисунок 3.15 – Пошкодження нагрітим екструдером

Силіконовий килимок показав гарну стійкість до температури та фізичних пошкоджень, але потребує специфічних умов для досягнення прийнятних показників адгезії. Тому він у подальших дослідях розглядатись не буде.

За результатами вимірів адгезій COPET філаменту до поліуретанового столу було складено таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювання сили відриву.

Параметри друку			Квадрат	Зірка	Коло
Т екст. °C	Т стіл. °C	V шв. мм/с	F відр. Н	F відр. Н	F відр. Н
235	30	60	8,83	4,23	7,85
235	50	80	12,26	24,03	25,21
235	50	60	20,60	32,86	41,50
230	50	60	13,73	31,88	31,88
235	50	40	17,66	26,00	34,83
240	50	60	24,53	34,92	46,70
235	70	60	46,11	51,31	67,00

З Таблиці 3.1 видно що найгірші результати виміру сили відриву показують деталі що друкувались з зменшеною температурою столу, та збільшеною швидкістю. А найкращі зі збільшеними температурами столу та екструдера, що було очікувано з аналізу властивостей адгезії у попередніх розділах.

Для більшої детальності складемо математичну модель за отриманими результатами та проаналізуємо її у наступному розділі.

3.5 Висновки з експерименту

Загалом результати проведення експерименту відповідають моїм очікуванням, але в процесі експерименту виникли і неочікувані результати, такі як погана адгезія силіконового килимка та недостатня термостійкість поліуретанового килимка.

Адгезія на силіконовому килимку за стандартних налаштувань принтера для філаменту COPET виявилась недостатньою, що унеможливило тестування поліуретанового та силіконового килимків в однакових умовах з філаментом COPET. Тому було прийнято рішення відмовитись від подальшого дослідження силіконового килимка, хоча він і продемонстрував відмінну термостійкість та міцність.

Поліуретановий килимок, навпаки, показав гарні показники адгезії, які при різних налаштуваннях коливалися в діапазоні 10-50 ньютонів. Однак термостійкість матеріалу виявилась недостатньою, що призвело до проплавлення килимка при випадкових торканнях екструдеру до столу, що значно зменшило його термін експлуатації.

Обладнання показало себе надійним та не складним у використанні.

Електронний кантер дозволяв вимірювати пікове значення сили відриву деталі від столу, а принтер дозволяв друкувати по 3-4 деталі на годину з урахуванням часу на виміри та налаштування.

Після проведення вимірів отриману таблицю з результатами можна використовувати в подальшому багатофакторному аналізі для більш детального розуміння вагомості кожного фактора.

4 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

4.1 Багатофакторний аналіз

Багатофакторний аналіз – це метод дослідження [11], який використовується для аналізу впливу декількох незалежних факторів (змінних) на одну або кілька залежних змінних. Цей підхід дозволяє оцінити, як взаємодія різних факторів впливає на результат, а також визначити, які з них мають найбільший вплив.

У якості факторів у нашому випадку виступають: температура екструдера, температура столу, швидкість друку, ці фактори однакові для трьох форм деталей. У якості реакції на зміну факторів виступає сила відриву друкованої деталі від столу.

Для початку визначимо межі варіювання для кожного фактора, як видно з попереднього розділу температура екструдера варіюється у межах 230-240°C, температура столу 30-70°C, швидкість 40-80 мм/с.

Для зручності позначимо фактори фактори буквеними символами, тоді температура екструдера – e , температура столу – s , швидкість – v , сила відриву – f . За прийнятими позначками складено таблицю 4.1, яка наведена нижче.

Таблиця 4.1 – Прийняті позначки.

Фактори	Температура екструдера, °C	Температура столу, °C	Швидкість, мм/с	Сила відриву, Н
Прийняте позначення	e	s	v	f
Позначення у формулах	x_1	x_2	x_3	y
Верхня межа (1)	240	70	80	-
Основний рівень (0)	235	50	60	-
Нижня межа (-1)	230	30	40	-

У таблиці 4.1 визначено рівні варіювання факторів та позначено їх наступним чином: 1 – верхній рівень фактору, 0 – середнє значення, -1 – нижній рівень фактору.

Складемо матрицю для проведення багатофакторного аналізу результатів отриманих для деталей форми квадрат, зірка та коло, матрицю наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Матриця трьохфакторного експерименту.

№	e	s	v	x_1	x_2	x_3	$x_{11}=x_1-d$	$x_{22}=x_2-d$	$x_{33}=x_3-d$	$U_{\text{квад}}$	$U_{\text{зірк}}$	$U_{\text{коло}}$
1	235	30	60	0	-1	0	-0,7303	-1,7303	-0,7303	8,83	4,23	7,85
2	235	50	80	0	0	1	-0,7303	-0,7303	0,2697	12,26	24,03	25,21
3	235	50	60	0	0	0	-0,7303	-0,7303	-0,7303	20,60	32,86	41,50
4	230	50	60	-1	0	0	-1,7303	-0,7303	-0,7303	13,73	31,88	31,88
5	235	50	40	0	0	-1	-0,7303	-0,7303	-1,7303	17,66	26,00	34,83
6	240	50	60	1	0	0	0,2697	-0,7303	-0,7303	24,53	34,92	46,70
7	235	70	60	0	1	0	-0,7303	0,2697	-0,7303	46,11	51,31	67,00

Визначимо коефіцієнти регресії за формулами (4.1-4.2):

$$b_0 = \frac{\sum y}{n}; \quad (4.1)$$

$$b_n = \frac{\sum y \cdot x_n}{n}; \quad (4.2)$$

де y – результат вимірів;

x_n – фактори що впливають на реакцію.

Підставивши значення для y формули (4.1-4.2) отримаємо:

– для квадрату: $b_0 = 20,53, b_1 = 1,54, b_2 = 5,33, b_3 = (-0,77)$;

– для зірки: $b_0 = 29,32, b_1 = 0,43, b_2 = 6,73, b_3 = (-0,28)$;

– для кола: $b_0 = 36,42, b_1 = 2,12, b_2 = 8,45, b_3 = (-1,37)$.

Перевіримо коефіцієнти регресії за критерієм Стьюдента. Критерій Стьюдента має на увазі поставлені в центрі плану досліди. При трьохфакторному експерименті їх кількість становить 3. При цьому всі фактори повинні знаходитися на нульовому рівні. У моєму дослідженні отримані такі значення: $Y=13$, $Y=13,75$, $Y=14,5$, підставимо їх у рівняння (4.3) для отримання середнього значення.

$$\bar{Y}^C = \frac{\sum Y}{n}; \quad (4.3)$$

де Y – результат контрольних вимірів;
 n – кількість вимірів.

$$\bar{Y}^C = \frac{12 + 13,75 + 15,5}{3} = 13,75.$$

Далі порахуємо суму відновлення дисперсії, що характеризує похибку вимірів, за формулою (4.4).

$$S_{\text{відн}}^2 = \frac{\sum (Y_n - \bar{Y}^C)^2}{n - 1}; \quad (4.4)$$

Підставимо значення у формулу (4.4):

$$S_{\text{відн}}^2 = \frac{(12 - 13,75)^2 + (13,75 - 13,75)^2 + (15,5 - 13,75)^2}{2} = 3;$$

Тоді:

$$S_{\text{відн}} = \sqrt{3} = 1,73.$$

Розрахуємо оцінку дисперсії відтворюваності або міжгрупової дисперсії, за формулою (4.5).

$$S_{bi}^2 = \frac{S_{\text{відн}}^2}{x_n^2}, S_{b0}^2 = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{n}; \quad (4.5)$$

де $S_{\text{воспр}}^2$ – сума відновлення дисперсії;

x_n^2 – сума квадратів коефіцієнтів за відповідного чинника. Ця величина використовується для розрахунку дисперсії окремих факторів у моделі, що дозволяє поділити вплив різних факторів на загальний результат експерименту, розраховується за формулою (4.6).

$$x_i^2 = \sum b_i^2; \quad (4.6)$$

де b_i^2 – значення коефіцієнтів конкретного фактора.

Коефіцієнт Стьюдента розраховуємо за формулою (4.5):

$$t_{bi} = \frac{|b_i|}{\sqrt{S_{bi}^2}}; \quad (4.7)$$

Розрахунки за формулами (4.5-4.7) для кожного типу деталі наведено у таблицях 4.3 – 4.5.

Таблиця 4.3 – Розраховані коефіцієнти значимості для квадрату.

Коефіцієнт регресії	Перевірка коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента				
	Числове значення	S_{bi}^2	t_{bi}	Табличне значення коеф. Стьюдента	Перевірка значимості
b_0	20,53	0,08	72,59	3,18	Значущий
b_1	1,54	0,37	7,56	3,18	Значущий
b_2	5,33	0,37	3,67	3,18	Значущий
b_3	-0,77	0,13	-1,26	3,18	Не значущий

Таблиця 4.4 – Розраховані коефіцієнти значимості для зірки.

Коефіцієнт регресії	Перевірка коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента				
	Числове значення	S_{bi}^2	t_{bi}	Табличне значення коеф. Стьюдента	Перевірка значимості
b_0	29,32	0,43	44,79	3,18	Значущий
b_1	0,43	0,87	0,47	3,18	Значущий
b_2	6,73	0,87	7,23	3,18	Значущий
b_3	-0,28	0,40	-0,30	3,18	Не значущий

Таблиця 4.5 – Розраховані коефіцієнти значимості для кола.

Коефіцієнт регресії	Перевірка коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента				
	Числове значення	S_{bi}^2	t_{bi}	Табличне значення коеф. Стьюдента	Перевірка значимості
b_0	36,42	0,43	55,64	3,18	Значущий
b_1	2,12	0,87	2,27	3,18	Значущий
b_2	8,45	0,87	9,08	3,18	Значущий
b_3	-1,37	0,40	-1,48	3,18	Не значущий

Побудова рівняння регресії у кодованому вигляді. Після визначення значущості коефіцієнтів за критерієм Стьюдента, слід записати рівняння

регресії в закодованому вигляді, з урахуванням важливості чинників за критерієм Стюдента. Загалом для трьох-факторного експерименту рівняння виглядає:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \dots \quad (4.8)$$

Підставимо параметри у формулу (4.8), виключаючи незначущі фактори та отримаємо наступні рівняння:

– для квадрату:

$$y = 20,53 + 1,54x_1 + 5,33x_2;$$

– для зірки:

$$y = 29,32 + 0,43x_1 + 6,73x_2;$$

– для кола:

$$y = 36,42 + 2,12x_1 + 8,45x_2.$$

Для оцінки адекватності моделі зробимо її оцінку за критерієм Фішера. Знайдемо значення Y згідно з отриманим рівнянням регресії підставив значення, та отримаємо таблиці 4.6- 4.8 :

Таблиця 4.6 – Порівняння рівняння для квадрату.

№ виміру	Y		
	y_i	\hat{y}_i	$(\frac{\sum y_i}{n} - \hat{y}_i)^2$
1	8,83	15,21	28,36
2	12,26	19,76	0,59
3	20,60	20,53	0,00
4	13,73	18,99	2,38
5	17,66	21,30	0,59
6	46,11	22,07	2,38
7	24,53	25,86	28,36
$S_{ад}^2$			62,66

Таблиця 4.7 – Порівняння рівняння для зірки.

№ виміру	Y		
	y_i	\hat{y}_i	$(\frac{\sum y_i}{n} - \hat{y}_i)^2$
1	4,23	22,59	45,23
2	24,03	29,04	0,08
3	32,86	29,32	0,00
4	31,88	28,88	0,19
5	26,00	29,60	0,08
6	34,92	29,75	0,19
7	51,31	36,04	45,23
$S_{ад}^2$			91,00

Таблиця 4.8 – Порівняння рівняння для квадрату.

№ виміру	Y		
	y_i	\hat{y}_i	$(\frac{\sum y_i}{n} - \hat{y}_i)^2$
1	7,85	27,97	71,41
2	25,21	35,05	1,89
3	41,50	36,42	0,00
4	31,88	34,31	4,48
5	34,83	37,80	1,89
6	46,70	38,54	4,48
7	67,00	44,87	71,41
$S_{ад}^2$			155,55

Критерій Фішера (F-критерій) використовується для перевірки гіпотез про рівність дисперсій або значимість моделі регресії в багатофакторному аналізі. Критерій Фішера розраховуємо за формулою (4.9):

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{відн}^2}; \quad (4.9)$$

Підставимо значення у формулу (4.9) та отримаємо:

– для квадрату:

$$F = \frac{62,66}{3} = 20,49;$$

– для зірки:

$$F = \frac{91}{3} = 30,3;$$

– для кола:

$$F = \frac{155}{3} = 51,6.$$

Для $\alpha=0,01$: Табличне значення $F_{кр} \approx 10,10$, всі розраховані критерії більші за табличне значення тому модель валідна для проведеного експерименту.

Після перевірки рівнянь побудуємо за ними графіки, які зображені на рисунках 4.1 – 4.3.

Графік для деталі квадрат, за рівнянням: $y = 20,53 + 1,54x_1 + 5,33x_2$, наведено на рисунку 4.1.

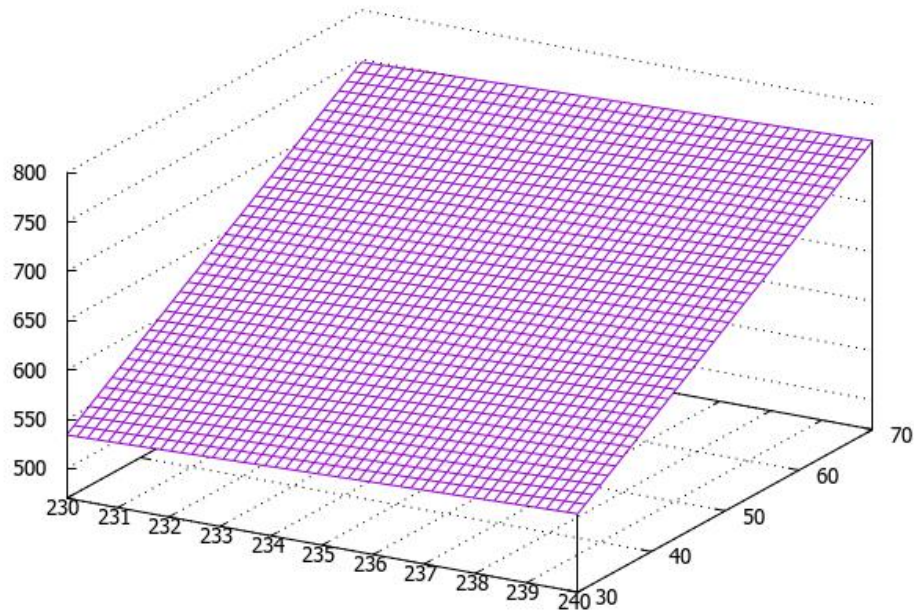


Рисунок 4.1 – Графік для рівняння деталі форми квадрат

Графік для деталі зірка, за рівнянням: $y = 29,32 + 0,43x_1 + 6,73x_2$, наведено на рисунку 4.2.

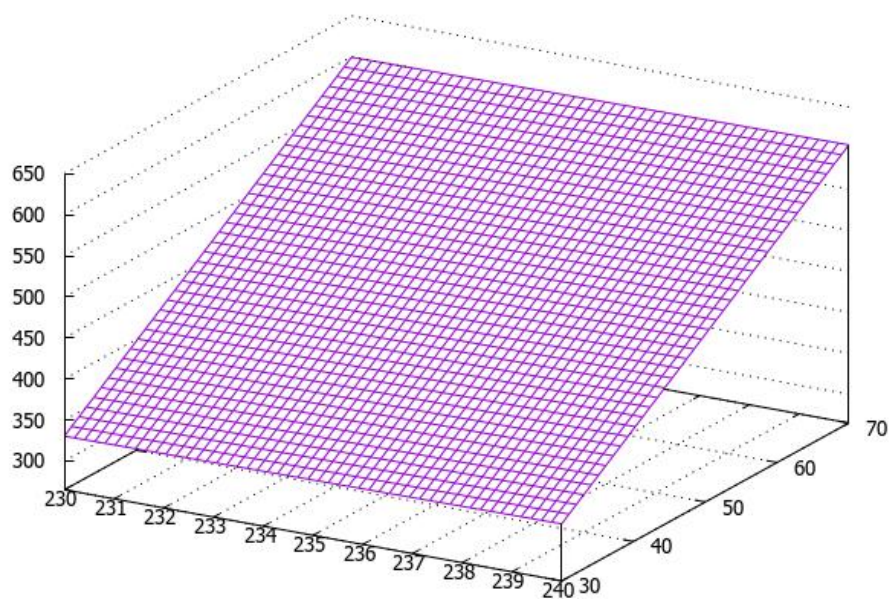


Рисунок 4.2 – Графік для рівняння деталі форми зірка

Графік для деталі коло, за рівнянням: $y = 36,42 + 2,12x_1 + 8,45x_2$, наведено на рисунку 4.3.

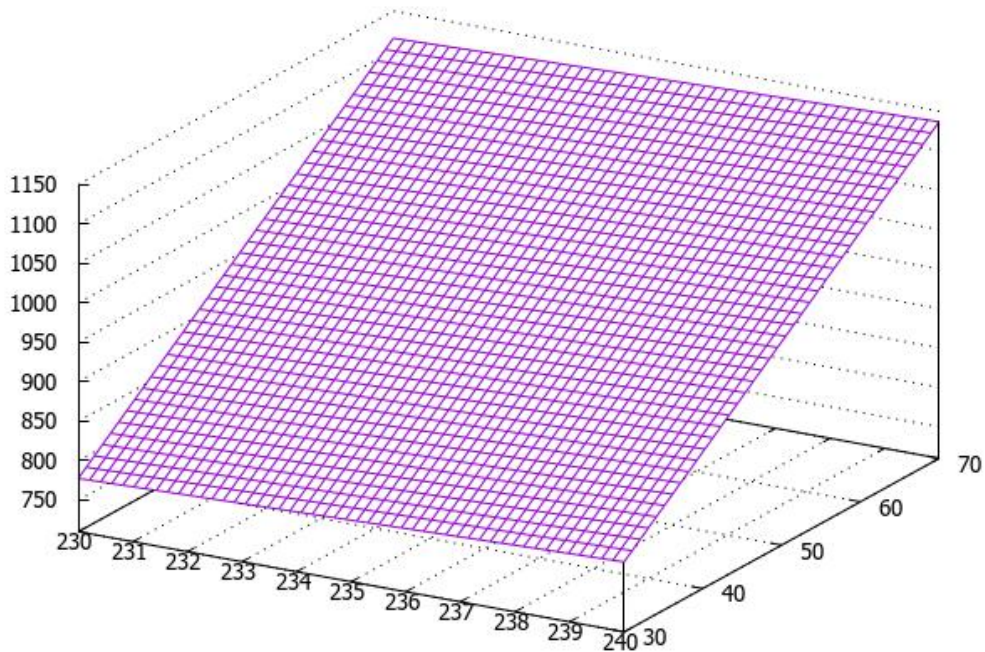


Рисунок 4.3 – Графік для рівняння деталі форми коло

4.2 Висновки з розрахункової частини

З отриманих розрахунків можна зробити висновок, що рівняння добре відображають вплив кожного з факторів на результат. За рівняннями видно, що найбільший позитивний вплив має температура столу, тоді як швидкість друку має найменший та негативний вплив. Також неточність рівнянь можна пояснити наявністю неврахованих факторів, які можуть відрізнятися в залежності від форми друкованої деталі, таких, наприклад, як довжина периметру, наявність гострих кутів тощо.

Для більшої повноти аналізу та досягнення більшої точності потрібно було провести більше замірів з різними комбінаціями факторів.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Освітлення

При проведенні експерименту важливо щоб на робочому місці було гарне освітлення. Освітлення в охороні праці відіграє важливу роль і має значний вплив на безпеку та комфорт працівників [12]. Нижче перераховані деякі аспекти, що підкреслюють важливість належного освітлення в охороні праці:

- безпека: достатнє освітлення допомагає уникнути травм та нещасних випадків на робочому місці. Відсутність належного освітлення може призводити до несправностей, падінь, зіткнень з перешкодами та інших небезпек;

- покращення продуктивності: хороше освітлення сприяє підвищенню продуктивності працівників. Якщо приміщення має достатнє та якісне освітлення, працівники здатні більш точно та швидко виконувати свої обов'язки, зменшуючи ймовірність помилок та втрати часу;

- здоров'я: недостатнє або некоректне освітлення може призводити до стресу, втоми, розладів сну та інших проблем зі здоров'ям. Відповідне освітлення допомагає знизити навантаження на очі, покращує настрій та загальну самопочуття працівників;

- попередження про ризики: якщо на робочому місці належне освітлення, працівники можуть краще спостерігати навколишнє середовище, виявляти потенційні небезпеки, надходити на попередження сигнали та уникати ризикованих ситуацій;

- зменшення помилок та недоліків: правильне освітлення сприяє кращій видимості та розпізнаванню деталей, що допомагає уникнути помилок та допущень у роботі. Це особливо важливо в сферах, де точність та

увага до деталей є критичними, наприклад, в медицині, електроніці, автомобілебудуванні тощо.

Штучне освітлення відіграє важливу роль у забезпеченні безпеки та комфорту працівників на робочому місці. В рамках охорони праці необхідно враховувати наступні аспекти, пов'язані з штучним освітленням [12]:

Вимоги до освітлення:

- забезпечити достатній рівень освітленості на робочому місці з урахуванням характеру роботи, виду використовуваних матеріалів та вимог безпеки;
- використовувати освітлювальні пристрої, які забезпечують рівномірне розподілення світла та уникнення непотрібного блиску;
- забезпечити належну якість світла, щоб забезпечити належне сприйняття кольорів та уникнення спотворень.

Технічні вимоги до освітлювальних пристроїв:

- встановити стабільність освітлення, щоб уникнути мерехтіння та непотрібних коливань яскравості;
- забезпечити належний рівень освітленості під час роботи, а також у зонах відпочинку та проходів;
- використовувати енергоефективні технології та обладнання для зменшення споживання електроенергії.

5.2 Вентиляція

До проведення експерименту входить друк на 3D-принтері, під час якого відбувається розплавлення матеріалу та виділення шкідливих газів, тому важливу роль грає вентиляція робочого місця.

Примусова вентиляція – це система, яка забезпечує постійний потік свіжого повітря в приміщенні та видалення забрудненого повітря. Вона відіграє важливу роль у забезпеченні безпеки та комфорту у робочому середовищі [20]. Примусова вентиляція здатна контролювати рівень

вологості, температури та концентрації шкідливих речовин у повітрі, що сприяє збереженню здоров'я та забезпеченню нормальних умов праці. Система примусової вентиляції включає в себе вентиляційні канали, вентилятори, фільтри та регулятори, які забезпечують оптимальну циркуляцію повітря та його очищення.

Вимоги до примусової вентиляції [13]:

- забезпечити належну подачу свіжого повітря у робочу зону та видалення забрудненого повітря;
- визначити оптимальну частоту та об'єм подачі повітря залежно від виду роботи, кількості працівників та специфіки робочих процесів;
- забезпечити належне розміщення вентиляційних отворів та пристроїв для досягнення рівномірного розподілу повітря та уникнення затяжних зон.

Технічні вимоги до системи примусової вентиляції:

- продуктивність вентиляційної системи: система повинна забезпечувати достатню кількість свіжого повітря в приміщенні відповідно до вимог нормативних документів і враховувати розмір та призначення приміщення;
- ефективність фільтрації: система повинна бути оснащена фільтрами, які здатні утримувати шкідливі частинки, пил, алергени та інші забруднюючі речовини з повітря, що подається до приміщення;
- регулювання параметрів повітря: система повинна мати можливість регулювати температуру та вологість повітря, щоб забезпечити комфортні умови праці;
- безпека: система повинна відповідати нормативним вимогам з питань пожежної безпеки та електробезпеки;
- регулярне обслуговування та технічне обслуговування: система повинна бути періодично перевірена, очищена, налагоджена та обслуговувана для забезпечення її ефективної роботи та тривалого терміну служби.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи був виконаний аналіз технічного завдання, проведено збір інформації, була проведена наукова–дослідна робота, отримані дані детально описані та проаналізовані у наведеному звіті.

Було проведено всебічний аналіз адгезії в 3D-друці, зокрема на конвеєрних 3D-принтерах. Під час аналізу області дослідження визначено основні фактори, що впливають на адгезію, включаючи зміну температури, вибір матеріалів для друку та стан поверхні робочої області.

Попередні дослідження у цій сфері показали, що адгезія залежить не лише від фізико-хімічних властивостей матеріалів, а й від технологічних параметрів друку. Фізичні властивості, такі як змочуваність поверхні, адгезія між твердим тілом і рідиною, термостійкість, зносостійкість, гнучкість і міцність матеріалу, були розглянуті як основні фізичні параметри які формують вимоги до конвеєрної стрічки.

На підставі аналізу попередніх досліджень інших авторів, було проведено власний експеримент, у якому було досліджено залежність сили адгезії від наступних параметрів налаштування принтеру: температура екструдеру, температура столу, швидкість друку та форма деталі.

Результати аналізу попередніх досліджень, дозволили отримати більше розуміння впливу різних факторів на якість адгезії, та підтвердили необхідність детальнішого вивчення параметрів друку.

Факторний аналіз результатів експерименту дозволив побудувати рівняння вагомості факторів та за ними побудувати графіки. Що дозволило наочно показати залежність сили адгезії від кожного із факторів, що допоможе краще розуміти їх вплив та більш продуктивно проводити налаштування принтера.

Також, отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку “Промисловість, інновації та інфраструктура”, а саме п.9.3 “Сприяти прискореному розвитку високо- та середньовисокотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямками: розвиток інноваційної екосистеми; розвиток інформаційно-телекомунікаційних технологій (ІКТ); застосування ІКТ в АПК, енергетиці, транспорті та промисловості; високотехнологічне машинобудування; створення нових матеріалів; розвиток фармацевтичної та біоінженерної галузей”

Дослідження адгезії в конвеєрних 3D-принтерах відповідає цілям сталого розвитку, зокрема підвищенню інновацій у високотехнологічних секторах промисловості. Воно сприяє розвитку інноваційної екосистеми, оскільки дозволяє вдосконалювати 3D-друк та впроваджувати нові матеріали для виготовлення деталей, що важливо для високотехнологічного машинобудування. Також це дослідження має зв'язок з розвитком інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), оскільки може включати автоматизацію процесів та моделювання для підвищення ефективності виробництва.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»/ Упоряд. І.Ш. Невлюдов, Р.В. Артюх, В.В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В.В. Євсєєв, О.І. Филипенко, О.М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. 55 с.

2. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. Київ, 2018. 320 с.

3. ДСТУ 3008–15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015–06–22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.

4. Нікулін О.Д. Розробка конструкції конвеєрного 3D-принтеру: Кваліфікаційна робота (бакалавр) [Текст] / О.Д. Нікулін. — Харківський національний університет радіоелектроніки, Факультет автоматики і комп'ютеризованих технологій, Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки. 2023. 75 с.

5. Лекція_3_Адгезія [Електронний ресурс] // Сайт кафедри хімічної освіти Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. — Режим доступу: https://chemeducation.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/14/2020/02/Лекція_3_Адгезія.pdf.

6. Адгезія на 3D принтері: все, що вам потрібно знати [Електронний ресурс] // Artline.ua. — Режим доступу: <https://artline.ua/uk/blogs/adgeziya-na-3d-printere-vse-chto-vam-nuzhno-znat>.

7. McCarthy, S., Palanchian, Z., Whelan, J. Conveyor Belt 3D Printer: A Major Qualifying Project Report [Текст] / S. McCarthy, Z. Palanchian, J. Whelan. — Submitted to the Faculty of the Worcester Polytechnic Institute. — Submitted to Professor John Sullivan.

8. Hashemi Sanatgar, R., Campagne, C., & Nierstrasz, V. (2017). Investigation of the adhesion properties of direct 3D printing of polymers and nanocomposites on textiles: Effect of FDM printing process parameters. *Textile Materials Technology*. – 2017.13с.

9. Чумак О.І., Бліндер А.Р., Казнадій М.М. Вплив умов друку на якість моделей, отриманих методом фузійного нанесення шарів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Том 29. Випуск 9. С. 84-90.

10. Ковальов, В. І. Планування експерименту в дослідженнях : навч. посіб. / В. І. Ковальов. – Київ : Наукова думка, 2018. – 256 с.

11. Харитонова, Т. А. Факторний аналіз: методологія та застосування : навч. посіб. / Т. А. Харитонова, О. М. Петренко. – Київ : Центр навчальної літератури, 2020. – 320 с.

12. Коломієць О. В., Сидоров М. І., Чередниченко В. Є. "Охорона праці: Навчальний посібник" - Київ: Видавничий дім "Слово", 2016. - 300 с.

13. Методичні вказівки до виконання розділу "Охорона праці" у випускних роботах ОКР "бакалавр" усіх форм навчання / упоряд.: В. А. Айвазов, Т. Є. Стищенко., Н. Л. Березуцька ; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – 28 с. – 1,81.