

## Пояснювальна записка до дипломної роботи магістра

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»


Спеціалізація: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

на тему: «Вдосконалення технології виробництва екструзійнопрофільних полімерних деталей за допомогою 3D-друку»

Шифр: МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група МТВАм -23-1  С.Б. Титаренко

Керівник

 д. філосо. В.О. Дитинюк

До захисту допускаю:

Зав. кафедри ТАМ  Диха О.В.

17 12 2024\_\_ р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень: спеціаліст

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»

Спеціалізація: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Зав.кафедрою

ТАМ

Диха О.В.

" 30 " вересня 2024 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ МАГІСТРАНТУ**

Титаренко Сергій Борисович

1. Тема проекту:

«Вдосконалення технології виробництва складнопрофільних полімерних деталей за допомогою 3D-друку»

керівник проекту: Дитинюк Володимир Олександрович, д. філос.

Затверджено наказом університету від 26.08. 2024р. № 60

2. Строк подання студентом проекту на кафедру: 16.12.2024 р.

3. Вихідні дані до проекту:

- 1) Дані про сучасні технології та матеріали для 3D-друку.
- 2) Огляд кінематики 3D-принтерів та активних термокамер на якість друку.
- 3) Інформація про основні проблеми виготовлення складнопрофільних полімерних деталей.
- 4) Матеріали науково-дослідної практики.
- 5) Результати літературного огляду, патентного пошуку та експериментальних досліджень впливу відпалу на полімерні матеріали.

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

1. Огляд технологій FDM-друку та характеристик полімерних матеріалів.
2. Аналіз впливу параметрів друку на якість та механічні властивості деталей.
3. Дослідження впливу відпалу на зменшення внутрішніх напружень та підвищення міцності полімерних деталей.
4. Огляд технологічного процесу за допомогою армування деталей та ремелтовання у формах із дрібнодисперсними порошковими матеріалами.

## 5. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|---|----------------|------------------|
|        |   | завдання видав | завдання прийняв |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |

6. Дата видачі завдання: 30 вересня 2024р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проекту (роботи)  | Строк виконання етапів проекту (роботи) | Примітка |
|-------|---|---|----------|
| 1     | Огляд технологій FDM-друку та характеристик полімерних матеріалів   | 1.11.2024                               |          |
| 2     | Аналіз впливу параметрів друку на якість та механічні властивості деталей.  | 15.11.2024                              |          |
| 3     | Дослідження впливу відпалу на зменшення внутрішніх напружень та підвищення міцності полімерних деталей.                           | 1.12.2024                               |          |
| 4     | Огляд технологічного процесу за допомогою армування деталей та ремелтовання у формах із дрібнодисперсними порошковими матеріалами | 15.12.2024                              |          |
| 5     | Підготовка публікації   | 15.12.2024                              |          |
| 6     | Оформлення презентаційних матеріалів  | 16.12.2024                              |          |

Студент



Тигаренко С.Б.

Керівник роботи



Дитинюк В.О.

## РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 82 сторінок, кількість рисунків – 29, таблиць – 2, кількість джерел згідно із переліком посилань – 24.

Студент гр. МТВАм-23-1 Титаренко С.Б.

Тема: «Вдосконалення технології виробництва складнопрофільних полімерних деталей за допомогою 3D-друку».

На сучасному етапі розвитку адитивного виробництва технологія 3D-друку дозволяє створювати складнопрофільні полімерні деталі, однак вона має певні обмеження у точності, механічних властивостях та функціональності готових виробів. У цій дипломній роботі досліджено сучасні технології, матеріали та процеси FDM-друку, зокрема вдосконалення методів виготовлення складнопрофільних полімерних деталей.

У роботі вирішені наступні задачі:

1. Проведено огляд сучасних технологій та матеріалів для 3D-друку. Особливу увагу приділено впливу кінематики 3D-принтерів та активних термокамер на якість друку.

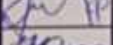

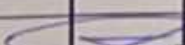

2. Здійснено аналіз основних проблем виготовлення складнопрофільних полімерних деталей, таких як геометричні дефекти, зниження міцності та наявність поверхневих дефектів.

3. Запропоновано нові підходи до вдосконалення процесу, зокрема оптимізацію параметрів друку, використання армування волокнами, застосування методу відпалу та ремелтовання у формах із дрібнодисперсними порошковими матеріалами.

4. Виконано дослідження впливу відпалу на механічні властивості полімерних деталей, що дозволило досягти зменшення внутрішніх напружень, стабілізації розмірів та підвищення міцності деталей.

**Перелік ключових слів:** 3D-друк, FDM-технологія, складнопрофільні деталі, полімерні матеріали, механічні властивості, відпал, армування, кінематика 3D-принтерів, підтримки, адитивне виробництво.

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 6  |
| РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ІСТОРИЧНИХ ВІДОМОСТЕЙ, МАТЕРІАЛІВ ТА РІЗНОВИДІВ КІНЕМАТИКИ FDM-ПРИНТЕРІВ..... | 8  |
| 1.1 Виникнення терміна.....  | 8  |
| 1.2 Історія.....   | 10 |
| 1.3 Матеріали.....   | 17 |
| 1.3.1 ABS.....   | 18 |
| 1.3.2 TPE.....   | 19 |
| 1.3.3 PLA.....   | 20 |
| 1.3.4 HIPS.....  | 20 |
| 1.3.5 PETG.....  | 21 |
| 1.3.6 Нейлон.....  | 21 |
| 1.3.7 Вуглецеве волокно.....   | 22 |
| 1.3.8 ASA.....   | 23 |
| 1.3.9 Полікарбонат.....  | 23 |
| 1.3.10 Поліпропілен.....   | 24 |
| 1.3.11 Волокно з металом.....  | 25 |
| 1.3.12 Волокно з деревиною.....  | 25 |
| 1.3.13 PVA.....  | 26 |
| 1.4 Огляд кінематики 3D-принтері.....  | 28 |
| 1.4.1 Декартова кінематика.....  | 29 |
| 1.4.2 Дельта-принтери.....   | 30 |
| 1.4.3 Полярні 3D-принтери.....   | 32 |
| 1.5 Активні та пасивні термокамери в 3D-друці. ....  | 33 |
| 1.6 Процес друку за FDM технологією.....   | 34 |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....   | 39 |

|           |      |           |   |          |   |                      |      |         |
|-----------|------|-----------|---|----------|---|----------------------|------|---------|
|           |      |           |   |          | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b>   |                      |      |         |
| Змн       | Арк. | № докум.  | Підпис  | Дат      | Вдосконалення технології<br>виробництва<br>складнопрофільних<br>полімерних деталей за<br>допомогою 3D-друку | Літ.                 | Арк. | Акрюшів |
| Розроб.   |      | Титаренко |  |          |   |                      |      |         |
| Перевір.  |      | Дитинюк   |  |          |   |                      | 4    | 81      |
| Реценз.   |      |           |   |          |   | ХНУ група МТВАм 23-1 |      |         |
| Н. Контр. |      | Бабак     |  | 18.12.24 |   |                      |      |         |
| Затверд.  |      | Диха      |  |          |   |                      |      |         |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ І ПЕРСПЕКТИВ ДРУКУ</b>                   |           |
| <b>СКЛАДНО ПРОФІЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ ДЕТАЛЕЙ.....</b>                   | <b>41</b> |
| <b>3.1 Недоліки складнопрофільних полімерних деталей,</b>           |           |
| <b>виготовлених за допомогою 3D-друку.....</b>                      | <b>41</b> |
| <b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....</b>                                   | <b>45</b> |
| <b>РОЗДІЛ 3 ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПОКРАЩЕННЯ ДРУКУ</b>                    |           |
| <b>СКЛАДНО ПРОФІЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ ДЕТАЛЕЙ.....</b>                   | <b>46</b> |
| <b>3.1 Вплив орієнтації, висоти шару та структури заповнення на</b> |           |
| <b>механічні властивості 3D-друкованих деталей.....</b>             | <b>46</b> |
| <b>3.2 Друк підтримок з використанням іншого типу філаменту як</b>  |           |
| <b>елемент покращення складнопрофільних деталей.....</b>            | <b>49</b> |
| <b>3.3 Стратегії армування волокнами.....</b>                       | <b>52</b> |
| <b>3.4 Відпал.....</b>  | <b>57</b> |
| <b>3.4.1 Опис обладнання.....</b>                                   | <b>62</b> |
| <b>3.4.2 Процес дослідження.....</b>                                | <b>63</b> |
| <b>3.4.3 Результати дослідження.....</b>                            | <b>65</b> |
| <b>3.4.4 Висновки дослідження.....</b>                              | <b>71</b> |
| <b>3.5 Відпал в активних термокамерах FDM принтерів.....</b>        | <b>72</b> |
| <b>3.6 Узагальнення теоретичних основ ремелтовання</b>              |           |
| <b>3D-друкованих деталей у формах, заповнених</b>                   |           |
| <b>дрібнодисперсними порошками.....</b>                             | <b>73</b> |
| <b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....</b>                                   | <b>75</b> |
| <b>ВИСНОВКИ.....</b>  | <b>76</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>                              | <b>78</b> |
| <b>ДОДАТКИ.....</b>   | <b>81</b> |

## ВСТУП

Магістерська дипломна робота є завершальним етапом самостійної науково-дослідницької діяльності, що підсумовує засвоєння дисциплін, проходження навчальних і виробничих практик, а також переддипломної підготовки. Вона об'єднує теоретичні знання з обраної тематики та практичні вміння, здобуті під час практичної діяльності.

Сучасний розвиток адитивних технологій сприяє стрімкому зростанню їхнього застосування в різних галузях промисловості.

Особливої уваги заслуговує технологія FDM (Fused Deposition Modeling), яка дозволяє виготовляти складнопрофільні полімерні деталі з високим рівнем точності та гнучкості. Попри значний прогрес у цій галузі, існує низка викликів, які виникають під час друку складних деталей. До таких викликів належать недоліки міцності, низька якість поверхні, а також обмеження, пов'язані з матеріалами та їх властивостями.

Об'єктом дослідження обрано процеси виробництва складнопрофільних полімерних деталей за допомогою FDM-технології.

Предметом дипломної роботи є вдосконалення методів друку для підвищення якості складнопрофільних деталей шляхом аналізу існуючих технологій, дослідження матеріалів та їх властивостей, а також оптимізації процесів друку і постобробки.

Мета дипломної роботи – на основі аналізу проблем і перспектив виробництва складнопрофільних полімерних деталей, розробити рекомендації щодо вдосконалення технології FDM-друку, спрямовані на покращення точності, механічних властивостей та якості поверхні готових виробів.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

- проведення огляду історичних відомостей, які стосуються виникнення і розвитку FDM-технології;
- дослідження властивостей матеріалів, що використовуються для виготовлення складнопрофільних деталей;

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 6    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

- вивчення недоліків процесу друку, зокрема недостатньої міцності та жорсткості виробів, а також проблем, пов'язаних із видаленням підтримок і якістю поверхні;
- розробка рекомендацій щодо оптимізації параметрів друку, таких як орієнтація моделі, висота шару, структура заповнення;
- аналіз використання підтримок із різних матеріалів та їхнього впливу на якість друку;
- оцінка ефективності методів постобробки, включаючи відпал, для покращення властивостей деталей;
- узагальнення результатів дослідження з ремелтовання деталей у формах із дрібнодисперсними порошками.

Актуальність теми дослідження обумовлена зростаючою потребою у вдосконаленні технологій 3D-друку, що дозволяють виробляти деталі з високими вимогами до точності, міцності та якості поверхні. Використання FDM-технології є особливо перспективним у зв'язку з її гнучкістю, доступністю матеріалів і відносно низькою вартістю виробництва. Однак, для забезпечення конкурентоспроможності технології необхідно вирішити низку проблем, пов'язаних із її практичним застосуванням.

У межах цього дослідження основну увагу було приділено впливу технологічних параметрів друку на якість деталей, дослідженню можливостей постобробки, а також вивченню нових підходів до виготовлення складнопрофільних деталей. Робота має практичне значення для підприємств, які займаються адитивними технологіями, та спрямована на підвищення якості і конкурентоспроможності їх продукції.

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 7    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

# РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ІСТОРИЧНИХ ВІДОМОСТЕЙ, МАТЕРІАЛІВ ТА РІЗНОВИДІВ КІНЕМАТИКИ FDM-ПРИНТЕРІВ.

## 1.1 Виникнення терміна

"Адитивне виробництво або 3D-друк - це створення тривимірного об'єкта з моделі САПР або цифрової 3D-моделі" [1]. Термін "3D-друк" належати до процесів, керованих комп'ютером для побудови тривимірної моделі виробу, залежно від технології виробництва матеріал осідає, з'єднується або твердне, матеріал при цьому додають спільно (рідини, зерна порошку, пластмаси, сплавлені разом), шар за шаром. Методи 3D-друку вважали придатними, у 1980-х роках, для створення естетичних або функціональних прототипів, тоді застосовували термін швидке прототипування. Станом на 2020 рік у зв'язку зі збільшенням точності, відтворюваності, діапазону кількості матеріалів для 3D-друку деякі процеси цієї технології вважаються придатними для використання в технологіях промислового виробництва, за підсумком термін адитивне виробництво може застосовуватися як синонім 3D-друку. Однією з головних переваг 3D-друку є можливість створення всіх можливих форм і геометрій, які було б часовитратно і матеріально дорого відтворити вручну, включно з деталями зі складною внутрішньою структурою для зниження маси або порожнистими деталями. Моделювання послідовним наплавленням, або FDM, є найпоширенішим процесом 3D-друку завдяки своїй простоті, що використовується з 2020 року.

Загальний термін "адитивне виробництво" набув популярності у 2000-х, натхненний тематикою об'єднання матеріалів різними способами. Термін "субтрактивне виробництво" є ретронімом для величезного сімейства процесів обробки, під час яких матеріал видаляють із заготівлі. Термін 3D-друк, як і раніше, здебільшого асоціюється тільки з полімерними технологіями, а термін "адитивне виробництво", як і раніше, з більшою ймовірністю використовуватимуть у контексті металообробки та виробництва кінцевих деталей, "аніж серед ентузіастів полімерів, струменевого друку або

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               | 8    |

стереолітографії. Струменевий друк був найменш відомою технологією, хоча він був винайдений у 1950 році і погано вивчений через свою складну природу. Найбільш ранні струменеві принтери використовувалися як записувальні пристрої, а не принтери. Ще в 1970-х роках термін "рекордер" асоціювався зі струменевим друком. Безперервний струменевий друк пізніше перетворився на струменевий друк за запитом або Drop-On-Demand. Спочатку струменеві принтери були одним соплом, а тепер мають тисячі сопел для друку за кожен прохід поверхнею." [1]

На початку 2010-х років терміни адитивне виробництво і 3D-друк стали альтернативними ідентичними термінами для адитивних технологій, один з яких використовувався в засобах масової інформації та спільнотах користувачів, а інший формально застосовувався на промислових підприємствах. "Донедавна термін 3D-друк асоціювався з машинами з низькою ціною або продуктивністю. 3D-друк і адитивне виробництво відображають, що технології поділяють тему додавання або з'єднання матеріалів у всьому тривимірному робочому конверті під автоматичним контролем." [2] Головний редактор відомого журналу з адитивних технологій, Пітер Зелінські, зазначив у 2017 році, що терміни, як і раніше, часто випадково асоціюються у використанні, але частина виробничих експертів намагається зробити відмінність, в якій цей термін охоплює не тільки 3D-друк, а й інші технології або аспекти виробничого процесу.

Терміни, які використовувалися як синоніми або гіпероніми, мали на увазі виробництво настільних комп'ютерів, швидке виробництво, як наступник швидкого прототипування і виробництво за запитом, що перегукується в двомірному розумінні друку за запитом. Таке застосування синонімів на вимогу до наявного виробництва було в новинку у 2000-х роках, розкриваючи переважну психологічну модель довгої індустріальної ери, в якій майже всі виробничі процеси вимагали тривалого часу для виконання копіткої розробки інструменту. Сьогодні термін "механічна обробка" доповнюється терміном "віднімання", і застосовується, коли необхідний термін, що включає будь-який метод видалення. "Гнучкі інструменти - це використання модульних засобів для

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

розроблення інструментів, які виготовляються методами адитивного виробництва або 3D-друку, що дає змогу швидко створювати прототипи та реагувати на потреби в інструментах і пристосуваннях. У гнучкому виробництві використовується економічний і високоякісний метод для швидкого реагування на потреби клієнтів і ринку, і її можна використовувати в гідроформуванні, штампуванні, литті під тиском та інших виробничих процесах." [2]

## **1.2 Історія**

В оповіданні Раймонда Ф. Джонсона "Інструменти торгівлі", опублікованому в листопаді 1950 року в журналі *AstoundingScienceFiction*, було описано процедуру і загальну концепцію 3D-друку, яку використовують і зараз. У його оповіданні ця процедура називалася "молекулярним спреєм". "1971 року Йоганнес Ф. Готвальд запатентував реєстратор рідких металів, US3596285A, пристрій для безперервного струменевого друку з металевого матеріалу для формування знімного металевої конструкції на поверхні багаторазового використання для негайного використання або відновлення для повторного друку шляхом переплавлення." [3] Це "перший патент, що описує 3D-друк зі швидким прототипуванням і контрольованим виробництвом шаблонів за запитом." [4]

Термін "друк", що використовується в патенті, не обмежувався в значенні, але включав написання, формування символів або малюнків за допомогою чорнила. "Чорнило" використовували там не тільки як матеріали, що містять барвники або пігменти, а й будь-які інші композити, речовини, які підходять для формування на поверхні символів, інтелектуальних візерунків, знаків за допомогою маркування. Чорнила типу "Клей-розплав" є найкращими. Діапазон наявних у продажу складів чорнила, які могли б відповідати вимогам винаходу, на цей час невідомий. Відповідно до винаходу задовільний друк був досягнутий використанням як фарби металевого сплаву.

Мета винаходу можливість повторно використовувати матеріали, використані в такому виробництві. І створення пристрою, що дає змогу не тільки

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

наносити малюнки та знаки, а й видаляти їх із поверхні. Тобто, додатковою метою була мінімізація матеріалів зазначеного класу в процесі. Через збільшення розмірів деталей, пропорційно збільшувався розмір площ для друку, що дорого виходило за собівартістю і широке використання процесу обмежувалося.

В 1974 року Девід Е. Х. Джонс виклав концепцію 3D-друку у своїй постійній колонці Ariadne у журналі NewScientist.

В 1980-х роках було розроблено перше обладнання та матеріали для адитивного виробництва.

Хідео Кодама з Нагої у квітні 1980 року працюючи в Міському науково-дослідному інституті промисловості почав застосовувати два "адитивних методу для виробництва тривимірних пластикових моделей з термореактивним полімером, що фототвердіє, в яких область впливу УФ-випромінювання контролюється шаблоном маски або скануючим волоконним передавачем." [1] У журнальних статтях у квітні та листопаді 1981 року було опубліковано його результати досліджень. 10 листопада 1981 р. було опубліковано його патент на плоттер XYZ (JP S56-144478). Плотер не був високо оцінений у лабораторних умовах, ніхто не виявляв до винаходу особливого інтересу, і проект було припинено, оскільки ніхто не набував патентних прав. "Патент US 4323756 "Спосіб виготовлення виробів шляхом послідовного осадження", виданий Raytheon Technologies Corp. 6 квітня 1982 р. з використанням сотень або тисяч "шарів" металевого порошку і джерела лазерної енергії, є раннім посиланням на формування "шарів" і виготовлення виробів на підкладці. 2 липня 1984 року американський підприємець Білл Мастерс подав патент на свій комп'ютерний автоматизований виробничий процес і систему (US 4665492). Ця заявка зареєстрована в USPTO як перший в історії патент на 3D-друк; це був перший із трьох патентів Masters, що поклали початок системам 3D-друку, які використовуються сьогодні." [3]

Олів'є де Вітте, Ален Ле Мехоте, і Жан Клод Андре 16 липня 1984 року подали заявку на патент на процес стереолітографії. Через відсутність ділової перспективи від заявки відмовилися GeneralElectric і CILAS, французькі

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 11   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

компанії. Для розробки кольорового струменевого принтера Роберт Говард 1983 року заснував компанію RH Research, пізніше в лютому 1984 року перейменовану в Howtek Inc. У 1986 році струменевий 2D-принтер Pixelmaster було комерціалізовано, з використанням пластикових термопластичних чорнил. Зібрана команда з 6 осіб від Exxon Office Systems, Danbury Systems Division, стартапу з виробництва струменевих принтерів, і деяких членів групи Howtek, Inc., які стали популярними фігурами в індустрії 3D-друку. Один із членів Howtek, патент Річарда Хелінскі US5136515A, Метод і засоби для створення тривимірних виробів шляхом осадження частинок, заявка 11.07.1989, видана 8.04.1992, сформував компанію CAD-CastInc з Нью-Гемпшира, назву якої пізніше було змінено на Visual Impact Corporation (VIC) 22.08.1991. Прототип 3D-принтера VIC для цієї компанії доступний з відеопрезентацією, що демонструє 3D-модель, надруковану за допомогою струменевого друку з одним соплом. Інший співробітник, Герберт Менхеннетт, 1991 року заснував компанію HM Research у Нью-Гемпширі та презентував HowtekInc, Технологію струменевого друку та термопластичні матеріали - Ройдену Сандерсу з SDI та Біллу Мастерсу з виробництва балістичних частинок (BPM), де він пропрацював кілька років. І в 3D-принтерах BPM, і в 3D-принтерах SPI використовуються струменеві принтери в стилі Howtek, Inc. і матеріали в стилі Howtek, Inc. Ройден Сандерс отримав ліцензію на патент Helinksі до виробництва Modelmaker 6 Pro у компанії Sandersprototype, Inc (SPI) 1993 року. Джеймс К. МакМахон, який був найнятий Howtek, Inc. для допомоги в розробці струменевого друку, пізніше працював у SandersPrototype і тепер управляє Layer Grown Model Technology, постачальник 3D-послуг, який спеціалізується на струменевому друці з одним соплом Howtek і підтримці SDI-принтерів. Зі Стівеном Золтаном, винахідником струменевого друку 1972 року працював Джеймс К. МакМахон, в Exxon і має патент від 1978 року, який розширив розуміння струменевих принтерів з одним соплом і допоміг удосконалити термоплавкі струменеві принтери Howtek, Inc. "Ця технологія Howtek популярна під час лиття металів за виплавленими моделями, особливо в ювелірній індустрії з 3D-друком. Першим замовником

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 12   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

Modelmaker 6 Pro Сандерса (SDI) була компанія Hitchner Corporation, Metal Casting Technology, Inc у Мілфорді, штат Нью-Гемпшир, за милю від підприємства SDI наприкінці 1993-1995 років, що розливало ключки для гольфу і деталі автомобільних двигунів.

"8 серпня 1984 р. було подано патент US4575330, переуступлений UVP, Inc., пізніше переуступлений Чаку Галлу з 3D Systems Corporation, його власний патент на систему виготовлення стереолітографії, в якій окремі пластинки чи шари нарощують шляхом затвердіння фотополімерів із падаючим випромінюванням, бомбардуванням частинками, хімічною реакцією або просто лазерами в ультрафіолетовому світлі. Халлдал визначення цьому процесу: "система для створення тривимірних об'єктів шляхом створення поперечного перерізу об'єкта, який має бути сформований". Внесок Галла був у формат файлу STL (стереолітографія), а також стратегії цифрового нарізування та заповнення, спільні для багатьох сучасних процесів. У 1986 році Чарльз "Чак" Галл отримав патент на цю систему, і була створена його компанія, 3D Systems Corporation, яка випустила перший комерційний 3D-принтер SLA-1. Пізніше, в 1987 або 1988 році." [5]

"Технологія, яка використовується тепер у більшості 3D-принтерів, особливо в моделях, орієнтованих на аматорів та орієнтованих на споживача, - це моделювання методом наплавлення, спеціальне застосування екструзії пластику, розроблене в 1988 році С. Скоттом Крапом та комерціалізоване його компанією Stratasys, яка випустила на ринок свою першу FDM-машину 1992 року.

Володіння 3D-принтером у 1980-х роках коштувало понад 300 тисяч доларів. Якщо врахувати інфляцію станом на 2016 рік, то ціна становитиме 650 тисяч доларів. Згодом ця ціна впала через побажання споживачів і виробництво більшої кількості принтерів, а також інновацій у продукті." [5]

"Аддитивний процес для спікання або наплавлення металів (як-от селективне лазерне спікання, пряме лазерне спікання металу та селективне лазерне наплавлення) у 1980-х і 1990-х роках зазвичай носили власні назви. У

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 13   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

той час уся обробка металів здійснювалася процесами, які зараз називаються неадитивними (лиття, виготовлення, штампування і механічне оброблення); не дивлячись на великий відсоток автоматизації цих процесів (наприклад, за допомогою роботизованого зварювання і ЧПК), ідея створення інструменту або головки, що рухаються через тривимірну робочу оболонку, перетворює масу сировини, надаючи бажаної форми за допомогою траєкторії інструменту, було пов'язано насамперед через трудомісткість видалення металу в металообробці (а не додавали його), такими як фрезерування з ЧПК, електроерозійний верстат із ЧПК і багато інших. Але через автоматизацію методів додавання металу, які пізніше назвуть адитивним виробництвом, ставили під сумнів це припущення. До середини 1990-х років у Стенфорді та Університеті Карнегі-Меллона було розроблено інноваційні методи осадження матеріалів, що включають мікролиття і напилення матеріалів. Основні та допоміжні матеріали також стали більш поширеними, що дало змогу створювати об'єкти складнішої геометрії."

"Термін 3D-друк спочатку належати до процесу порошкового шару з використанням стандартних і нестандартних струменевих друкувальних головок, розроблений у Массачусетському технологічному інституті Емануелем Саксом 1993 року і комерціалізований SoligenTechnologies, ExtrudeHoneCorporation і Z Corporation.

У 1993 році також було засновано компанію з виробництва струменевих 3D-принтерів, яка спочатку називалася SandersPrototype, Inc, а потім змінила назву на Solidscape, що презентувала технологію високоточних систем виготовлення струменевих полімерів із розчинними опорними структурами." [6]

Товариство Фраунгофера в 1995 винайшли процес селективної плавки за допомогою лазера.

В 2009 році закінчився термін дії патентів на процес друку модельованим наплавленням (FDM).

"У міру розвитку різних адитивних технологій стало зрозуміло, що видалення металу перестане бути єдиним можливим процесом металообробки, який виконують за допомогою інструменту або голівки, що рухаються через

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 14   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

тривимірну робочу область, перетворюючи масу сировини в бажану форму шар за шаром. 2010-ті роки були першим десятиліттям, у якому металеві деталі кінцевого використання, як-от кронштейни двигуна та великі гайки, відтворюватимуться (або до, або замість механічного оброблення) у процесі виробництва, а не обов'язково оброблятимуться з пруткового матеріалу або листа. Лиття, виготовлення, штампування і механічна обробка, як і раніше, більш поширені, ніж адитивне виробництво в металообробці, але тепер адитивний процес починає робити значні успіхи, і з перевагами дизайну для адитивного виробництва інженерам зрозуміло, що багато чого ще попереду." [6]

Адитивний процес помітно розширює сферу свого впливу в авіаційній промисловості. У 2016 році авіапасажирів було майже 3,8 мільярда осіб. Тому дуже високий попит на економічні та легко вироблювані реактивні двигуни. Великі OEM-виробники оригінального обладнання, звертаються до адитивних процесів. Це дає змогу знизити витрати, зменшуючи кількість деталей, знаходячи нові ергономічні, складні форми, зменшуючи масу двигунів для підвищення паливної ефективності та знаходячи нові рішення, які були б неможливими за застарілих методів виробництва. У 2016 році Airbus поставив перший двигун GE LEAP - це один із прикладів інтеграції з аерокосмічною галуззю. Надруковані на 3D-принтері, паливні форсунки вбудовані в двигун, що дає змогу зменшити вагу на 25%, скоротити кількість деталей з 20 до 1 і скоротити час складання. Для адитивного виробництва паливне сопло ідеально підходить в реактивному двигуні, воно являє собою деталь, що не обертається, з низьким навантаженням, що дає змогу оптимізувати конструкцію складного внутрішнього пристрою. В

2015 року було надруковано статори компресора і кронштейни синхронізуючих кілець, щоб впровадити вперше цю нову технологію виробництва, такий вибір був обумовлений деталями, що не обертаються, з низькою напругою. Хоча в процесі виробництва реактивних двигунів, друк все ще відіграє невелику роль у загальній кількості деталей, окупність інвестицій, зі

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 15   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

скорочення кількості деталей, вже помітна, через швидкі виробничі можливості та оптимізацію конструкції з погляду вартості та продуктивності.

"У міру розвитку технологій кілька авторів почали припускати, що 3D-друк може сприяти сталому розвитку в країнах, що розвиваються.

В 2012 році Filabot розробила систему закриття петлі за допомогою пластику, яка дає змогу будь-якому 3D-принтеру FDM або FFF друкувати з ширшим спектром пластмас." [2]

"У 2014 році Бенджамін С. Кук і Манос М. Тенцеріс демонструють першу багато матеріальну вертикально інтегровану платформу адитивного виробництва друкованої електроніки (VIPRE), що дала змогу 3D-друкувати функціональну електроніку, що працює на частотах до 40 ГГц." [3]

Ціна принтерів у 2014 році була все ще високою, але любителям це дало змогу займатися друком поза промисловими і виробничими методами. Люди отримали більше свободи і доступу через падіння ціни на принтери.

"Термін "3D-друк" спочатку належати до процесу, при якому сполучний матеріал наноситься на шар порошку за допомогою головок струменевих принтерів шар за шаром. Зовсім недавно цей термін почав охоплювати ширший спектр методів адитивного виробництва, таких як адитивне виробництво електронним променем і селективне лазерне плавлення. В американських і світових технічних стандартах використовується офіційний термін "адитивне провадження" в цьому ширшому сенсі." [2]

У 46% процесу 3D-друку використовують метод екструзії матеріалу, званий моделюванням наплавленого осадження або FDM. Після двох інших найпопулярніших технологій, стереолітографії (SLA) і селективного лазерного спікання (SLS), було винайдено технологію FDM. Популярність процесу зумовлена тим, що є найдешевшим із трьох.

Менш ніж за 200 доларів США, у 2024 році можна знайти принтери гідної якості для більшості людей, що дасть їм змогу увійти у світ 3D-друку. Ці машини для новачків мають оптимальну ціну і якість.

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 16   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

### 1.3 Матеріали

3D-друк традиційно орієнтується на полімери через простоту виробництва і поводження під час друку з полімерними матеріалами. Цей метод дає змогу використовувати полімери з додаванням металу, кераміки, деревини, роблячи 3D-друк універсальним варіантом для виробів. "Пошарове створення тривимірних фізичних моделей - це сучасна концепція, яка "впливає з індустрії САПР, що постійно зростає, зокрема, з області твердотільного моделювання в САПР. До того, як твердотільне моделювання було запроваджено наприкінці 1980-х років, тривимірні моделі були створені з використанням дротяних каркасів і поверхонь". Але у всіх випадках шари матеріалів контролюються принтером і властивостями матеріалу. Тривимірний шар матеріалу контролюється швидкістю осадження, встановленою оператором принтера збереженої в комп'ютерному файлі. Першим запатентованим матеріалом для друку було чорнило гарячого розплаву для друку малюнків з використанням нагрітого металевого сплаву." [16]

У 1980-х роках у галузі швидкого прототипування використовували смоли, пластикову нитку, пластмасовий порошок і термоплавкі пластмасові чорнила. Смола, що піддається обробці ультрафіолетовим випромінюванням, стає твердою і придатною для маскованих ламп, була також представлена Іссаком Померанцем.

FDM-принтери, основним завданням яких є друк термопластиками, які поставляються у вигляді тонких ниток, намотаних на котушки. Асортимент "чистих" пластиків досить великий. Одним із найбільш використовуваних матеріалів є полілактид, або "PLA-пластик". Цей матеріал виробляється з біорозкладних матеріалів, кукурудзи або цукрової тростини, що зумовлює його не токсичність і екологічність, але робить його відносно недовговічним. АБС-пластик, навпаки, більш довговічний і зносостійкий, але сприйнятливий до прямого сонячного світла і може виділяти невеликі обсяги шкідливих випарів під час нагрівання. З цього матеріалу промисловим способом виробляють багато

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 17   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

пластмасових виробів, якими ми користуємося на повсякденній основі, до їх числа входять: корпуси побутових пристроїв, сантехніка, пластикові картки, іграшки тощо.

Крім ABS і PLA можливий друк полікарбонатом, нейлоном, поліетиленом та іншими термопластиками, широко поширеними в сучасній промисловості. Можливе застосування більш рідкісних матеріалів - PVA-пластик або полівініловий спирт. Цей матеріал добре розчиняється у воді, що дає змогу друкувати моделі складної геометричної форми і робить його вельми корисним.

Такий друк не обмежується однорідними пластиками. Застосовуються композитні матеріали, що містять вкраплення деревини, каменю або металу. Такі матеріали ті ж термопластики, але імітують структуру іншого непластичного матеріалу. Вкраплення натурального деревного пилу дає змогу друкувати "дерев'яні" моделі.

Матеріал, що називається BronzeFill, має у своїй структурі справжню бронзу, це дає змогу легко піддавати механічній обробці модель, і досить точно обробляти виріб.

Але не варто забувати - основний сполучний елемент у композитних матеріалах - це термопластик. Що і визначає термостійкість, міцність та інші хімічні й фізичні характеристики готових деталей і моделей.

### **1.3.1 ABS**

ABS - недорогий матеріал, що чудово підходить для друку міцних і довговічних деталей, які можуть витримувати високі температури. ABS (акрилонітрилбутадієнстирол) має довгу історію у світі 3D-друку. Цей матеріал був одним із перших пластиків, які використовувалися в промислових 3D-принтерах. Через багато років ABS, як і раніше, залишається дуже популярним матеріалом завдяки його низькій вартості та хорошим механічним властивостям. ABS відомий своєю міцністю і ударостійкістю, що дає змогу друкувати міцні деталі, які витримують довгострокове використання і знос. ABS також має більш

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 18   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

високу температуру затвердіння, що означає, що матеріал може витримувати набагато вищі температури, перш ніж він почне деформуватися. Це робить ABS відмінним вибором для використання поза приміщеннями або за високих температур. Переваги ABS пластику в дешевизні, хорошій ударостійкості та зносостійкості, слабо просочується і розтягується, надає моделям більш гладку поверхню, хороша термостійкість. Недоліки: сильна деформація, потрібен стіл, що підігрівається, або камера, що обігрівається, видає різкий запах під час друку, деталі мають тенденцію до усадки, що призводить до неточності розмірів. Температура столу, що підігрівається, - 95-110 °C, екструдера - 220-250 °C

### **1.3.2 TPE**

Гнучкі нитки, зазвичай звані TPE або TPU, відомі своєю еластичністю, що дає змогу матеріалу легко розтягуватися і згинатися. Гнучкі нитки виготовляються з термопластичних еластомерів (TPE), які являють собою суміш твердого пластику і гуми. Як впливає з назви, цей матеріал є еластичним за своєю природою, що надає можливість легко розтягувати і згинати пластик. Існує кілька типів TPE, при цьому термопластичний поліуретан (TPU) є найбільш часто використовуваним для виробництва ниток для 3D-друку. Дуже часто ці терміни використовуються як синоніми популярним торговим маркам. Від типу TPE і хімічного складу ступінь еластичності пластику залежить може змінюватися. Деякі волокна можуть бути як автомобільна шина, частково гнучкими, але інші можуть бути еластичними і повністю гнучкими, як гумка. Переваги: Гнучкий і м'який, відмінне гасіння вібрації, тривалий термін зберігання, хороша ударостійкість. Недоліки: складність у друці, погані сполучні з'єднувальні властивості. Характеристики, можливі "плями" та наплавлення. Потрібен стіл, що підігрівається, з температурою - 45-60 °C, екструдер - 225-245 °C

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 19   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

### **1.3.3 PLA**

PLA є популярним матеріалом для більшості користувачів через його простоту використання, точність виконання деталі та низьку вартість. Полімолочна кислота, широко відома як PLA, є одним із найпопулярніших матеріалів, що використовуються в настільному 3D-друку. Це стандартна нитка, яку обирають для більшості 3D-принтерів на основі екструзії, оскільки її можна друкувати при низькій температурі і не потрібен шар, що підігрівається. PLA - чудовий перший матеріал для використання, тому що його легко друкувати, він дуже недорогий і дає змогу створювати деталі, які можна використовувати для найрізноманітніших цілей. Це також одне з найбільш екологічно чистих волокон на ринку. PLA, отримують з таких культур, як кукурудза і цукрова тростина, він є поновлюваним і, що найважливіше, біорозкладним. Як бонус це також дає змогу пластику видавати солодкий аромат під час друку. Переваги: дешевий, жорсткий і має гарну міцність, хороша точність деталей, хороший термін зберігання. Недоліки: низька термостійкість, може сочитися і можуть потрібні охолоджувальні вентилятори, нитка може стати крихкою і зламатися, не підходить для використання на відкритому повітрі (вплив сонячних променів). Потрібен гарячий стіл із температурою 45-60 °C, екструдер - 190-220 °C.

### **1.3.4 HIPS**

HIPS є легким матеріалом, який найчастіше використовується як розчинна структура підтримки для моделей ABS. HIPS, або ударостійкий полістирол, є розчинним підтримувальним матеріалом, який зазвичай використовується з ABS. При використанні в якості підтримуючого матеріалу HIPS можна розчинити в d-лімонені, залишивши на відбитку немає ніяких слідів, викликаних видаленням підкладки. HIPS має багато з тих самих властивостей друку, що й ABS, що робить його логічним партнером з подвійної екструзії. HIPS не тільки чудово підходить для підтримки ваших відбитків з ABS, а й більш стабільний за розмірами і трохи легший, ніж ABS, що робить його чудовим вибором для деталей, які швидко зношуються. Переваги: дешевий,

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 20   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

ударостійкий і водостійкий, легкий, розчиняється D-лімоненом. Недоліки: потрібен стіл з підігрівом (100-115° C), рекомендується камера з підігрівом, висока температура друку (230-245°C.), потрібна вентиляція.

### **1.3.5 PETG**

Волокна PET і PETG відомі своєю простотою друку, гладкістю поверхні та водостійкістю. PETG являє собою модифіковану гліколем версію поліетилентерефталату (PET), яка зазвичай використовується для виробництва пляшок для води. Це напівтвердий матеріал з хорошою ударостійкістю, але у нього трохи м'якша поверхня, що робить його схильним до зношування. Матеріал також має чудові теплові характеристики, що дає змогу пластику ефективно охолоджуватися з майже незначним викривленням. На ринку існує кілька різновидів цього матеріалу, включно з PETG, PETE і PETT. Поради в цій статті застосовні до всіх цих ниток на основі PET. Переваги: глянцева і гладка поверхня, добре прилягає до столу з незначним викривленням, в основному без запаху під час друку. Недоліки: погані сполучні характеристики, може утворювати тонкі волоски на поверхні через нанизання. Потрібен гарячий стіл з температурою: 75-90 °C, екструдера - 230-250 °C.

### **1.3.6 Нейлон**

Нейлон - це міцний і напівеластичний матеріал, що має високу стійкість до ударів і стирання. Це ідеальний вибір для друку міцних деталей. Нейлон (він же поліамід) - популярний матеріал у індустрії пластмас, відомий своєю міцністю та гнучкістю. Нейлонові нитки зазвичай вимагають температури екструдера близько 250 °C, проте деякі бренди дозволяють друкувати за температури до 220 °C через їхній хімічний склад. Багато принтерів не містять екструдер, який може безпечно нагріватися до 250 °C, тому ці низькотемпературні версії можуть бути корисними і потенційно позбавлять вас від необхідності оновлювати ваш екструдер. Одна з великих проблем з нейлоновими нитками полягає в тому, що вони гігроскопічні, що означає, що

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               | 21   |

вони легко вбирають вологу з навколишнього середовища. Друк на нейлоні після того, як він ввібрав вологу, призведе до кількох проблем з якістю друку, тому зберігання нитки стає дуже важливим і вимагає особливої уваги. Переваги: жорсткий і частково гнучкий, висока ударостійкість, відсутність неприємного запаху під час друку, хороша стійкість до стирання. Недоліки: схильний до деформації, герметичне зберігання, необхідне для запобігання водопоглинання, неправильно висушені волокна можуть викликати дефекти друку, не підходить для вологих середовищ. Потрібен стіл з температурою: 70-90°C, екструдера 225-265°C.

### ***1.3.7 Вуглецеве волокно***

Нитки з вуглецевого волокна містять короткі волокна, які вліті в базовий матеріал PLA або ABS, щоб підвищити міцність і жорсткість. Нитки з вуглецевого волокна використовують крихітні волокна, які вливаються в основний матеріал для поліпшення властивостей цього матеріалу. Можна купити кілька популярних ниток із наповнювачем із вуглецевого волокна, включно з PLA, PETG, нейлоном, ABS і полікарбонатом. Ці волокна надзвичайно міцні, що збільшує міцність і жорсткість нитки. Це також означає, що деталі, надруковані на 3D-принтері, будуть набагато легшими і стабільнішими за розмірами, оскільки волокна допоможуть запобігти усадці деталі під час охолодження. Налаштування друку, як-от температура друку, швидкість, адгезія до шару і швидкість екструзії, будуть дуже схожими на звичайні налаштування, що використовуються для основного матеріалу, до якого було додано волокна. Однак через додані волокна ці спеціальні матеріали з більшою ймовірністю засмітять екструдер і можуть потребувати спеціального обладнання, щоб уникнути пошкодження принтера. Переваги: підвищена міцність і жорсткість, дуже добре зберігає розміри, легкий. Недоліки: абразивний і вимагає сопла із загартованої сталі, підвищене просочування під час друку, підвищена крихкість нитки, вища схильність до засмічення. Потрібен стіл із температурою: 45-60°C, температура екструдера: 200-230°C

|      |      |          |        |      |                                      |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b><i>MPTAM 24. 23654.000 ПЗ</i></b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                      | 22   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                      |      |

### **1.3.8 ASA**

ASA є поширеною альтернативою ABS і чудово підходить для зовнішнього застосування завдяки його високій стійкості до ультрафіолетового випромінювання, температури та ударів. ASA, також відомий як акриловий стиролакрилонітрил, є пластиком, придатним для 3D-друку, з властивостями, аналогічними ABS. Спочатку його розробили як альтернативу ABS, який був би більш стійким до ультрафіолетового випромінювання завдяки зміні типу гуми, використовуваної в рецептурі. ASA відомий своєю високою ударостійкістю, вищою термостійкістю і підвищеною складністю друку. Він зазвичай використовується на відкритому повітрі замість ABS через його чудову стійкість до ультрафіолетового випромінювання і суворих погодних умов. Через свою спадщину ASA, як і раніше, зберігає багато з тих самих недоліків друкованих матеріалів, які спостерігаються у ABS. Деформація, як і раніше, є постійною проблемою, яку необхідно враховувати, а також потенційно небезпечними випарами, які виділяє пластик під час друку через присутність стиролу. Переваги: висока стійкість до ультрафіолетового випромінювання, висока ударостійкість і зносостійкість, висока термостійкість. Недоліки: дорогий, потрібна вища температура екструдера 220-245°C, потрібна вентиляція через потенційно небезпечні пари. Температура гарячого столу 90-110 °C.

### **1.3.9 Полікарбонат**

Полікарбонат відомий своєю міцністю і довговічністю. Він має дуже високу термостійкість і ударостійкість, що робить його ідеальним вибором для важких умов експлуатації. Полікарбонат (ПК)

- це високоміцний матеріал, призначений для важких умов експлуатації та інженерних застосувань. Він має надзвичайно високу температуру плавлення та ударостійкість. Полікарбонат також має високу температуру склування - 150° за Цельсієм. Це означає, що він зберігатиме свою структурну цілісність до цієї температури, що робить його придатним для використання у

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 23   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

високотемпературних додатках. Його також можна зігнути без руйнування, і він часто використовується в додатках, де потрібна невелика гнучкість.

Більшість доступних полікарбонатних ниток містять добавки, які дають змогу друкувати нитки за нижчих температур. Полікарбонат надзвичайно гігроскопічний, що означає, що він вбирає вологу з повітря, що впливає на його характеристики друку і міцність. Після розкриття упаковки слід зберігати в герметичних, сухих контейнерах. Він також вимагає дуже високих температур для друку і буде демонструвати поділ шарів під час друку при занадто низькій температурі або при ввімкненому надмірному охолодженні. Полікарбонат часто найкраще друкувати на машині, яка має закритий робочий об'єм і здатна витримувати високі температури шару та екструдера. Переваги: ударостійкий, висока термостійкість, природно прозорий, пружний. Недоліки: потрібна дуже висока температура друку, схильний до викривлення, висока схильність до просочування під час друку, поглинає вологу з повітря, яка може викликати дефекти друку. Температура екструдера під час друку 260-310 °С, столу 80-120 °С

### ***1.3.10 Поліпропілен***

Поліпропілен чудово підходить для багатоциклових застосувань із низькою міцністю через його втомну міцність, напівеластичність і легкість. Поліпропілен - це напівтвердий і легкий матеріал, який зазвичай використовують під час зберігання та пакування. Напівкристалічна структура матеріалу призводить до того, що 3D-друковані деталі сильно деформуються під час охолодження, що ускладнює 3D-друк. Поліпропілен міцний і має гарну стійкість до втоми, що робить його ідеальним для застосувань із низькою міцністю, як-от живі петлі, ремені, повідці тощо. Деякі виробники навіть створили суміші поліпропілену, які мають підвищену міцність, що робить його придатним для практичного використання. Переваги: хороша стійкість до ударів і втоми, хороша термостійкість, гладка поверхня. Недоліки: сильна деформація,

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 24   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

низька витривалість, важко прилипає до поверхонь, клею, дорогий. Необхідна температура столу під час друку: 85-100°C, екструдера - 220-250°C.

### ***1.3.11 Волокно з металом***

Нитки з металевим наповненням виготовляються шляхом змішування дрібного металевого порошку з основним матеріалом, що забезпечує унікальне металеве оздоблення і додаткову вагу.

Нитки з металевим наповненням містять дуже дрібний металевий порошок, такий як мідь, бронза, латунь і нержавіюча сталь. Відсоток металевого порошку, що вводиться в кожну нитку, може варіюватися залежно від виробника. Наявність цього металевого порошку робить нитку набагато важчою, ніж стандартний пластик. Це означає, що деталі, надруковані з PLA з металевим наповнювачем, важитимуть значно більше, ніж деталі зі стандартного PLA, попри використання тих самих налаштувань і споживання тієї самої кількості матеріалу. Нитки з металевим наповненням також мають тенденцію бути дуже абразивними, оскільки вони видавлюються через хотенд. Стандартна латунна насадка буде занадто м'якою і швидко зношується. Для ефективного друку потрібно використовувати зносостійке сопло. На ринку є й інші металоподібні нитки, які можуть просто мати металеве забарвлення, додане до нитки. Ці нитки не містять реального металевого порошку, тому вони не володіють багатьма з тих самих переваг, що й справжні металеві нитки. Переваги: естетичний металічний блиск, не потребує високотемпературного екструдера, важчий за стандартні нитки. Недоліки: потрібна зносостійка насадка, надруковані деталі дуже тендітні, дуже погані зв'язки і звиси, з часом може викликати часткове засмічення, дорогий. Потрібен стіл із підігрівом температура: 45-60°C, температура екструдера - 190-220°C.

### ***1.3.12 Волокно з деревиною***

Деревні волокна поєднують у собі базовий матеріал PLA зі стружкою, деревним пилом або іншими похідними, що надає моделям зовнішнього вигляду

|      |      |          |        |      |                                      |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b><i>MPTAM 24. 23654.000 ПЗ</i></b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                      | 25   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                      |      |

і відчуття справжнього дерева. Нитки на основі деревини зазвичай являють собою композит, який об'єднує основний матеріал PLA з деревним пилом, пробкою та іншими порошкоподібними похідними деревини. Зазвичай волокно складається приблизно на 30% з деревних частинок, але точна кількість може варіюватися залежно від марки. Наявність цих частинок надає деталям, надрукованим на 3D-принтері, естетику натурального дерева. Ця нитка також менш абразивна порівняно з іншими композитними нитками, такими як вуглецеве волокно і металеве волокно, оскільки частинки деревини набагато м'якші. На ринку є деякі деревні волокна, які містять тільки деревне забарвлення, але не містять реальних деревних частинок, тому вони зазвичай мають зовсім інший вигляд і відчуття. Переваги: естетична привабливість оздоблення під дерево, не потребує дорогих зносостійких форсунок, ароматний і приємний запах. Недоліки: схильний до стягування, форсунки меншого розміру можуть з часом частково засмітитися, може знадобитися сопло більшого розміру. Потрібен стіл з температурою: 45-60 °C, екструдер з температурою: 190-220 °C.

### ***1.3.13 PVA***

PVA (за міжнародною класифікацією) широко відомий своєю здатністю розчинятися у воді та часто використовується як матеріал підкладки для складних відбитків. ПВС або полівініловий спирт - це м'який і біорозкладний полімер, який дуже чутливий до вологи. Під час контакту з водою ПВС розчиняється, що робить його дуже корисним як опорну конструкцію матеріалом для 3D-друку. Під час друку дуже складних форм або форм з частково закритими порожнинами можна використовувати підкладки з ПВС, які легко видаляються шляхом розчинення в теплій воді. Стандартні опори, можливо, було важко роздрукувати або видалити в таких ситуаціях. ПВА також можна використовувати як модельний матеріал, якщо є необхідність виготовлення швидких прототипів. Переваги: відмінно розчинний у воді підтримувальний матеріал, ніяких спеціальних розчинників не потрібно, ніякого додаткового обладнання не потрібно. Недоліки: чутливий до вологи, потрібні герметичні

|             |             |                 |               |             |                                      |      |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------------|------|
|             |             |                 |               |             | <b><i>MPTAM 24. 23654.000 ПЗ</i></b> | Арк. |
|             |             |                 |               |             |                                      | 26   |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                      |      |

контейнери для зберігання, підвищена ймовірність засмічення, якщо форсунка залишається гарячою, коли не відбувається видавлювання, дорогий. Температура столу має бути 45-60°C, а екструдера 190-205°C.

|             |             |                 |               |             |                               |      |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------------|------|
|             |             |                 |               |             | <i>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</i> | Арк. |
|             |             |                 |               |             |                               | 27   |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                               |      |

## 1.4 Огляд кінематики 3D-принтерів

Кожен 3D-принтер використовує власну кінематику, яка керує рухом механічних частин: друкованих платформ та екструдерів. У цій статті ми розглянемо чотири типи FDM-принтерів: Декартові, дельта-, полярні та 3D-принтери з роботизованими маніпуляторами.

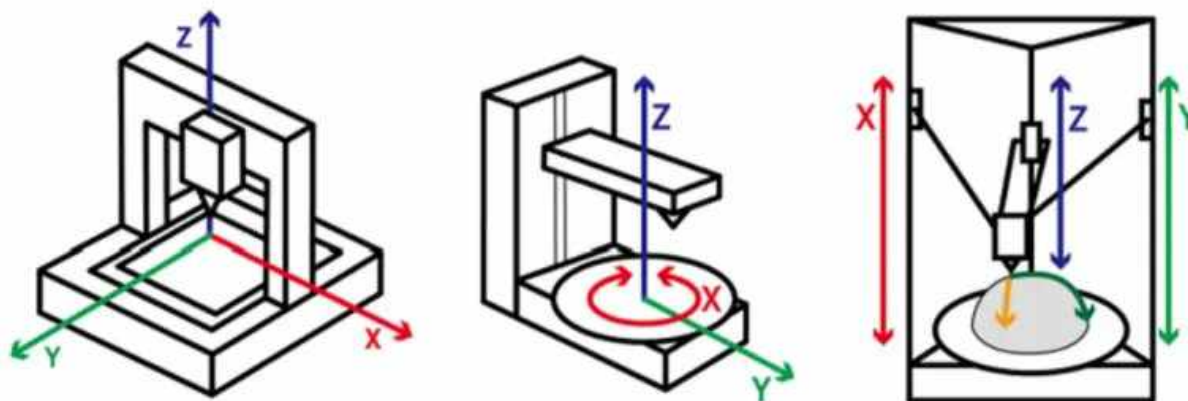


Рисунок 1 - Різновиди кінематики FDM-принтерів

Декартові принтери - найпоширеніші FFF/FDM-принтери на ринку. Технологія використовує три осі - X, Y, Z (декартова система координат) для визначення рухів механічних частин: друкуюча головка і станина рухаються відповідно до координат [7].

Існує обмежена кількість можливих способів переміщення платформи та друкувальної головки:

1. Платформа рухається горизонтально по одній з осей - X або Y, екструдер рухається вертикально по іншій осі .
2. Платформа рухається горизонтально (Z), екструдер рухається двовимірно вздовж осей X-Y.
3. Платформа рухається вертикально і вздовж однієї з горизонтальних осей, екструдер рухається горизонтально.
4. Платформа не рухається, екструдер рухається тривимірно.

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ

Арк.

28

5. Платформа рухається вздовж осей XY, екструдер рухається вертикально.
6. Другий - найпоширеніший - платформа рухається вертикально, а екструдер - у площині XY.

#### ***1.4.1 Декартова кінематика***

Декартові принтери дають одні з найстабільніших результатів серед FDM-пристроїв. Витратні матеріали для FDM дешеві і доступні в різних кольорах і матеріалах. Декартові 3D-принтери часто використовуються в комерційних цілях для друку сувенірів, прикрас та інших виробів на замовлення.

Декартові 3D-принтери популярні і добре зарекомендували себе серед ентузіастів і професіоналів. Існує багато онлайн-спільнот з великою кількістю інформації про їхню конструкцію, принцип роботи та способи побудови[7].

Моделі, надруковані в декартовій системі координат, можна розбирати на частини і використовувати для побудови більших, що дозволяє створювати об'єкти будь-якого розміру, не обмежуючись робочим об'ємом принтера. Багато 3D-принтерів продаються у вигляді наборів. Для новачків і тих, хто не хоче розбиратися зі складанням принтерів, пропонуються вже зібрані пристрої. Вони дозволяють почати друк майже з коробки.

Декартова кінематика CoreXY та H-Vot часто використовується в комерційних цілях. Вони мають нестандартний рух екструдера - він рухається вертикально [8].

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               | 29   |

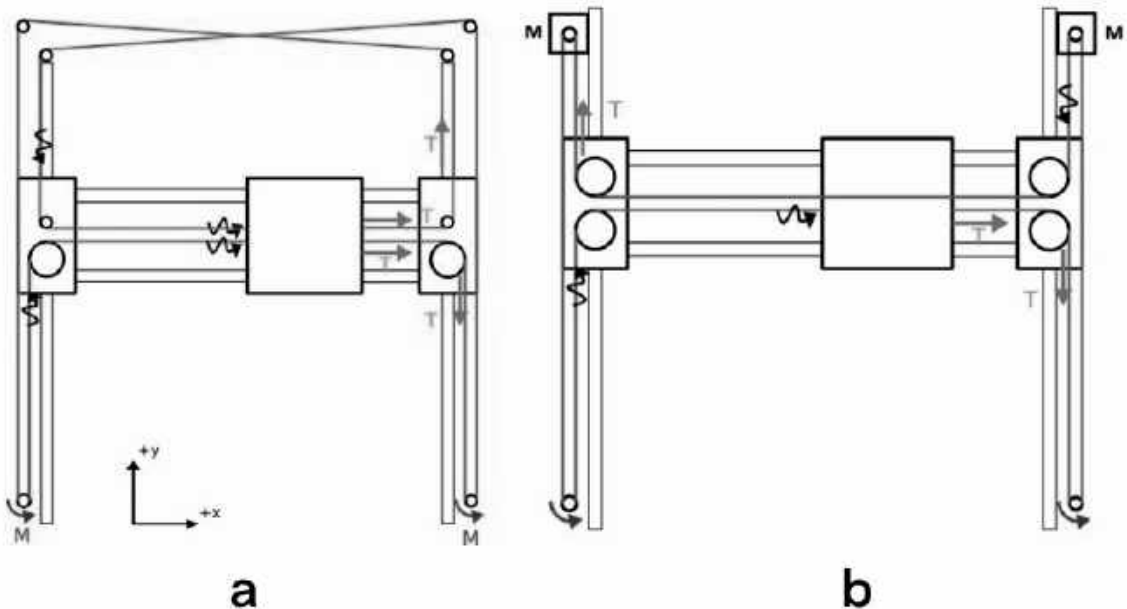


Рисунок 2 - Схеми кінематики H-Bot та CoreXY.

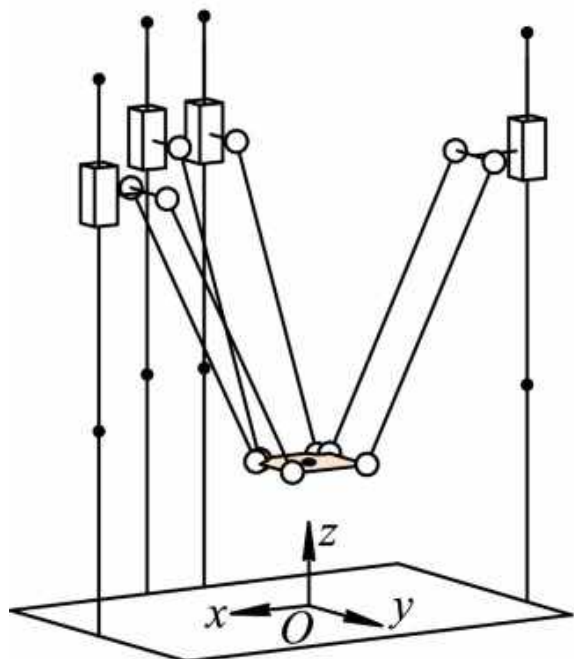
Кінематика CoreXY (рис. 2.a) має два двигуни, які керують двома ременями, що рухають екструдер у площині XY.

Кінематика H-Bot (рис. 2.b) схожа, але використовує іншу систему ремінного приводу. До рами, що має H-подібну форму, кріпиться лише один ремінь, звідси і назва кінематики.

Коли обидва двигуни обертаються в одному напрямку, екструдер рухається вздовж осі X, коли вони обертаються в різних напрямках, екструдер рухається вздовж осі Y. Коли один з двигунів не рухається, екструдер рухається по діагоналі [7, 8].

### 1.4.2 Дельта-принтери

Дельта-принтери відрізняються від декартових як зовні, так і в процесі роботи. Основна відмінність полягає в способі переміщення екструдера стосовно друкарської пластини.



(a)



(b)

Рисунок 3 - Кінематика Дельта-принтера та загальний вигляд

У конструкції DELTA екструдер закріплений на трьох точках, з'єднаних з друкованою основою, яка не рухається. [9]

Щодо переваг та недоліків дельта-принтерів, то порівняно з декартовими принтерами, така кінематика забезпечує вищу швидкість, але меншу точність. Це пов'язано з тим, що рух екструдера вимагає одночасної роботи всіх трьох двигунів, що призводить до помилок у координатному позиціюванні.

Також до переваг можна віднести невеликий розмір, тому що такий принтер високий, але в іншому не вимагає багато місця; відсутність частин, що виступає - може зробити конструкцію більш жорсткою та отримати корпус. А ще можливість друку високих моделей.

Недоліками дельта-принтерів можна вважати вищу ціну;

складність самостійної збірки. Робота з полярними координатами вимагає менш поширеного програмного забезпечення та дорожчих деталей через більшу обчислювальну потужність. [10]

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |



Щодо переваг полярного дизайну можна констатувати наступне, що 3D-принтери з полярним дизайном дозволяють створювати великі об'єкти, займаючи менше місця та будучи енергоефективними. Про те цим машинам бракує точності, але виробник, ймовірно, зможе розв'язати цю проблему в осяжному майбутньому.

Polar 3D - один з таких принтерів. Він не має нагрівального шару, що ускладнює використання акрилонітрил-бутадієн-стиролу (АБС). Принтер невеликий, ефективний, але має низьку точність порівняно з дельта- і декартовими 3D-принтерами. Виробник рекомендує використовувати пристрій в освітніх цілях [11].

### ***1.5 Активні та пасивні термокамери в 3D-друці.***

Активні камери для 3D-друку використовують зовнішні джерела тепла, такі як інфрачервоні нагрівачі, нагрівальні елементи або конвекційні системи, для забезпечення стабільної температури всередині друкарської зони. Такі системи дозволяють друкувати матеріали, які потребують високої температури склування, зокрема ABS, ASA, поліаміди та PEEK.

Принцип роботи активних камер базується на інтеграції нагрівальних елементів, які підтримують рівномірний розподіл температури. Температурні датчики, встановлені всередині камери, забезпечують зворотний зв'язок для точного регулювання нагріву. Завдяки цьому виключаються коливання температури, що зменшує внутрішнє напруження в матеріалі та покращує адгезію шарів [13].

Особливості конвекції в активних камерах залежать від способу організації повітряних потоків. Найефективнішою є система примусової циркуляції повітря, яка рівномірно розподіляє тепло в камері. Такий підхід забезпечує мінімальні температурні градієнти, що особливо важливо для великих друкованих об'єктів [12, 13].

Пасивні камери використовують тепло, генероване нагрівальним столом і екструдером, для підтримки температури. Вони не оснащені додатковими

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 33   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

нагрівальними елементами, тому температура всередині камери залежить від тепловтрат через стінки корпусу та довкілля.

Теплові потоки в пасивних камерах менш стабільні, оскільки немає активної циркуляції повітря. Це може призводити до локальних температурних перепадів, особливо в більших камерах. У таких умовах друк великих деталей із технічних матеріалів, як-от ABS, часто супроводжується викривленнями та розшаруванням шарів [13].

Пасивні камери зазвичай використовують у побутових 3D-принтерах через їхню простоту та низьку енергоспоживаність. Проте їх ефективність знижується при роботі з високотемпературними матеріалами [13].

Порівняння активних та пасивних камер

1. **Термостабільність:** Активні камери забезпечують високу точність контролю температури ( $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ), тоді як пасивні камери можуть мати відхилення до  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  залежно від умов оточення [13].
2. **Енергоспоживання:** Активні камери споживають більше енергії через використання нагрівальних елементів. Пасивні камери є енергоефективнішими, але менш універсальними [13].
3. **Придатність до матеріалів:** Активні камери підходять для друку високотемпературних матеріалів, таких як PEEK або полікарбонат. Пасивні камери краще підходять для PLA або PETG [13].
4. **Конвекція:** В активних камерах використовується примусова циркуляція, що запобігає локальному перегріву або охолодженню. У пасивних камерах відсутня керована циркуляція, що ускладнює рівномірний розподіл тепла [13].

### ***1.6 Процес друку за FDM технологією***

Принцип роботи FDM-принтера полягає у нагріванні філаменту до напіврідкого стану та подальшому його видавлюванню через сопло на платформу або на вже надрукований шар. Термопластичні властивості полімерних

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>MPTAM 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 34   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |



Нижче описані основні параметри процесу FDM-друку. На рисунку 3а продемонстровано орієнтацію побудови, яка визначається положенням деталі відносно осей X, Y і Z на платформі. Товщина шару, показана на рисунку 3b, визначається товщиною матеріалу, нанесеного через сопло. Цей параметр залежить від діаметра сопла та точності принтера. У деяких дослідженнях зазначається, що тонші шари сприяють покращенню якості поверхні та точності розмірів. Рисунок 6.с ілюструє траєкторію руху інструмента FDM-принтера, яка включає кілька ключових параметрів, таких як кут нахилу растра, ширина растра, ширина контуру, кількість контурів тощо[14].

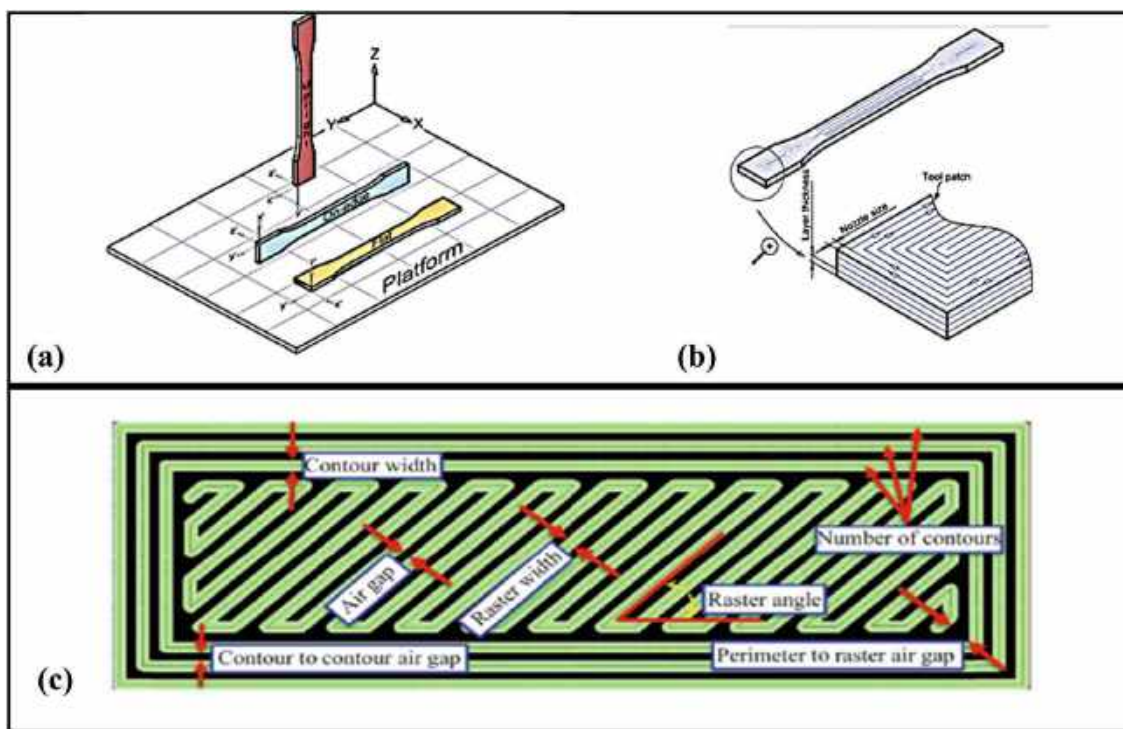


Рисунок 6 - Параметри траєкторії інструменту FDM [14]

Кут нахилу растра — це кут між растровим шаблоном і віссю X у найнижчому шарі. Оптимальні значення кута знаходяться в межах від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Для деталей зі складною геометрією вибір кута растра має бути ретельно визначений для досягнення найкращих результатів. Ширина растра — це ширина смуги матеріалу, нанесеного при формуванні шару. Вона залежить від діаметра сопла. Збільшена ширина растра забезпечує більш щільну внутрішню

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |



3. Розріджений подвійно щільний — подальше зниження витрат матеріалу та часу шляхом застосування перехресного растрового візерунка.

Видима поверхня створюється для покращення зовнішнього вигляду деталей, дозволяючи використовувати більш грубі й швидкі методи заповнення за допомогою стандартних або тонких растрів. Частина стилю заповнення визначає траєкторію руху інструмента для побудови твердої моделі[14].

Ці параметри суттєво впливають на коефіцієнт усадки, якість поверхні та точність розмірів, оскільки на повітряний проміжок та властивості деталі впливає стиль побудови під час твердіння філамента [14].

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 38   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У першому розділі виконано аналіз історичного розвитку технології FDM-друку, матеріалів, які використовуються для виготовлення виробів, та різновидів кінематики 3D-принтерів. Вивчено процес формування терміну FDM (Fused Deposition Modeling), який став основою сучасного підходу до адитивного виробництва. Простежено історію розвитку технології від перших прототипів до сучасних промислових та побутових принтерів.

Особлива увага приділена характеристиці матеріалів, що застосовуються у FDM-друці, зокрема PLA, ABS, PETG, нейлону та ASA. Виявлено, що кожен із цих матеріалів має унікальні механічні та теплові властивості, які визначають сферу його використання. Аналіз показав, що вибір матеріалу є критично важливим для забезпечення необхідної якості готових деталей, особливо у випадках друку складнопрофільних виробів.

Огляд кінематичних схем 3D-принтерів дозволив встановити переваги та недоліки основних типів кінематики, включаючи картезіанську, дельта, кореXY та SCARA. Виявлено, що вибір кінематики безпосередньо впливає на швидкість, точність і стабільність друку. Зокрема, картезіанська кінематика залишається найпоширенішою через її простоту та універсальність, тоді як дельта-принтери демонструють високу швидкість за умови зниження точності.

Розглянуто особливості активних і пасивних камер для FDM-принтерів, які впливають на якість друку шляхом контролю температурного середовища під час роботи. Досліджено, що активні камери дозволяють значно підвищити стабільність процесу, що важливо при роботі з термопластами, чутливими до змін температури.

Процес друку за FDM-технологією розглянуто у деталях, починаючи з підготовки моделі, налаштування параметрів друку, включаючи температуру екструзії, висоту шару, швидкість друку та структуру заповнення. Встановлено, що ці параметри суттєво впливають на якість і механічні властивості готових виробів.

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 39   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

Таким чином, у розділі висвітлено широкий спектр аспектів, пов'язаних із FDM-друком, які є важливими для розуміння обмежень і можливостей цієї технології. Отримані результати слугуватимуть основою для подальшого аналізу проблем і перспектив друку складнопрофільних полімерних деталей, а також для розробки пропозицій щодо покращення процесу виготовлення таких виробів.

|             |             |                 |               |             |                               |      |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------------|------|
|             |             |                 |               |             | <i>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</i> | Арк. |
|             |             |                 |               |             |                               | 40   |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                               |      |

## **РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ І ПЕРСПЕКТИВ ДРУКУ СКЛАДНО ПРОФІЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ ДЕТАЛЕЙ**

Складнопрофільні деталі характеризуються наявністю складної геометрії, численних вигинів, отворів, внутрішніх каналів або інших конструктивних особливостей, які важко або неможливо виготовити за допомогою традиційних виробничих методів. Завдяки розвитку FDM технології ці деталі стали більш доступними для виготовлення, особливо в умовах індивідуального або малосерійного виробництва. Технологія адитивного виробництва дозволяє створювати складні форми без необхідності використання спеціальної оснастки чи багатоетапного механічного оброблення [16. 17].

Сучасні методи 3D-друку, такі як FDM (моделювання методом наплавлення), SLA (лазерна стереолітографія), SLS (селективне лазерне спікання), відкривають широкі можливості для створення деталей з унікальними формами. Вибір методу залежить від вимог до точності, міцності та функціональності виробу. Наприклад, FDM забезпечує простоту процесу та низьку вартість, але SLA та SLS мають переваги в досягненні вищої точності та створенні складних внутрішніх структур [17].

Хоча 3D-друк значно спрощує процес виготовлення складних деталей, він також стикається з низкою викликів. Вивчення впливу технологічних параметрів друку, таких як температура, швидкість друку та використання підтримок, є важливим для забезпечення якості складнопрофільних виробів[16].

### ***3.1 Недоліки складнопрофільних полімерних деталей, виготовлених за допомогою 3D-друку.***

Складнопрофільні полімерні деталі, виготовлені за допомогою 3D-друку, мають низку недоліків, які можуть значно впливати на їхню функціональність, довговічність та зовнішній вигляд. Зокрема негерметичність, так звані артефакти друку, низька міцність і слабка міжшарова адгезія, а також інші можливі недоліки [16, 17].

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 41   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

Один з найбільш поширених недоліків, що виникає під час друку складнопрофільних деталей, полягає у наявності мікропорожнин або тріщин у матеріалі. Це зумовлено особливостями патерну заповнення, коли внутрішня структура деталі створюється за допомогою геометричних малюнків, таких як сітки чи шестикутники. Мікропорожнини можуть призводити до негерметичності деталей, що є критичним для виробів, які повинні утримувати рідини або гази [17].

Іншим серйозним недоліком є наявність артефактів друку, наприклад, "слонової ноги". Цей дефект виникає, коли нижні шари деталі деформуються, розширюючись назовні, що може бути спричинено надмірним нагріванням платформи або недостатнім охолодженням перших шарів. Крім того, зустрічаються такі дефекти, як зсув шарів, нерівномірність екструзії та "шрами" на поверхні, які вимагають подальшої обробки [18].

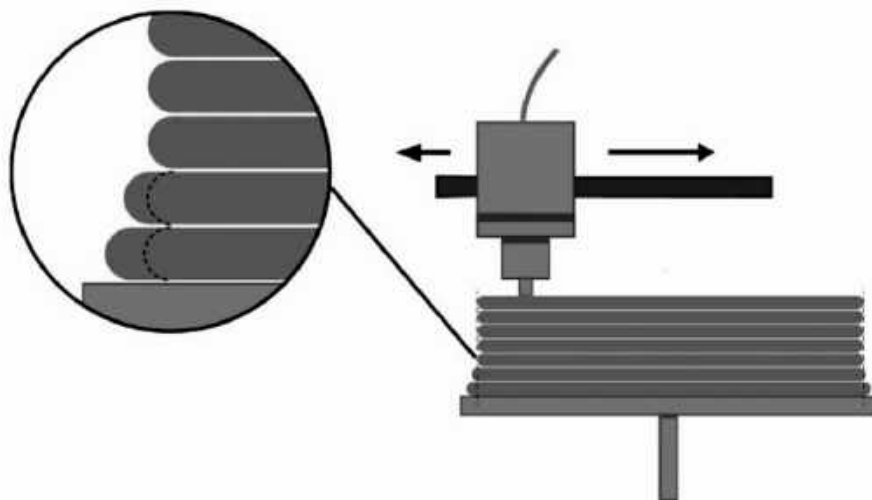


Рисунок 7 - Приклад дефекту “Слонова нога”

Обмежена міцність є ще одним недоліком деталей, виготовлених за допомогою 3D-друку. Це особливо помітно в умовах високих навантажень або механічного впливу. Причиною цього є слабка міжшарова адгезія, яка залежить від температури друку, швидкості екструзії та типу використовуваного

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               | 42   |

матеріалу. Деякі філаменти, такі як PLA або PETG, мають слабку адгезію між шарами, що може призвести до розшарування деталей під час експлуатації. Це особливо критично для конструкцій, що зазнають вібрацій чи динамічних навантажень[18].

Деформація деталей може виникати через нерівномірне охолодження матеріалу, особливо у великих плоских деталях. Це явище відоме як "викривлення" і найчастіше зустрічається у матеріалах з високим коефіцієнтом термічного розширення, таких як ABS чи нейлон[18].

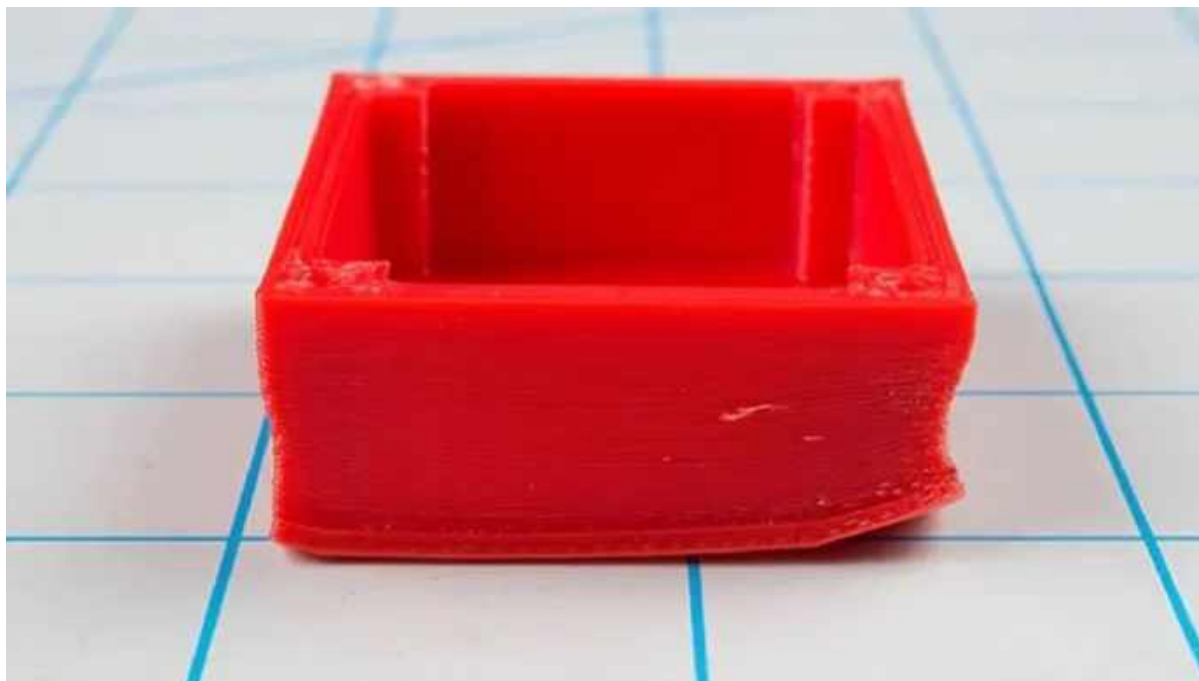


Рисунок 8 - Дефект геометрії

Деякі полімери, зокрема нейлон, є гігроскопічними і здатні поглинати вологу з повітря. Це може призводити до появи бульбашок у матеріалі під час друку, що негативно впливає на механічні властивості та зовнішній вигляд деталей [18. 19].

Попри те, що сучасні 3D-принтери здатні створювати складні геометричні форми, їхня роздільна здатність є обмеженою. Це означає, що дрібні деталі можуть бути відтворені з недостатньою точністю, що впливає на якість кінцевого виробу [18. 19].

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 43   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

Більшість деталей, виготовлених за допомогою 3D-друку, потребують додаткової обробки для усунення нерівностей, покращення поверхні та забезпечення точності. Це може включати шліфування, фарбування або хімічну обробку, що збільшує час та вартість виробництва [18. 19].

|             |             |                 |               |             |                               |      |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------------|------|
|             |             |                 |               |             | <i>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</i> | Арк. |
|             |             |                 |               |             |                               | 44   |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                               |      |

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі проаналізовано проблеми, пов'язані з виготовленням складнопрофільних полімерних деталей за допомогою FDM-технології, а також визначено перспективи їх вирішення. Основними недоліками таких деталей є низька механічна міцність у критичних зонах, що виникає через шарову структуру друку та недостатню адгезію між шарами. Також виявлено проблеми з точністю розмірів і геометрії виробів, які особливо проявляються при друку деталей зі складною формою.

Однією з ключових проблем є утворення дефектів у вигляді розшарувань, тріщин або деформацій. Ці недоліки часто спричинені неправильним вибором параметрів друку, таких як температура екструзії, швидкість друку, висота шару та заповнення. Окрім того, застосування підтримок із того самого матеріалу, що й основна деталь, ускладнює видалення залишків і може пошкодити поверхню деталі.

Обмеження у складності геометрії також пов'язані з потребою у підтримках. Вони створюють додаткові труднощі при друці підвісних елементів, вузьких каналів або замкнених об'ємів. Це обмежує використання FDM-друку для проектування деталей із високим рівнем складності.

Ще одним фактором є неоднорідність механічних властивостей деталей через напрямок друку та внутрішню структуру заповнення. Напрямок навантаження часто не співпадає з орієнтацією волокон матеріалу, що знижує міцність готового виробу.

Таким чином, основними обмеженнями FDM-друку для складнопрофільних деталей є проблеми з механічними властивостями, точністю, утворенням дефектів і складністю геометрії. Вирішення цих питань є необхідним для розширення можливостей використання 3D-друку у виробництві складних та функціональних деталей.

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 45   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

## РОЗДІЛ 3 ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПОКРАЩЕННЯ ДРУКУ СКЛАДНО ПРОФІЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ ДЕТАЛЕЙ

### 3.1 Вплив орієнтації, висоти шару та структури заповнення на механічні властивості 3D-друкованих деталей

Незалежно від використання пластику чи композитів, технологій FFF чи SFF, максимальна міцність 3D-друкованих деталей досягається у площинах, паралельних друкарському столу. Орієнтація друку є критичним фактором, що визначає механічну міцність виробу. У процесі виготовлення деталі шари матеріалу укладаються один на одного, формуючи структуру, в якій молекулярні зв'язки екструзій є значно міцнішими, ніж адгезійні зв'язки між шарами. Це створює анізотропність властивостей, подібну до текстури деревини, де розшарування або зсув по вертикалі є найбільш уразливими. [21]

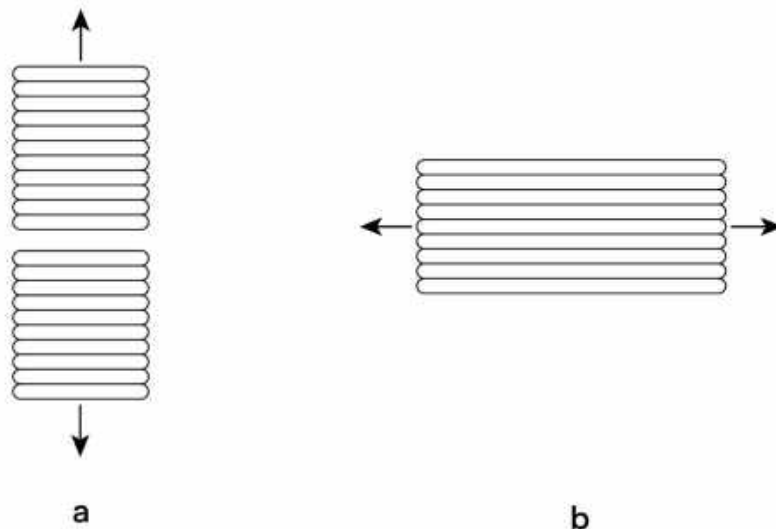


Рисунок 9 - Вплив сил в різних площинах деталі.

Для досягнення оптимальних характеристик деталі необхідно враховувати розподіл механічних навантажень у моделі: зони згинання, розтягування чи зсуву. Візуалізація розподілу навантажень (наприклад, шляхом

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 46   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

побудови схеми) сприяє прийняттю обґрунтованих рішень щодо орієнтації деталі під час друку.

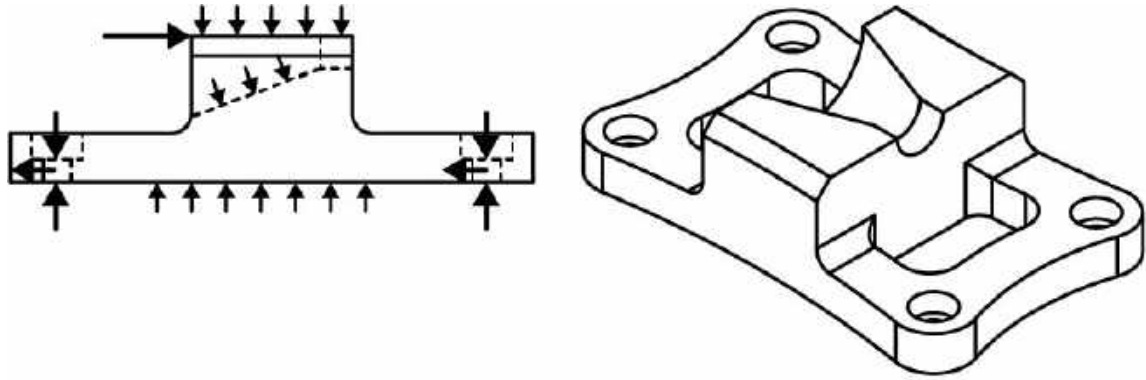


Рисунок 10 - Візуалізація механічних навантажень на поверхні моделі.

Зміна висоти шару має незначний вплив на міцність деталей. Зменшення висоти шару збільшує кількість екструзій матеріалу, проте зменшує поперечний переріз ниток. Водночас збільшення висоти шару знижує кількість екструзій, але збільшує їх поперечний переріз. Ці ефекти взаємно компенсуються, забезпечуючи приблизно однакову міцність деталей за різної висоти шару. Остаточні характеристики залежать від матеріалів і параметрів конкретного принтера. [20]

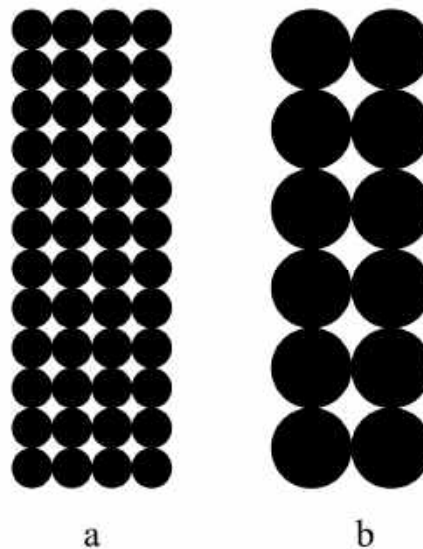


Рисунок 11 - Схема перерізу щільності заповнення.



### ***3.2 Друк підтримок з використанням іншого типу філаменту як елемент покращення складнопрофільних деталей***

Друк підтримок з використанням іншого типу філаменту є важливим етапом розвитку адитивних технологій. Цей підхід надає змогу створювати складні геометричні моделі з покращеною якістю поверхонь та мінімальним впливом на основну структуру виробу.

Однією з ключових переваг є використання розчинних матеріалів для підтримок, таких як PVA (полівініловий спирт) та BVON (бутендіолвініловий спирт). Ці філаменти забезпечують зручність у видаленні підтримок після завершення друку. Завдяки своїм розчинним властивостям, вони дозволяють уникнути механічного впливу на основну модель, що значно зменшує ризик пошкоджень. Крім того, використання таких матеріалів робить можливим створення складних внутрішніх структур, які не могли б бути виготовлені іншими методами.



Рисунок 13 — Приклад надрукованої деталі із підтримками з іншого філаменту.

|      |      |          |        |      |                        |  |  |  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|--|--|--|------|
|      |      |          |        |      |                        |  |  |  | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        |  |  |  | 49   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ |  |  |  |      |

Однак, попри очевидні переваги, цей підхід має певні обмеження. Насамперед вартість розчинних філаментів значно перевищує вартість стандартних матеріалів, таких як PLA чи ABS. Це робить технологію менш доступною для масового використання. Також слід зазначити чутливість розчинних матеріалів до умов зберігання. Їхня гігроскопічність призводить до втрати механічних властивостей при тривалому контакті з вологим повітрям, що вимагає спеціальних умов зберігання, таких як герметичні контейнери з осушувачами.

Сумісність матеріалів також є важливим фактором, який слід враховувати при використанні цієї технології. Наприклад, PLA добре працює з PVA, тоді як ABS часто комбінується з HIPS (розчиняється в лімонені). Використання несумісних матеріалів може призвести до дефектів друку, таких як погана адгезія між шарами чи деформація підтримок.

Процес друку з підтримками з іншого матеріалу потребує спеціального обладнання, зокрема принтера з подвійною екструзією. Налаштування таких принтерів є складнішим порівняно з однокструзійними системами, що потребує досвіду та часу для досягнення якісних результатів. Важливими параметрами є температурний режим для кожного матеріалу, швидкість друку та налаштування рівнів адгезії між основною моделлю та підтримками.

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 50   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

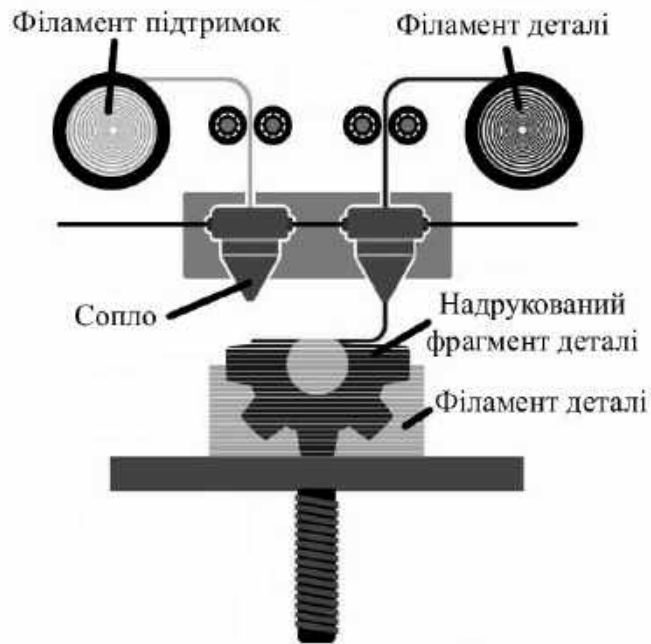


Рисунок 14 - Схема друку складнопрофільної деталі з підтримками іншого типу філаменту на мульти екструдерному FDM-принтері.

Використання розчинних підтримок також має екологічний аспект. Хоча PVA розчиняється у воді, розчини, що утворюються, можуть потребувати спеціальної утилізації для запобігання забрудненню навколишнього середовища. Це ставить під сумнів довгострокову стійкість цієї технології та вимагає розробки екологічно безпечних альтернатив.

При використанні підтримок із філаментів із різною температурою плавлення, особливо в умовах активної камери з контрольованою температурою, виникають значні труднощі, які можуть вплинути на якість друку. Основна проблема полягає у втраті геометричних параметрів підтримок через термічну нестабільність матеріалів із нижчими температурами плавлення. Наприклад, підтримки з PVA або BVON, які зазвичай застосовуються для друку з PLA або PETG, піддаються значним деформаціям або частковому плавленню в умовах високотемпературної камери, необхідної для друку ABS або нейлону.

Через ці деформації підтримки втрачають свою структурну цілісність і не можуть виконувати свою основну функцію – забезпечувати стабільність

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               | 51   |

нависаючих елементів моделі. Це призводить до того, що деталі, які мали спиратися на підтримки, починають провисати або деформуватися, що негативно впливає на загальну геометрію моделі. Крім того, часткове розплавлення підтримок може створювати додаткові нерівності на поверхнях, які контактують із ними, що потребує додаткової обробки після завершення друку.

Окрім втрати геометричних параметрів, матеріали з низькою температурою плавлення можуть залишати залишки або бруд на робочій платформі та на моделі через надмірне нагрівання, що ускладнює процес очищення та обслуговування обладнання. Для уникнення таких проблем необхідно ретельно підбирати матеріали, сумісні не лише за адгезійними властивостями, але й за термічною стабільністю, або уникати використання активної камери при друку деталями з підтримками із філаментів з нижчими температурами плавлення.

### ***3.3 Стратегії армування волокнами***

Забезпечення максимальної міцності деталей, створених за допомогою технології безперервного волоконного 3D-друку, залежить від здатності оптимально використовувати нитки або панелі для розподілу навантажень у точках згинання чи розтягнення. В даній роботі аналізуються ефективні методи проектування армування, спрямовані на підвищення механічних властивостей виробів [20].

Проектування армування базується на детальному аналізі зон навантаження та орієнтації друку. Застосування відповідних підходів до розташування волокон дозволяє досягати оптимальних характеристик міцності:

1. Аналіз умов навантаження. Важливо ретельно оцінити розташування зон, які зазнають згинальних, розтягуючих або стискальних зусиль. Побудова схеми розподілу сил допомагає краще зрозуміти поведінку деталі під навантаженням і визначити стратегію армування [21].

2. Орієнтація друку. Для досягнення оптимальної міцності деталь повинна бути орієнтована так, щоб основні сили діяли в площині друку. Якщо

|      |      |          |        |      |                                      |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b><i>MPTAM 24. 23654.000 ПЗ</i></b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                      | 52   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                      |      |

навантаження розподілене по кількох осях, можливо, знадобиться перегляд конструкції чи поділ її на частини [21].

3. Ідентифікація зон армування. Визначення поверхонь або сегментів, які потребують посилення, дозволяє спрямувати зусилля на зміцнення ключових ділянок [21].

4. Балансування сендвіч-панелей. Якщо армування застосовано лише на одній стороні деталі, це може призвести до викривлення через нерівномірність структури. Балансування передбачає додаткове армування протилежних шарів для компенсації навантажень [21].

5. Перевірка маршруту волокон. Необхідно переконатися, що волокна розташовані вздовж основних шляхів навантаження і з'єднують критичні точки. Важливо врахувати, що друк волокон потребує принаймні чотирьох пластикових шарів основи чи покриття для належної інтеграції в структуру [21].

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 53   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

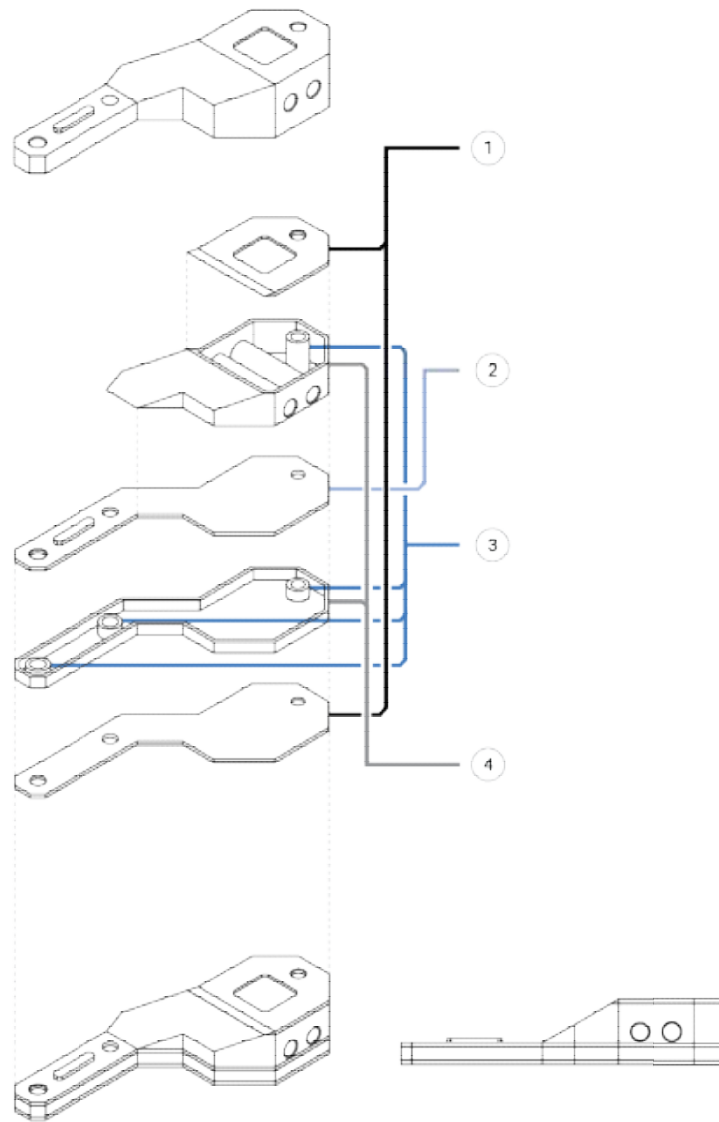


Рисунок 15 — Структурна схема формування сендвіч-панелей

Формування сендвіч-панелей (рис. 15) є одним із базових підходів для підвищення міцності друкованих деталей. Цей метод забезпечує стійкість до згинальних і ударних навантажень:

- Ізотропні панелі у крайніх Z-шарах. Для максимізації опору на вигин слід формувати панелі з 2-4 шарів ізотропного волокна на верхніх і нижніх площинах. Ці панелі повинні розташовуватись над чотирма шарами основи або під покриттям [20, 21].

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               | 54   |

- Армування зон змін геометрії. У разі великих змін у геометрії деталі додаткові шари волокна повинні бути розташовані вище або нижче критичних ділянок [20, 21].

- Зміцнення болтових отворів. Для отворів, що піддаються стисканню болтами, використовують два кільця концентричних волокон. Це дозволяє рівномірно розподілити сили стиснення та створити композитну структуру, яка протистоїть позаосьовим навантаженням[20, 21].

Для підвищення стійкості до бокових навантажень зовнішні стінки деталі можна армувати кількома шарами концентричних волокон. Це також посилює будь-які отвори, розташовані в площині XY[20, 21].

Спеціалізовані стратегії армування:

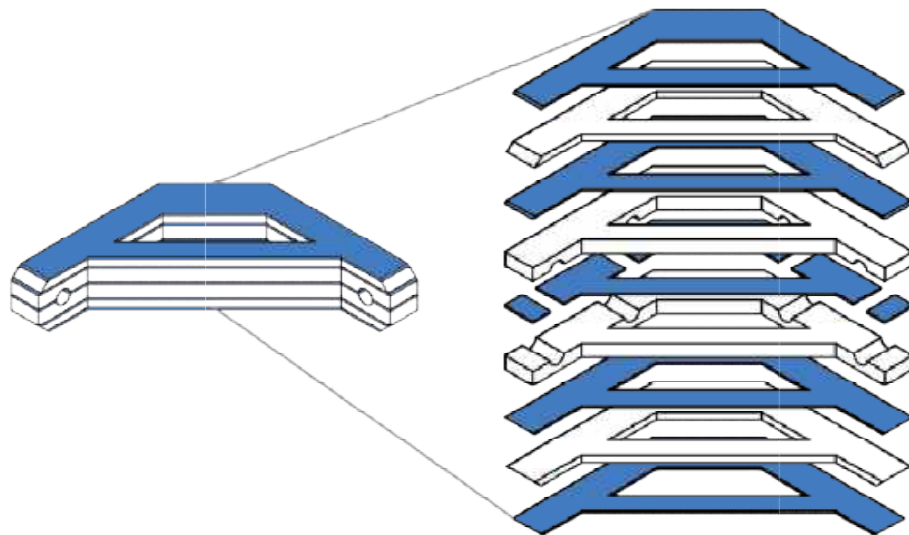


Рисунок 16 - Смогове армування панелей.

Додавання смуг (рис. 16) ізотропного волокна через кілька шарів по осі Z забезпечує додаткову стійкість до згинальних навантажень, особливо для деталей із симетричним перерізом [20].

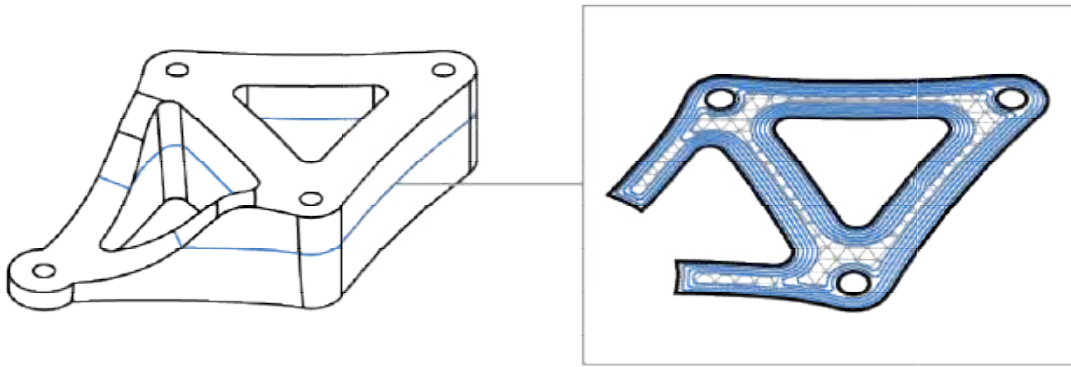


Рисунок 17 - Направлене армування через ребра

Створення ребер (рис. 17) дозволяє волокнам слідувати за основними траєкторіями навантаження, що значно підвищує міцність [20].

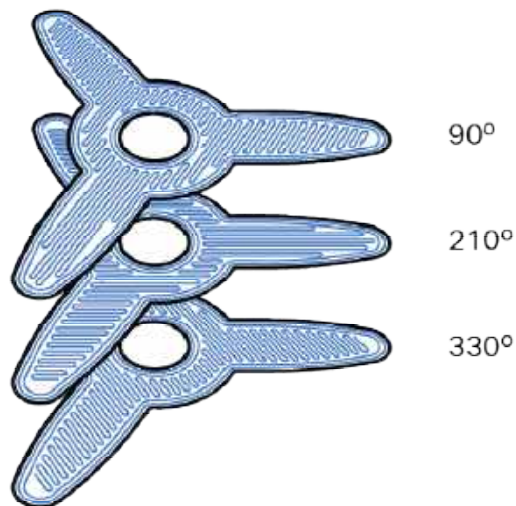


Рисунок 18 - Контроль кутів волокон

Використання кутів (рис. 18) армування дозволяє адаптувати траєкторії волокон до умов навантаження. Це досягається шляхом налаштування напрямків волокон у програмному забезпеченні [20].

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

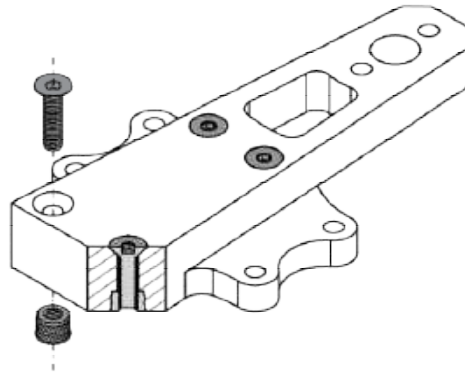


Рисунок 19 — Приклад застосовування наскрізних болтів.

Для розв'язання проблем із міцністю по осі  $Z$  можна застосовувати наскрізні болти (рис. 19). Концентричне армування навколо болта дозволяє рівномірно розподілити сили стиснення і запобігти розриву на лінії шарів.

### 3.4 Відпал

Технології 3D-друку дозволяють створювати деталі складних форм, забезпечуючи високу гнучкість виробничого процесу та зменшення витрат. Однак механічні властивості деталей, виготовлених із полімерів, часто не відповідають вимогам, особливо в умовах значних навантажень. Полімерні матеріали, які використовуються для друку, мають властивість накопичувати внутрішні напруження під час охолодження, що призводить до деформацій і зменшення міцності виробів.

Відпал як метод термічної обробки здатний усувати ці недоліки. Під час нагрівання матеріалу до певної температури внутрішні напруження зменшуються, а структура полімеру стабілізується. Це дозволяє покращити механічні характеристики деталей, зменшити їхню деформацію і стабілізувати геометричні параметри. Окрім того, відпал сприяє підвищенню термостійкості, що є важливим для деталей, які працюють у складних умовах [23].

Використання відпалу може значно розширити сферу застосування 3D-друкованих деталей. Завдяки цьому методу забезпечується більша стабільність і

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               | 57   |

довговічність виробів, що робить їх придатними для застосування у промисловості, авіації, автомобілебудуванні та інших високотехнологічних галузях.

Технологічні переваги відпалу роблять його перспективним для покращення якості полімерних деталей. Розуміння процесів, що відбуваються під час термічної обробки, і їх оптимізація є ключем до розширення можливостей 3D-друку в сучасному виробництві.

Відпал є важливим етапом обробки полімерів, який дозволяє значно покращити властивості матеріалів, виготовлених методом 3D-друку. Процес відпалу впливає на макромолекулярну структуру полімерів, сприяючи зменшенню внутрішніх напружень, стабілізації геометричних параметрів та покращенню механічних характеристик виробів. Полімери складаються з молекулярних ланцюгів, що можуть утворювати аморфні або частково кристалічні області. Відпал сприяє переходу молекул із хаотичного стану в більш впорядкований, що називається кристалізацією. Саме ця трансформація забезпечує підвищення жорсткості, міцності та термостійкості матеріалу [23].

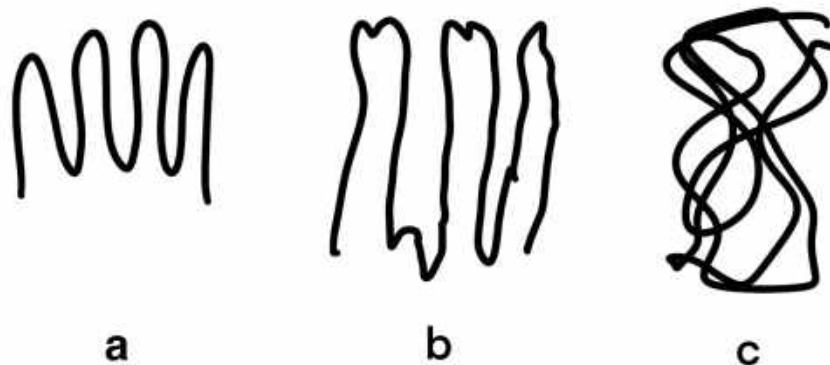


Рисунок 20 - Структура кристалічних полімерних ланцюгів.

Для полімерів, які використовуються у 3D-друці, відпал має особливе значення, оскільки технологія пошарового друку викликає накопичення залишкових напружень у матеріалі. Ці напруження можуть призводити до

деформацій, зменшення міцності та утворення тріщин. Відпал усуває ці проблеми, сприяючи вирівнюванню молекулярної структури та зменшенню внутрішніх дефектів.

PLA є одним із найпоширеніших матеріалів для 3D-друку. У початковому стані він переважно аморфний, але під час відпалу відбувається активна кристалізація, яка підвищує термостійкість і жорсткість. Водночас процес супроводжується незначною усадкою, яка може вплинути на точність геометричних параметрів виробу. PETG, на відміну від PLA, має вищу еластичність і стійкість до деформацій. Відпал PETG забезпечує помірну кристалізацію, яка зберігає баланс між міцністю та гнучкістю.

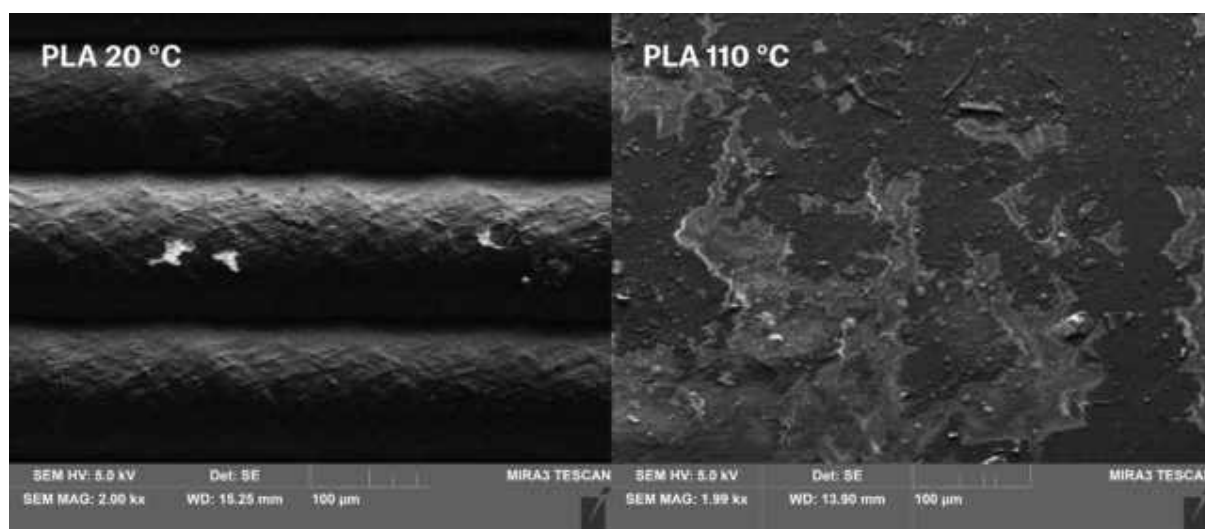


Рисунок 21 - Порівняння необробленого та відпаленого зразка PLA,

Автор: Jiří Kmošek

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 59   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

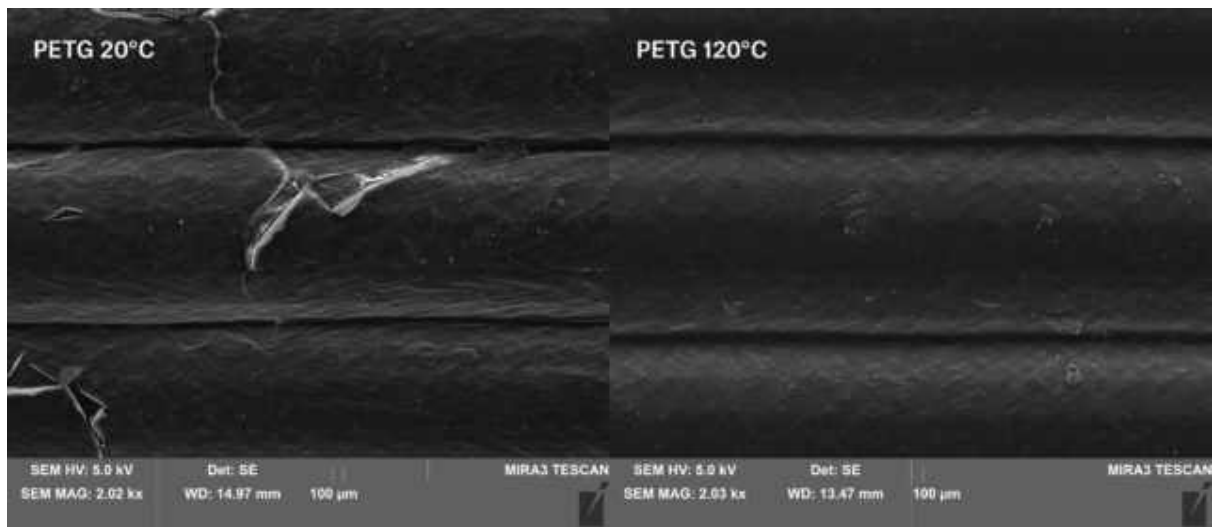


Рисунок 22 - Порівняння необробленого та відпаленого зразка PETG,  
Автор: Jiří Kmošek

ABS і ASA характеризуються високою стійкістю до механічних навантажень. Відпал цих матеріалів сприяє зменшенню залишкових напружень і стабілізації структури. ASA, як матеріал із підвищеною стійкістю до ультрафіолету та атмосферних впливів, після відпалу демонструє покращені експлуатаційні властивості, що робить його придатним для зовнішнього використання. Нейлон, завдяки своїй високій гнучкості, потребує ретельного контролю під час відпалу, оскільки процес супроводжується значною усадкою. Правильний підбір параметрів дозволяє досягти стабільних розмірів та покращити міцність.

Таким чином, відпал є універсальним методом покращення властивостей полімерних деталей, але його ефективність залежить від типу матеріалу та правильного підбору параметрів. У таблиці нижче наведено ключові температурні діапазони для відпалу та плавлення полімерів, які дозволяють оптимізувати цей процес.

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 60   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

| Полімер | Температура відпалу (°C) | Температура плавлення (°C) | Особливості  |
|---------|--------------------------|----------------------------|--|
| PLA     | 60–80                    | 170–180                    | Значне покращення жорсткості та термостійкості       |
| PETG    | 70–90                    | 230–250                    | Помірне підвищення міцності та гнучкості             |
| ABS     | 85–105                   | 220–240                    | Зменшення напружень, стабілізація геометрії          |
| ASA     | 90–110                   | 210–240                    | Підвищення стійкості до ультрафіолету                |
| Нейлон  | 70–90                    | 250–260                    | Усунення залишкових напружень, стабільність розмірів |

Таблиця 1- Параметри відпалу полімерів

Кристалізація, яка відбувається під час відпалу, є ключовим фактором для покращення механічних властивостей. Однак ступінь цього процесу залежить від хімічного складу полімеру та умов обробки. Чим більше кристалічних зон формується, тим вища міцність і термостійкість матеріалу, хоча водночас може зростати крихкість. Ретельне налаштування параметрів відпалу дозволяє досягти оптимального балансу між цими характеристиками.

Для дослідження впливу відпалу на властивості 3D-друкованих деталей використовувалося спеціалізоване обладнання, яке забезпечує точність виготовлення зразків, контроль параметрів термічної обробки та достовірність результатів механічних і геометричних випробувань.

### **3.4.1 Опис обладнання**

#### *3D-принтер Elegoo Neptune 4 Pro*

Це високошвидкісний FDM-принтер, який забезпечує високу якість друку завдяки:

- Максимальній швидкості друку до 500 мм/с (рекомендована — 250 мм/с).
- Діаметру форсунки 0,4 мм.
- Температурі екструдера до 300°C і платформи до 110°C.
- Точності позиціонування  $\pm 0,05$  мм.

Використання цього принтера дозволило виготовляти точні зразки з полімерних матеріалів для подальшого аналізу.

#### *Термокамера BINDER ED-S 56*

Сушильна шафа з природною конвекцією, яка забезпечує рівномірний нагрів у діапазоні температур від +7°C вище кімнатної температури до 250°C. Камера має об'єм 56 літрів і забезпечує рівномірність температури  $\pm 1,8^\circ\text{C}$  при 150°C. Це обладнання використовувалось для проведення контрольованого відпалу зразків.

#### *Випробувальна машина Shimadzu EZ-SX/LX*

Компактна універсальна настільна машина, яка дозволяє виконувати точні механічні випробування. Основні характеристики:

Максимальне навантаження: 5 кН.

Точність вимірювань:  $\pm 0,5\%$ .

Швидкість випробувань: від 0,001 мм/с до 1000 мм/с. Ця машина використовувалась для тестування міцності зразків на розтяг після відпалу.

#### *Штангенциркуль комп'ютерний мікронний ШЦЦТК-150*

Високоточний вимірювальний прилад, який застосовувався для аналізу геометричних змін після відпалу. Основні характеристики:

Межа вимірювання: 0–150 мм.

Точність: 0,01 мм.

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 62   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

Комп'ютерний інтерфейс для автоматичної передачі даних. Цей штангенциркуль дозволив точно оцінити усадку, деформацію та стабільність геометрії зразків.

Для виготовлення зразків використовувався філамент від компанії PLEXIWIRES, яка є провідним виробником матеріалів для 3D-друку. Виробник забезпечує високу якість продукції, що відповідає сучасним стандартам, та надає рекомендації щодо параметрів друку для кожного типу пластику. Філамент від PLEXIWIRES характеризується стабільністю властивостей, що є важливим для досягнення точності та повторюваності у виготовленні деталей.

| Полімер   | Температура екструдера (°C) | Температура платформи (°C) | Охолодження         |
|-----------|-----------------------------|----------------------------|---------------------|
| PLA       | 205–220                     | 40-60                      | Рекомендовано       |
| PETG      | 230–255                     | 50-70                      | Не обов'язково      |
| ABS       | 235°C-250°C                 | 90–110                     | Не рекомендовано    |
| ASA(ABS+) | 240–260                     | 90–110                     | Не рекомендовано    |
| Нейлон    | 255–265                     | 100–120                    | Не використовується |

Таблиця 2. Рекомендовані параметри друку виробниками філаменту

### 3.4.2 Процес дослідження

Зразки друкувалися з PLA, PETG, ABS, ASA та нейлону. Для забезпечення однорідності використовували однакові параметри друку:

Товщина шару: 0,2 мм.

Швидкість друку: 50 мм/с.

Температура друку: відповідно до рекомендацій для кожного матеріалу.



### 3.4.3 Результати дослідження

Проведене дослідження дозволило оцінити вплив відпалу на механічні, геометричні та структурні властивості зразків, виготовлених з різних полімерних матеріалів методом 3D-друку. Отримані результати дозволяють визначити ефективність термічної обробки та встановити оптимальні режими відпалу для кожного матеріалу.

Зразки PLA після відпалу демонстрували значне покращення термостійкості та міцності. Міцність на розтяг збільшилась у середньому на 15%, при цьому твердість залишилася майже незмінною. У процесі кристалізації структура матеріалу стала більш однорідною, що зменшило ризик деформації при підвищених температурах.

PETG виявився менш чутливим до відпалу, ніж PLA. Міцність зросла лише на 8–10%, а подовження при розриві практично не змінилося. Це пов'язано зі стабільною структурою матеріалу, яка не зазнала значної трансформації.

Відпал ABS забезпечив покращення ударостійкості на 20%. Зменшення залишкових напружень дозволило стабілізувати геометрію та уникнути тріщин, які часто виникають у деталях без термічної обробки.

Після відпалу ASA продемонстрував покращення стійкості до механічних навантажень та ультрафіолету. Міцність на розтяг збільшилася на 18%, а рівень деформації зменшився.

Відпал сприяв зменшенню залишкових напружень у нейлонових зразках. Міцність на розтяг зросла на 12%, а гнучкість залишилась практично незмінною. Основним результатом стало значне зменшення усадки, що покращило точність розмірів деталей.

Усі матеріали зазнали певної усадки під час відпалу, але її рівень залежав від типу полімеру:

PLA: усадка склала 2–3%, але відбулася рівномірно, не викликаючи деформацій.

PETG: мінімальна усадка — до 1%, що зберігало початкову геометрію.

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               | 65   |

ABS і ASA: усадка до 3%, при цьому форма деталей залишалася стабільною.

Нейлон: найбільша усадка серед досліджуваних матеріалів — 4–5%, яка компенсувалась рівномірністю процесу.

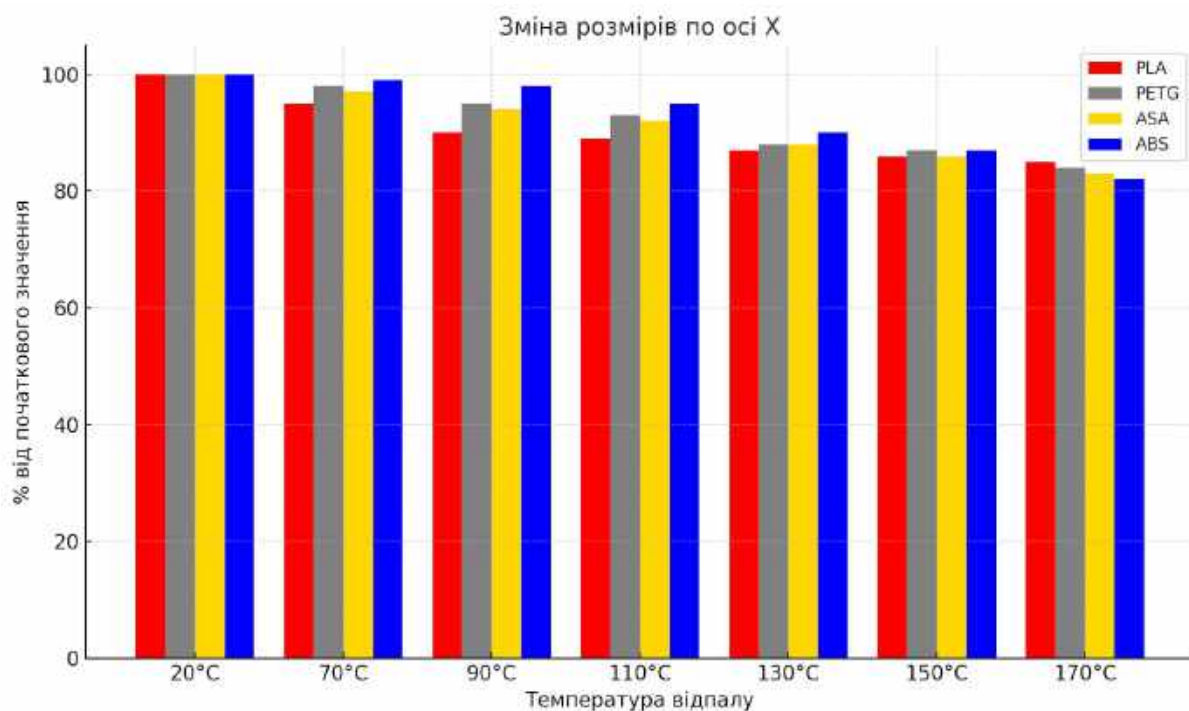


Рисунок 24 – Зміна розмірів по осі X.

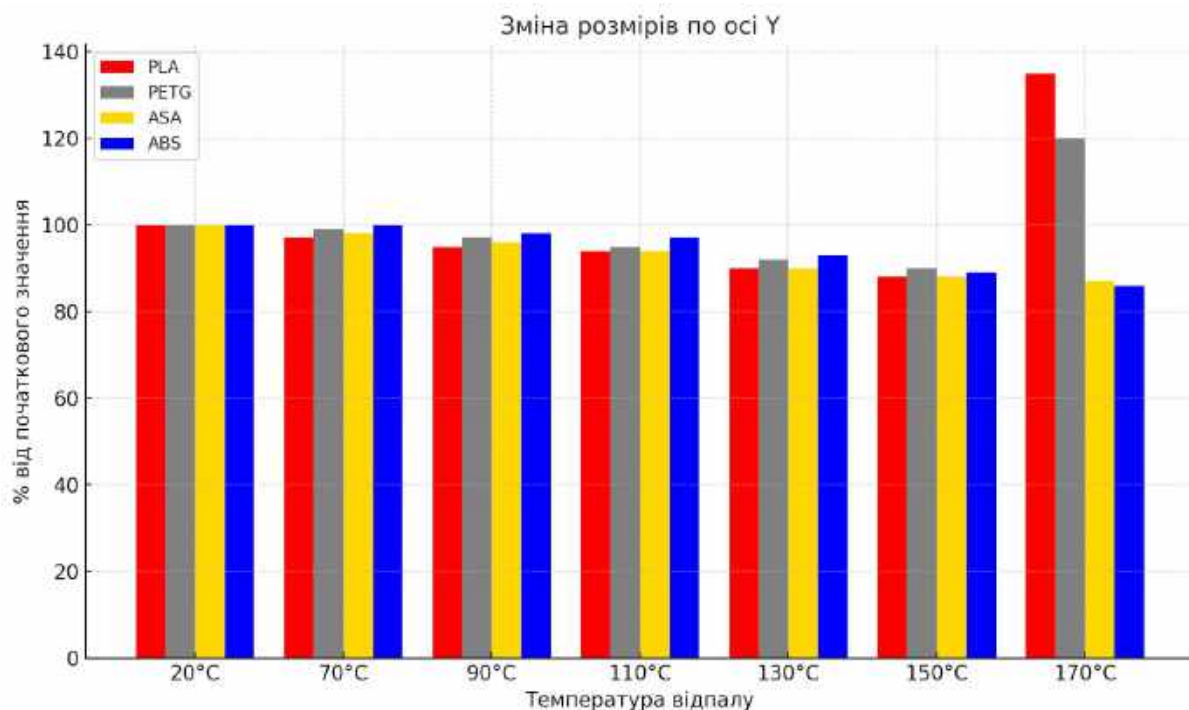


Рисунок 25 24 – Зміна розмірів по осі Y.

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

MPTAM 24. 23654.000 ПЗ

Арк.

66

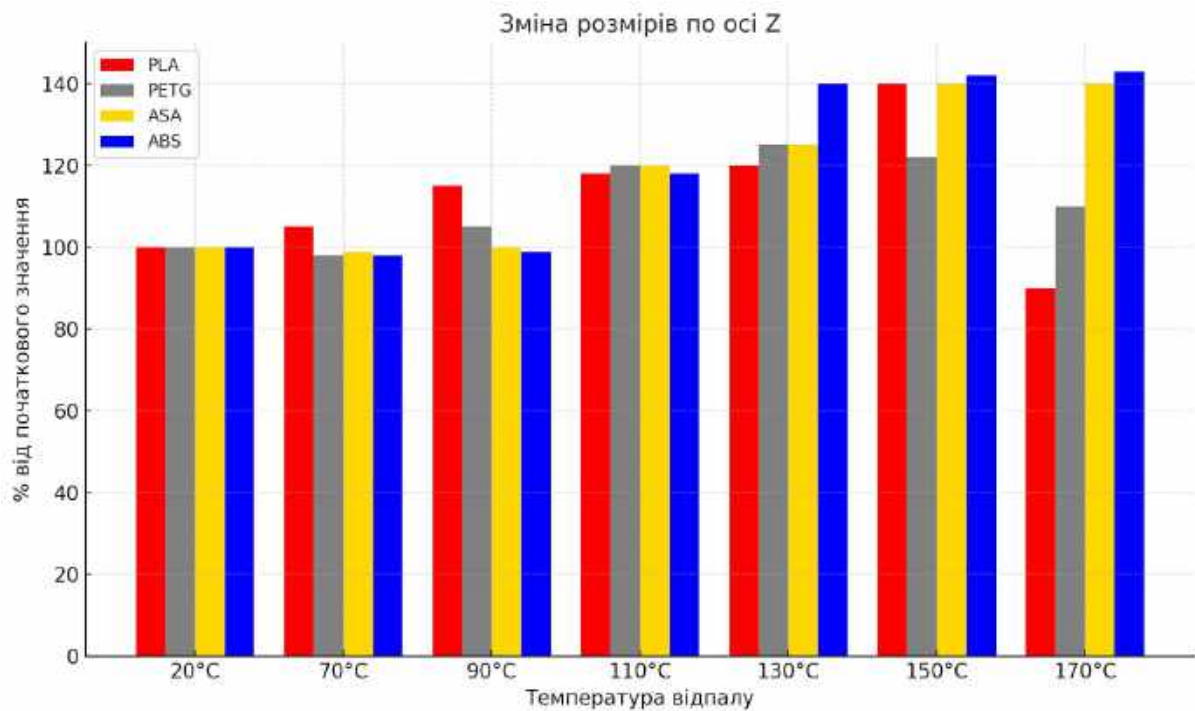


Рисунок 26 24 – Зміна розмірів по осі Z.

Під час відпалу відбувалася кристалізація матеріалів, яка найактивніше спостерігалася у PLA та ASA. Мікроструктурний аналіз показав:

Збільшення кількості кристалічних зон у PLA, що значно підвищило його жорсткість.

Стабілізацію аморфної та кристалічної фаз у PETG, що забезпечило баланс між міцністю та гнучкістю[23].

Зменшення внутрішніх дефектів у ABS та ASA, що сприяло їх довговічності[23].

Контрольні зразки, які не піддавалися відпалу, демонстрували значно меншу стабільність розмірів та механічну міцність. Це підкреслює важливість термічної обробки для покращення характеристик деталей, виготовлених методом 3D-друку.

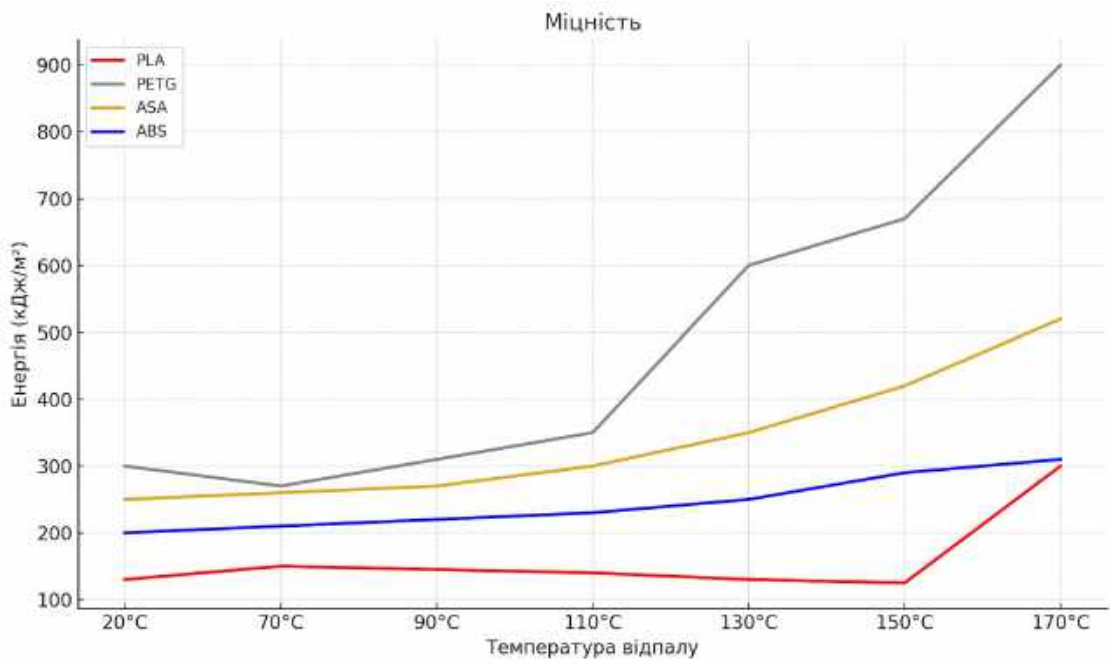


Рисунок 27 – Графік міцності.

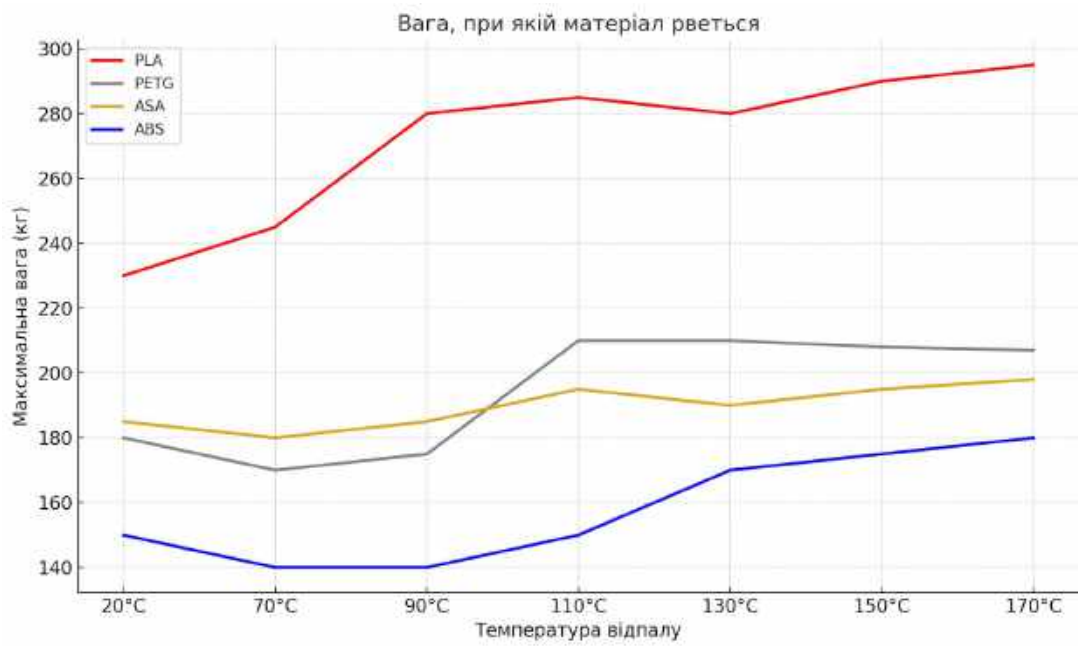


Рисунок 28 – Вага розриву матеріалу.

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ

Арк.

68

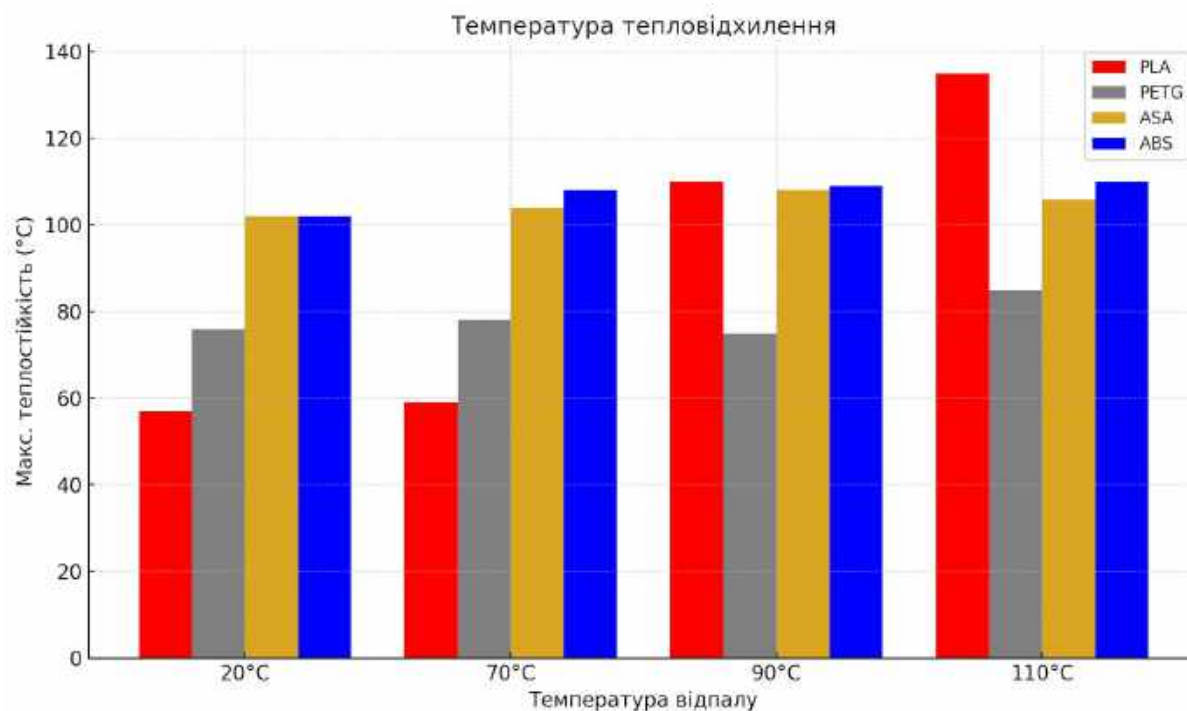


Рисунок 29 – Температура тепло відхилення.

Відпал позитивно вплинув на всі досліджувані матеріали, покращивши їх механічні та експлуатаційні властивості. Найкращі результати були досягнуті для PLA, ABS та ASA, які продемонстрували значне покращення міцності та стабільності. PETG і нейлон виявилися менш чутливими до термічної обробки, але також показали зменшення дефектів і покращення стабільності розмірів.

Отримані результати дозволяють рекомендувати відпал як обов'язковий етап обробки для підвищення якості 3D-друкованих деталей.

Отримані результати підтверджують, що відпал є ефективним методом покращення властивостей 3D-друкованих деталей із полімерних матеріалів. Термічна обробка дозволила зменшити внутрішні напруження, підвищити механічну міцність і стабілізувати геометрію деталей. Водночас кожен матеріал продемонстрував унікальну реакцію на відпал, що вказує на необхідність індивідуального підходу до вибору параметрів термічної обробки.

Відпал PLA забезпечив найбільш значний приріст механічних характеристик завдяки активному процесу кристалізації. Підвищення термостійкості та міцності робить цей матеріал придатним для застосувань, які

передбачають експлуатацію деталей в умовах підвищених температур. Однак усадка, яка спостерігалася під час відпалу, може вимагати корекції геометрії моделі на етапі підготовки до друку.

PETG продемонстрував стабільну поведінку під час відпалу. Незначне збільшення міцності свідчить про обмежений потенціал цього матеріалу для термічної обробки, але його мінімальна усадка є значною перевагою для застосувань, де важлива точність розмірів.

ABS та ASA показали помітне покращення ударостійкості та стабільності розмірів після відпалу. Це пов'язано із зменшенням залишкових напружень, які часто є причиною утворення тріщин у цих матеріалах. Водночас ASA, завдяки своїй стійкості до ультрафіолету, є кращим вибором для деталей, які експлуатуються на відкритому повітрі.

Нейлон виявився найбільш чутливим до процесу відпалу, зокрема до температурних коливань і швидкості охолодження. Значна усадка цього матеріалу вимагає ретельного контролю умов термічної обробки, але зменшення дефектів і стабілізація структури підтверджують ефективність відпалу.

Усадка, яка спостерігалася у всіх матеріалів, є типовим явищем для відпалу полімерів. Вона зумовлена перерозподілом молекулярної структури та зменшенням залишкових напружень. Рівномірна усадка в PLA, PETG, ABS і ASA дозволяє прогнозувати зміни розмірів і враховувати їх при проектуванні моделей. Висока усадка нейлону, навпаки, потребує додаткових заходів, таких як компенсація розмірів на етапі друку.

Процес кристалізації, активний у PLA та ASA, відіграв ключову роль у покращенні їхніх характеристик. Збільшення кристалічних зон зробило ці матеріали більш жорсткими та термостійкими. PETG, з переважанням аморфної фази, показав обмежені зміни структури, що пояснює його слабку реакцію на відпал. Зменшення внутрішніх дефектів у ABS та ASA покращило їх довговічність, що особливо важливо для деталей, які зазнають динамічних навантажень.

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 70   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

Основними перевагами відпалу є зменшення внутрішніх напружень, покращення механічних властивостей і стабілізація розмірів деталей. Цей процес особливо корисний для матеріалів із високою кристалізаційною здатністю, таких як PLA та ASA. Водночас обмеженнями є необхідність точного контролю температури, тривалості обробки та швидкості охолодження, а також врахування усадки матеріалів.

На основі отриманих результатів можна рекомендувати наступне:

Для PLA та ASA слід використовувати відпал для покращення термостійкості та жорсткості деталей, враховуючи можливу усадку.

Для PETG відпал є доцільним у випадках, коли важлива мінімальна зміна розмірів.

ABS краще піддавати відпалу для зменшення тріщин та покращення ударостійкості.

Для нейлону необхідно ретельно підбирати параметри відпалу, щоб уникнути значної усадки.

Таким чином, відпал є важливим інструментом для підвищення якості 3D-друкованих деталей, але його параметри повинні бути адаптовані до специфічних властивостей кожного матеріалу.

#### ***3.4.4 Висновки дослідження***

Результати проведеного дослідження підтверджують ефективність відпалу як методу покращення властивостей 3D-друкованих полімерних деталей. Термічна обробка значно впливає на механічні, геометричні та структурні характеристики матеріалів, дозволяючи підвищити їхню довговічність, міцність і термостійкість.

Відпал підвищив міцність PLA, ABS та ASA на 15–20%, покращивши їх жорсткість та стійкість до деформацій.

PETG та нейлон демонстрували менш значні покращення, але зменшення дефектів у структурі підтверджує доцільність відпалу.

Геометрична стабільність

|      |      |          |        |      |                        |  |  |  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|--|--|--|------|
|      |      |          |        |      |                        |  |  |  | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        |  |  |  | 71   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ |  |  |  |      |

Усадка, характерна для всіх матеріалів, є прогнозованою та рівномірною для PLA, PETG, ABS і ASA, що дозволяє враховувати її під час проектування моделей.

Нейлон вимагає особливої уваги через вищий рівень усадки (4–5%), який може впливати на точність виробів.

Активна кристалізація в PLA та ASA забезпечила підвищення термостійкості та жорсткості.

У ABS і ASA зменшення дефектів структури сприяло покращенню механічних характеристик та довговічності.

Відпал потребує ретельного контролю температури, тривалості та швидкості охолодження, щоб уникнути небажаних змін розмірів і властивостей.

Застосування відпалу має враховувати специфічні властивості матеріалів, їх кінцеве призначення та умови експлуатації.

Відпал рекомендується застосовувати як обов'язковий етап для деталей, виготовлених із PLA, ABS і ASA, які потребують підвищеної міцності та термостійкості. Для PETG і нейлону цей процес є доцільним для зменшення дефектів і стабілізації структури, хоча потребує більш ретельного налаштування параметрів.

Отримані результати мають практичне значення для індивідуального та малосерійного виробництва, особливо в галузях, де якість і стабільність деталей мають вирішальне значення. Відпал забезпечує значне розширення можливостей використання 3D-друкованих виробів у складних експлуатаційних умовах.

### ***3.5 Відпал в активних термокамерах FDM принтерів***

Друкування у 3D-принтерах з активною термокамерою створює ідеальні умови для керованого термічного впливу на матеріал під час формування кожного шару. Постійна температура у камері забезпечує рівномірний розподіл тепла, що сприяє релаксації залишкових напружень у матеріалі. Це дозволяє уникнути термоусадки, зменшити ризик розшарування і покращити адгезію між шарами вже в процесі друку[13].

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 72   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

Окрім цього, контрольована термокамера сприяє частковій кристалізації матеріалів, таких як PLA, PETG чи нейлон, ще до завершення друку. Цей процес аналогічний до відпалу, коли матеріал поступово переходить у більш стабільний стан, що підвищує його механічну міцність і зменшує внутрішні дефекти. Як результат, деталі стають більш витривалими і придатними для застосування в умовах підвищених навантажень[13].

Сучасні термокамери також забезпечують функцію поступового контрольованого відпуску та охолодження після завершення друку. Такий підхід мінімізує ризик раптових змін у структурі матеріалу, зменшує ймовірність утворення мікротріщин і запобігає деформаціям. Це дозволяє досягати стабільності форми та високої якості готових деталей без необхідності додаткових постпроцесів[13].

### ***3.6 Узагальнення теоретичних основ ремелтовання 3D-друкованих деталей у формах, заповнених дрібнодисперсними порошками.***

Застосування 3D-друкованих моделей у поєднанні з ремелтованням у формах, заповнених низькодисперсними порошками, є перспективним напрямком, що потребує детальнішого вивчення. Цей підхід пропонує інноваційний спосіб покращення властивостей полімерних виробів, орієнтований на подолання недоліків адитивного виробництва[23].

Один із можливих напрямків дослідження — вивчення ефективності різних порошкових матеріалів для заповнення форм. Сіль може бути обрана завдяки її високій теплопровідності та легкості видалення після обробки. Гіпс, своєю чергою, пропонує стабільність при високих температурах і можливість використання в умовах, де важлива мінімізація втрат матеріалу. Керамічні порошки можуть бути досліджені як альтернатива для спеціалізованих застосувань, наприклад, у виготовленні деталей, що потребують високої термостійкості.

Теоретичний підхід передбачає створення експериментальної установки, яка дозволить контролювати всі параметри процесу. Першим етапом буде

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 73   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

розробка форми, що забезпечує рівномірний розподіл порошку навколо деталі. Наступним кроком стане вивчення впливу температури нагрівання та часу витримки на властивості деталей. Важливим аспектом є також визначення оптимального способу видалення залишків порошку з поверхні готового виробу[23].

Потенційні результати дослідження можуть показати, що відпал у формах із порошковим заповненням здатний суттєво підвищити міцність і термостійкість виробів. Ця технологія може знайти застосування у різних галузях, включаючи авіацію, медицину та машинобудування. Наприклад, вона може бути використана для виготовлення деталей, що працюють у складних умовах підвищених температур або високого механічного навантаження.

Проте концепція має певні виклики, які потребують ретельного аналізу. Наприклад, необхідно оцінити ризик залишкових напружень, що можуть виникати через нерівномірне нагрівання. Також важливо дослідити, як різні порошкові матеріали впливають на поверхню та структуру деталей після відпалу[23].

Таким чином, концепція відпалу 3D-друкованих деталей у формах із заповненням порошками відкриває нові перспективи для вдосконалення технологій адитивного виробництва. Її реалізація потребує проведення експериментів і теоретичних досліджень, результати яких можуть стати основою для впровадження цієї методики в промисловість.

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 74   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У третьому розділі запропоновано та проаналізовано методи покращення процесу друку складнопрофільних полімерних деталей за допомогою FDM-технології. Розглянуто вплив ключових параметрів друку, таких як орієнтація моделі, висота шару та структура заповнення, на механічні властивості виробів. Встановлено, що правильна орієнтація друку та оптимізація висоти шару дозволяють значно підвищити міцність і точність деталей.

Досліджено застосування підтримок із матеріалів, відмінних від основного філаменту, таких як PVA або HIPS. Це дозволяє зменшити пошкодження поверхонь і полегшує видалення підтримок, що важливо для друку деталей зі складною геометрією.

Проаналізовано можливості армування деталей волокнами, що суттєво підвищує їхню міцність і жорсткість. Визначено, що армування доцільне для деталей, які зазнають високих механічних навантажень.

Досліджено процес відпалу 3D-друкованих деталей, який забезпечує зменшення внутрішніх напружень, покращення механічної міцності, термостійкості та стабілізацію геометричних параметрів. Отримані результати демонструють, що відпал є ефективним методом для покращення якості деталей, особливо виготовлених із PLA, ABS та ASA, завдяки активному процесу кристалізації. Окрім того, детально вивчено метод ремелтовання у формах, заповнених дрібнодисперсними порошками, який показав значний потенціал у підвищенні щільності та однорідності матеріалу, що відкриває нові можливості для створення складнопрофільних полімерних деталей із покращеними експлуатаційними властивостями.

Таким чином, запропоновані підходи забезпечують покращення механічних властивостей, точності та зовнішнього вигляду складнопрофільних деталей, розширюючи можливості FDM-технології для виробництва складних і функціональних виробів.

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 75   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено детальний аналіз літературних і технічних джерел, спрямованих на вдосконалення технології виготовлення складнопрофільних полімерних деталей за допомогою 3D-друку. На основі проведених досліджень окреслено основні напрями покращення якості деталей та запропоновано ефективні рішення для їх реалізації.

Досліджено вплив параметрів друку, таких як орієнтація шару, висота шару та структура заповнення. Результати показали, що оптимізація цих параметрів дозволяє підвищити механічну міцність деталей, зменшити деформації та досягти більшої економічності процесу. Також встановлено, що використання альтернативних матеріалів для підтримок значно спрощує їх видалення, знижує ризик пошкодження друкованих деталей та зменшує витрати матеріалів.

Аналіз сучасних технологій підтвердив, що армування волокнами, такими як скловолокно або карбон, є високоефективним підходом до підвищення механічних характеристик деталей. Цей метод доцільно застосовувати для деталей, які працюють у високонавантажених умовах, забезпечуючи їх довговічність і надійність.

Особливу увагу приділено відпалу як методу термічної обробки, що сприяє зменшенню залишкових напружень, стабілізації геометричних параметрів і підвищенню термостійкості деталей. Проведені дослідження підтвердили, що відпал є особливо корисним для полімерів із високою кристалізаційною здатністю, таких як PLA, ABS і ASA. Цей підхід рекомендовано для дрібносерійного виробництва, де необхідна висока якість продукції.

Розглянуто перспективний метод ремелтовання 3D-друкованих деталей у формах із дрібнодисперсними порошками. Ця технологія дозволяє зменшити пористість, підвищити щільність і однорідність матеріалу, покращуючи як механічні властивості, так і естетичний вигляд виробів.

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                               | 76   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               |      |

Узагальнення результатів підтвердило, що впровадження запропонованих підходів дозволить підвищити якість складнопрофільних деталей, розширити сфери застосування 3D-друку та знизити витрати на виготовлення. Запропоновані рішення відповідають сучасним тенденціям розвитку адитивних технологій, орієнтованим на використання інноваційних підходів та зменшення впливу на навколишнє середовище.

Робота закладає міцний фундамент для подальших досліджень і розробок у сфері адитивного виробництва, спрямованих на вдосконалення властивостей полімерних матеріалів, оптимізацію технологічних процесів та впровадження новітніх методів обробки.

|             |             |                 |               |             |                               |      |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------------|------|
|             |             |                 |               |             | <i>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</i> | Арк. |
|             |             |                 |               |             |                               | 77   |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                               |      |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чи безпечний 3D-друк. Американська асоціація промислової гігієни. 3 травня 2017.
2. «Безпека 3D-друку» (PDF). Здоров'я та безпека доквілля Університету Карнегі-Меллона.
3. Джейн Бьорд (8 серпня 2012 р.). «Вивчення можливостей 3D-друку». FinancialTimes.
4. Європейське агентство з безпеки та охорони здоров'я (7 червня 2017 р.). «3D-друк і моніторинг працівників: нова промислова революція?».
5. Лам, Г'юго К.С.; Дін, Лі; Чжоу, Хонген (1 січня 2019 р.). «Вплив впровадження 3D-друку на дохідність акцій: перспектива випадкових динамічних можливостей». Міжнародний журнал операцій та управління виробництвом. 39(6/7/8): 935–961. DOI: 10,1108 / IJOPM-01-2019-0075. ISSN 0144-3577.
6. М. Ленстер, «Речі проходять повз» у «Земля в небезпеці» (вид. Д. Воллхейма). Ace Books 1957, США, List\_of\_Ace\_SF\_double\_titles D-205, стор. 25, Standard Magazines Inc.
7. 3D Printers with Different Kinematics: Comparison, Advantages and Disadvantages <https://top3dshop.com/blog/3d-printer-kinematics-explained>
8. CoreXY Kinematics <https://3ddistributed.com/corexy-3d-printer/corexy-kinematics/>
9. Delta geometry [https://reprap.org/wiki/Delta\\_geometry](https://reprap.org/wiki/Delta_geometry)
10. Delta Robot Kinematics [https://reprap.org/mediawiki/images/b/b5/Rostock\\_Delta\\_Kinematics\\_3.pdf](https://reprap.org/mediawiki/images/b/b5/Rostock_Delta_Kinematics_3.pdf)
11. Cameron Coward, Four-Axis 3D Printing with an Innovative, Completely Unique Kinematic System <https://www.hackster.io/news/four-axis-3d-printing-with-an-innovative-completely-unique-kinematic-system-a0e50388d720>
12. Why heated chamber is important in 3D printing [https://minifactory.fi/heated-chamber-in-3d-printing/?utm\\_source=chatgpt.com](https://minifactory.fi/heated-chamber-in-3d-printing/?utm_source=chatgpt.com)

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               | 78   |

13. Does a HEATED CHAMBER make your 3D prints STRONGER?

[https://www.cnckitchen.com/blog/does-a-heated-chamber-make-your-3d-prints-stronger?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.cnckitchen.com/blog/does-a-heated-chamber-make-your-3d-prints-stronger?utm_source=chatgpt.com)

14. R. M. Kshirsagar, Dr. R. B. Ingle, Y. P. Tidke and D. B. Vaitkar, ESSENTIAL PROCESS PARAMETERS TO BE CONSIDERED FOR FUSED DEPOSITION MODELING, International Journal of Advance and Innovative Research Volume 11, Issue 1 (V): January - March, 2024, ISSN 2394 - 7780

15. Lalegani Dezaki et. al., "An overview of fused deposition modelling (FDM): research, development and process optimisation", Rapid Prototyping Journal, Vol. 27 No. 3, pp. 562-582 [accessed april 2021]

16. Naomi C. Paxton, Jiachen Zhao & Emilie Sauret, Polymer 3D printing in perspective: Assessing challenges and opportunities in industrial translation against the metal benchmark, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2024), <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-024-13744-z>

17. Syed Fouzan Iftekar, Abdul Aabid, Adibah Amir & Muneer Baig, Advancements and Limitations in 3D Printing Materials and Technologies: A Critical Review, Polymers 2023, 15(11), 2519; <https://doi.org/10.3390/polym15112519>

18. Найпопулярніші дефекти 3Д друку та їх усунення  
<https://tucans.com.ua/najpopulyarnishi-defekti-3d-druku-ta-yih-usunennya>

19. Md Manjurul Ahsan, Shivakumar Raman, Zahed Siddique, Defect Analysis of 3D Printed Cylinder Object Using Transfer Learning Approaches, Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV); Machine Learning (cs.LG)  
<https://arxiv.org/abs/2310.08645>

20. Strategien zur Faserverstärkung, <https://www.mark3d.com/de/mark3d-news/strategien-zur-faserverstaerkung/>

21. 3D Printing Settings Impacting Part Strength,  
<https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/understanding-3d-printing-strength/3d-printing-settings-impacting-part-strength>

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               | 79   |

22. Strengthen PLA Prints By Annealing, <https://www.fabbaloo.com/blog/strengthen-pla-prints-by-annealing>
23. Jakub Kočí, How to improve your 3D prints with annealing, [https://blog.prusa3d.com/how-to-improve-your-3d-prints-with-annealing\\_31088](https://blog.prusa3d.com/how-to-improve-your-3d-prints-with-annealing_31088)
24. Testing the strength of 3D prints re-melted in salt, <https://www.cnckitchen.com/blog/testing-the-strength-of-3d-prints-re-melted-in-salt>.

|      |      |          |        |      |                               |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                               | 80   |

**ДОДАТКИ**

|             |             |                 |               |             |                               |      |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------------|------|
|             |             |                 |               |             | <b>МРТАМ 24. 23654.000 ПЗ</b> | Арк. |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                               | 81   |

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

# Вдосконалення технології виробництва складнопрофільних полімерних деталей за допомогою 3D-друку

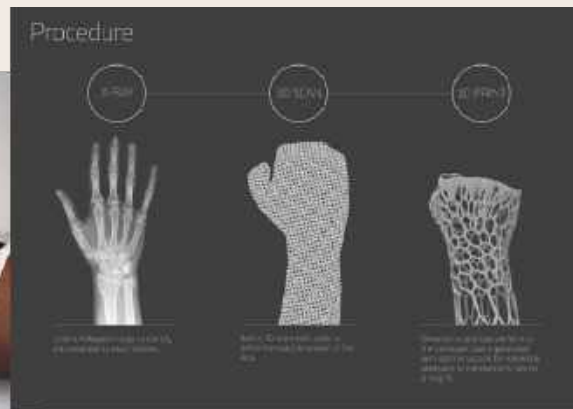
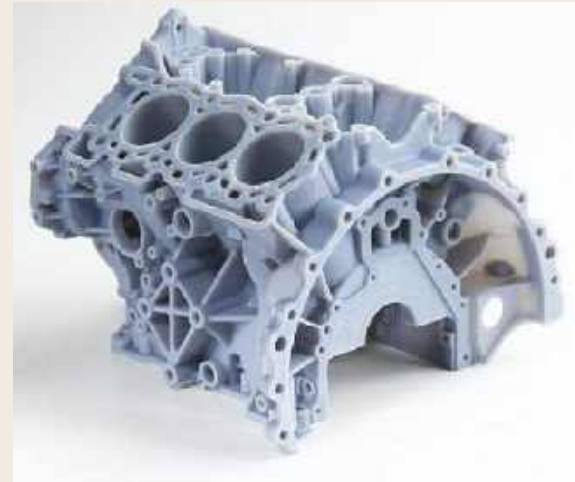
Титаренко Сергій Борисович

# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

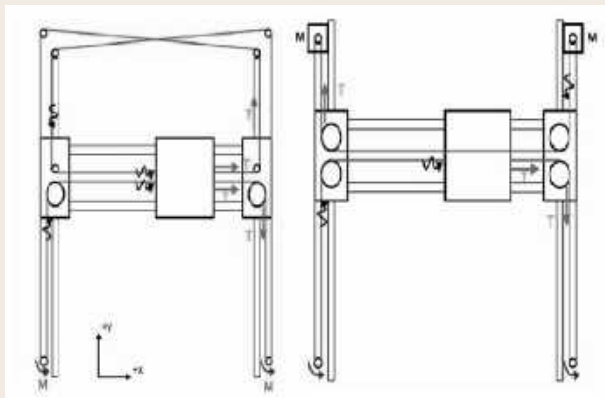
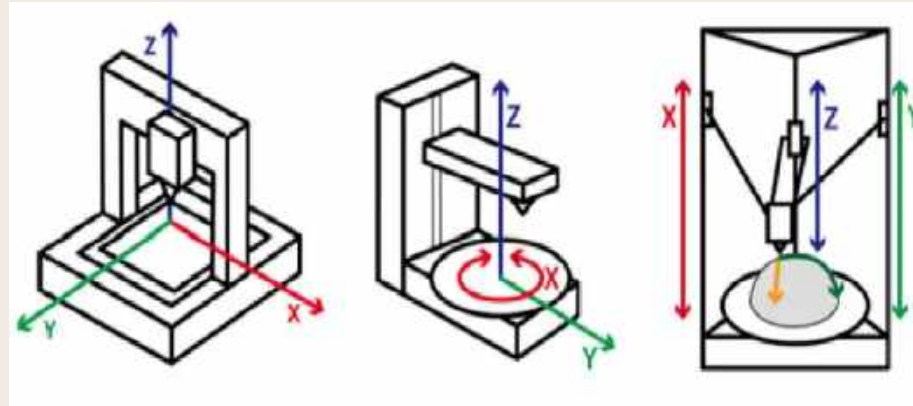
Основним способом підвищення якості 3D-друкованих полімерних деталей є оптимізація параметрів друку та застосування методів термічної й структурної обробки, що дозволяє усунути геометричні дефекти, покращити механічні характеристики та підвищити експлуатаційну надійність виробів. Аналіз існуючих технологічних рішень виявив обмеження традиційних методик, що зумовлює необхідність розробки нових підходів на основі сучасних досліджень та інженерних методів.

Зважаючи на актуальність проблеми виготовлення складнопрофільних полімерних деталей, у цій роботі розглянуто питання оптимізації параметрів процесу 3D-друку та застосування додаткових методів обробки для підвищення якості виробів. Супутніми завданнями є аналіз впливу армування волокнами, дослідження ефективності відпалу для стабілізації розмірів та зменшення внутрішніх напружень, а також обґрунтування теоретичної бази ремелтовання у формах із дрібнодисперсними порошками. На основі проведених досліджень пропонується комплексний підхід до вдосконалення процесу виробництва, що дозволяє значно покращити властивості готових полімерних деталей.

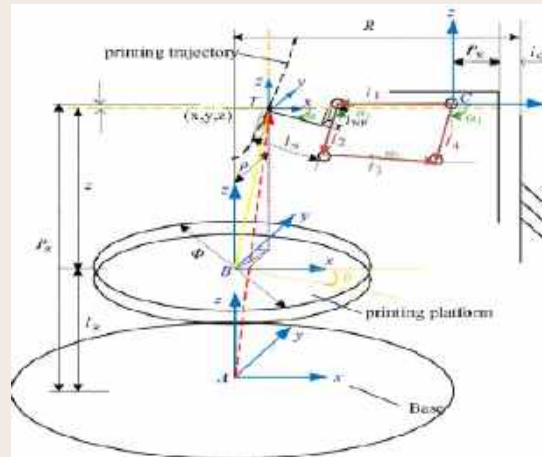
# Приклади складно профільних деталей



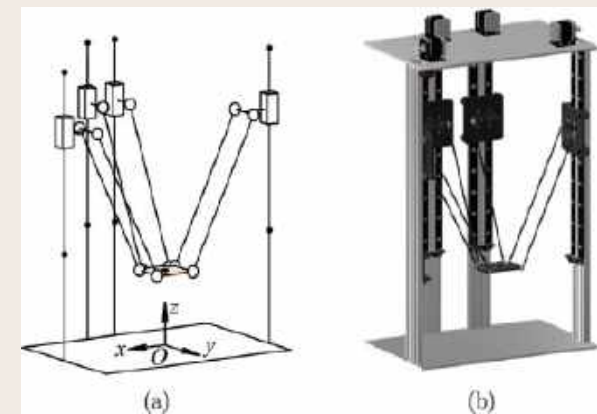
# Типи кінематики 3D принтерів



Схеми кінематики  
H-Bot та CoreXY

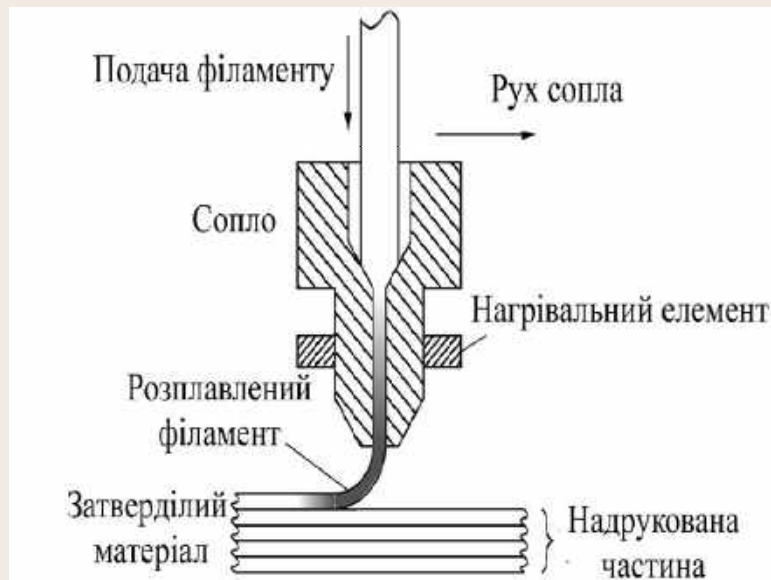


Кінематика  
полярного 3D-  
принтера

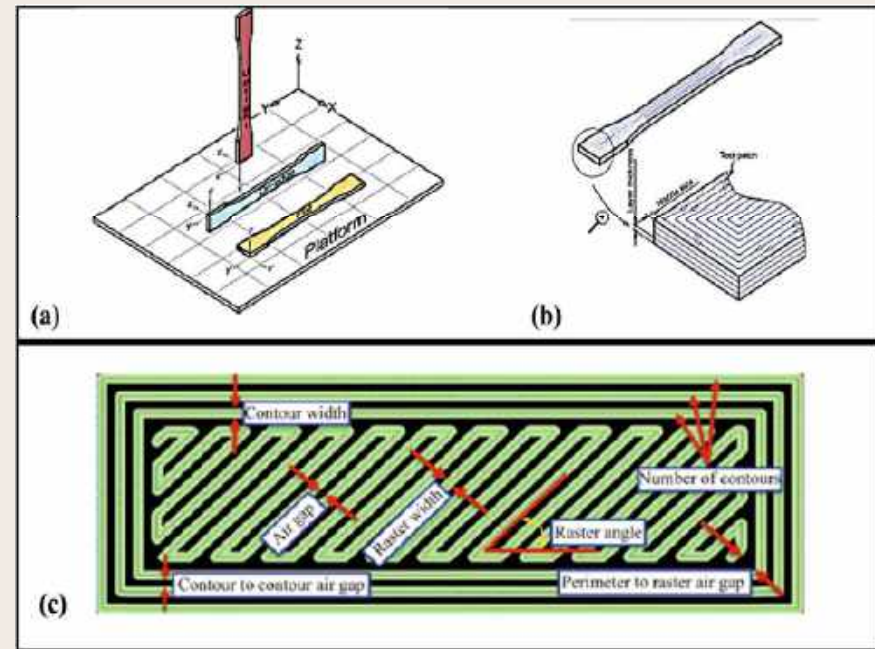


Кінематика  
Дельта-принтера  
та загальний  
вигляд

# Особливості процесу 3D друку



Процес 3D друку

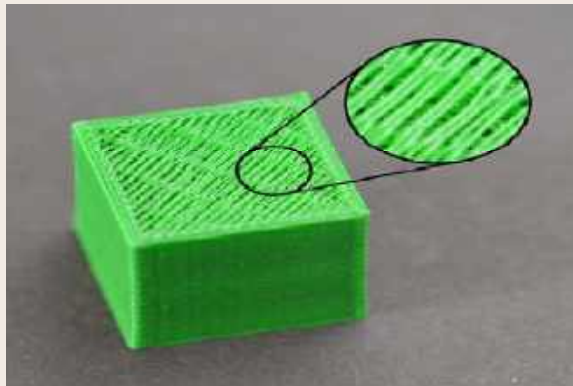


Параметри траєкторії та позиціонування

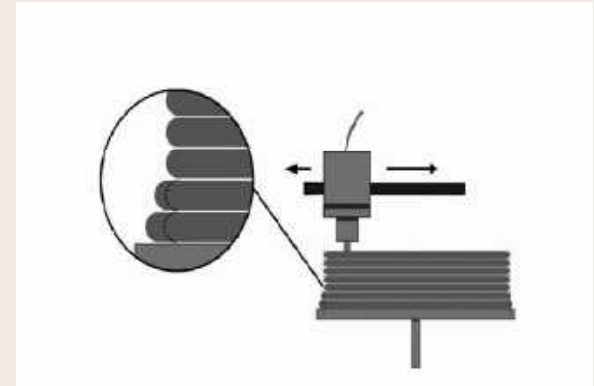
# Дефекти 3D друку



Розслаюння

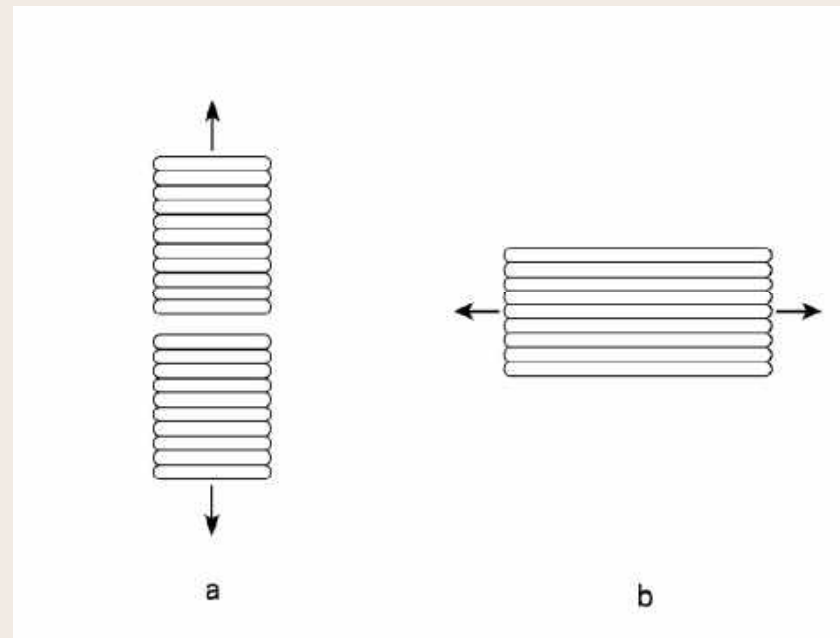


Недостатнє  
заповнення



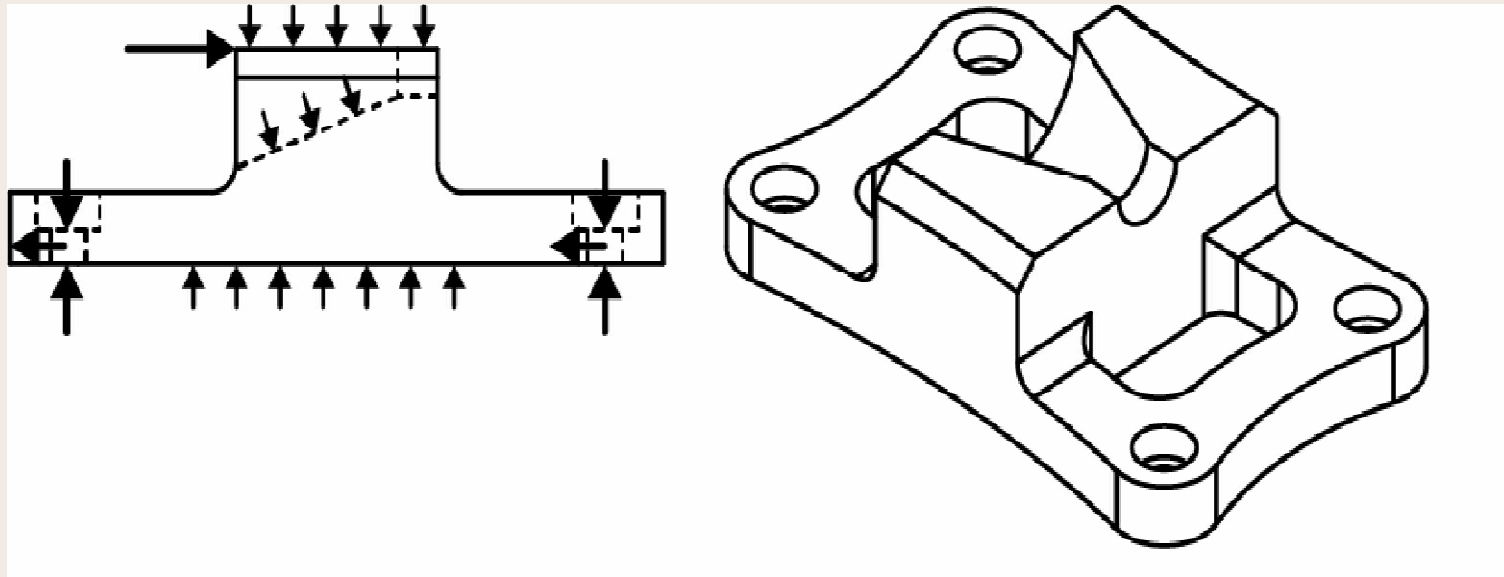
“Слонова  
нога”

# Вплив орієнтації та висоти шару на загальну міцність деталі



Сили що діють на деталь  
в різних площинах  
деталі

# Візуалізація механічних навантажень на поверхні моделі



# Патерни заповнення 3D друкованої

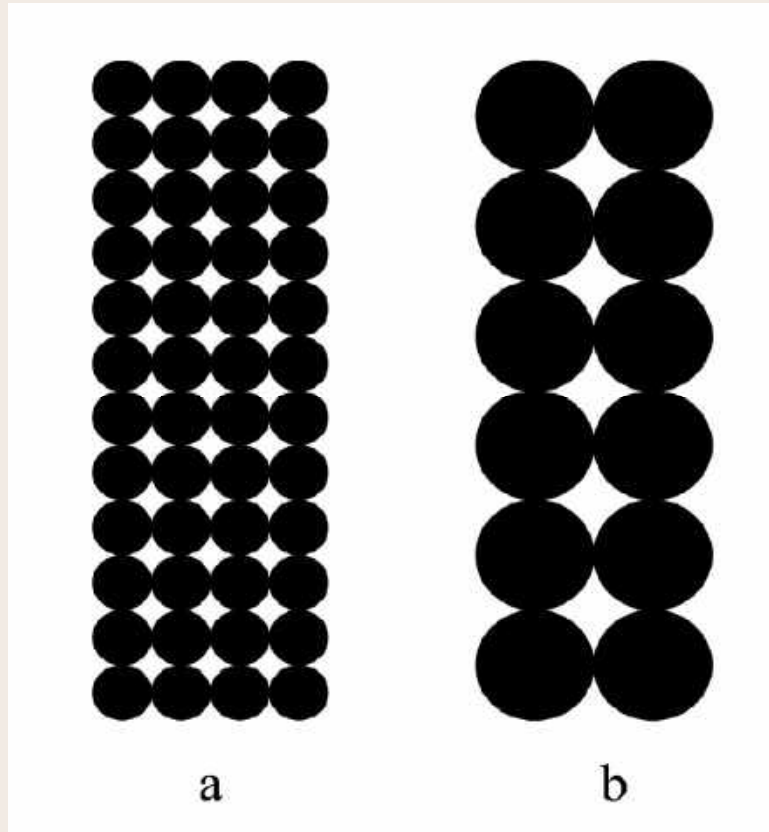
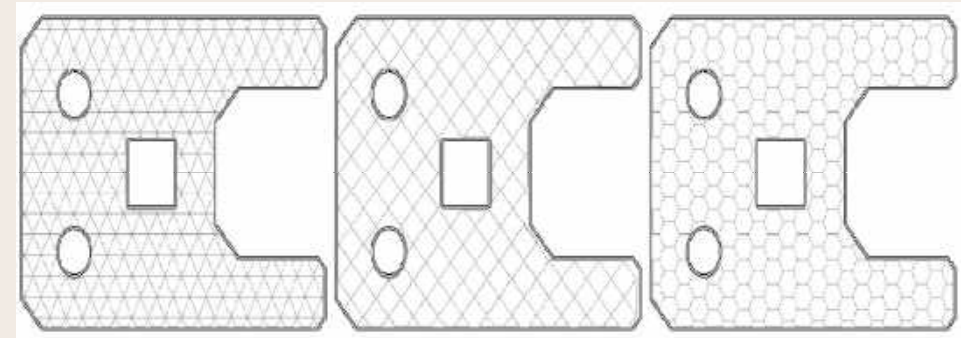


Схема перерізу щільності заповнення



Приклади геометрії заповнення

# Використання іншого типу філаменту для підтримок

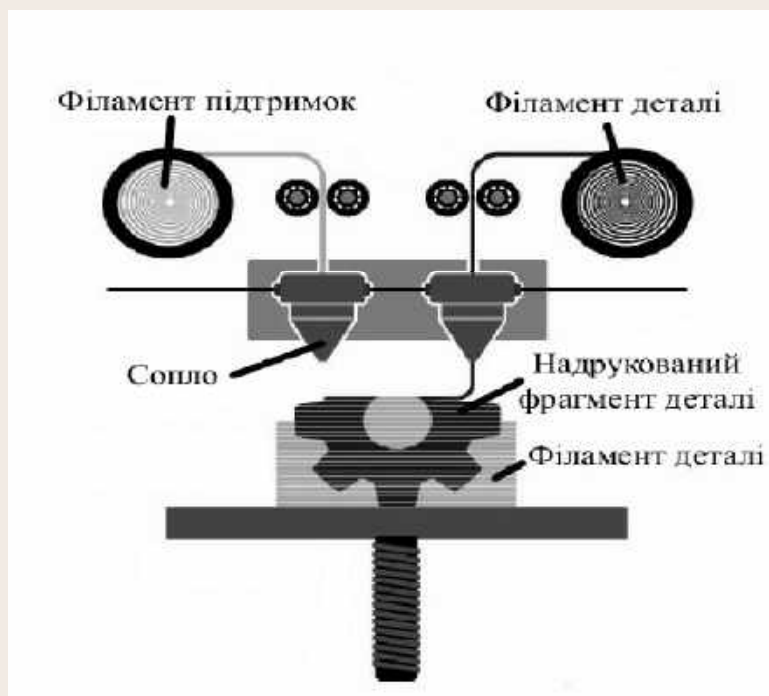
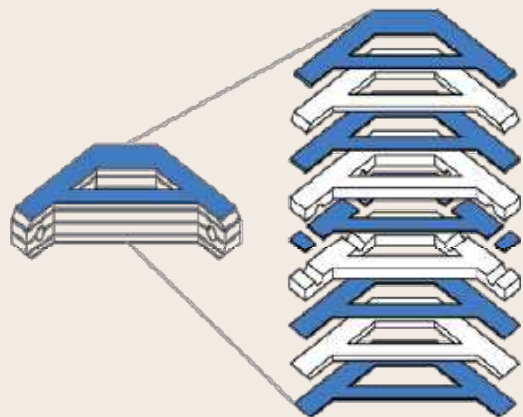


Схема друку складнопрофільної деталі з підтримками

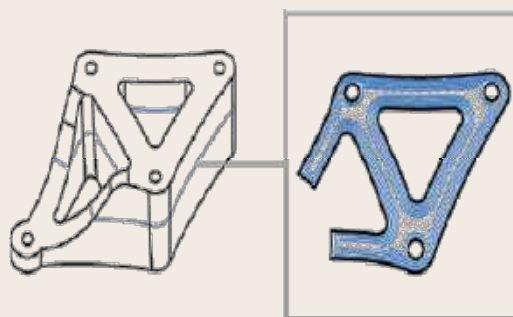


Приклад надрукованої деталі із підтримками з іншого філаменту

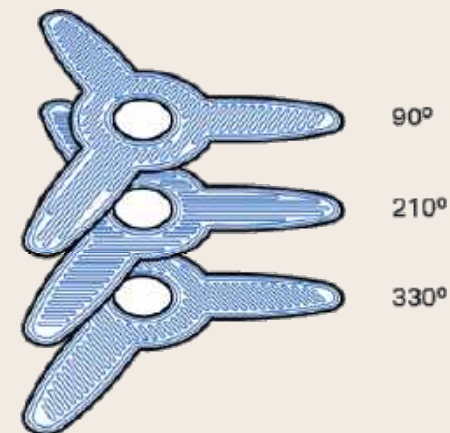
# Стратегії армування волокнами



Смугове армування  
панелей

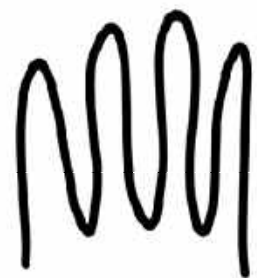


Направлене армування  
через ребра



Контроль кутів  
волокон

# Відпал



a



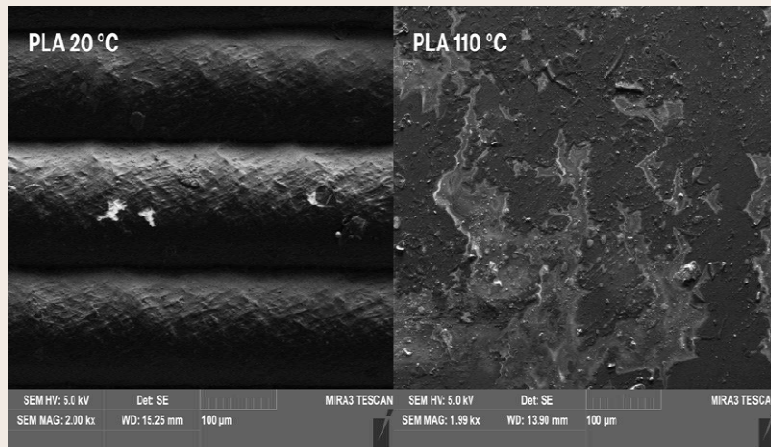
b



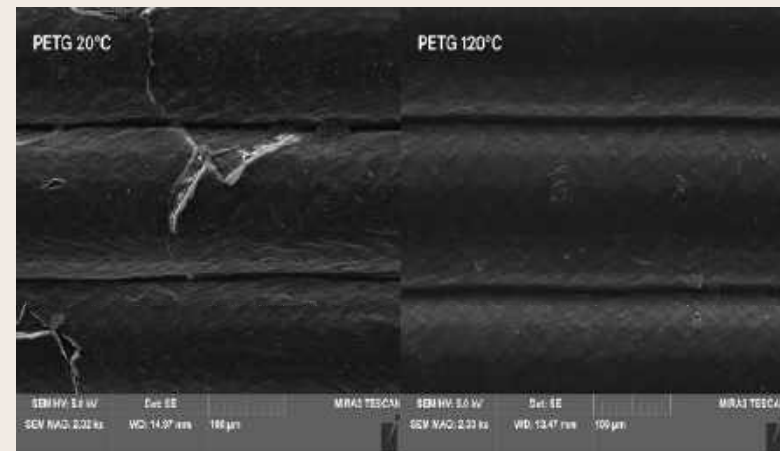
c

Структура кристалічних полімерних ланцюгів

# Зразки відпалу PLA та PETG

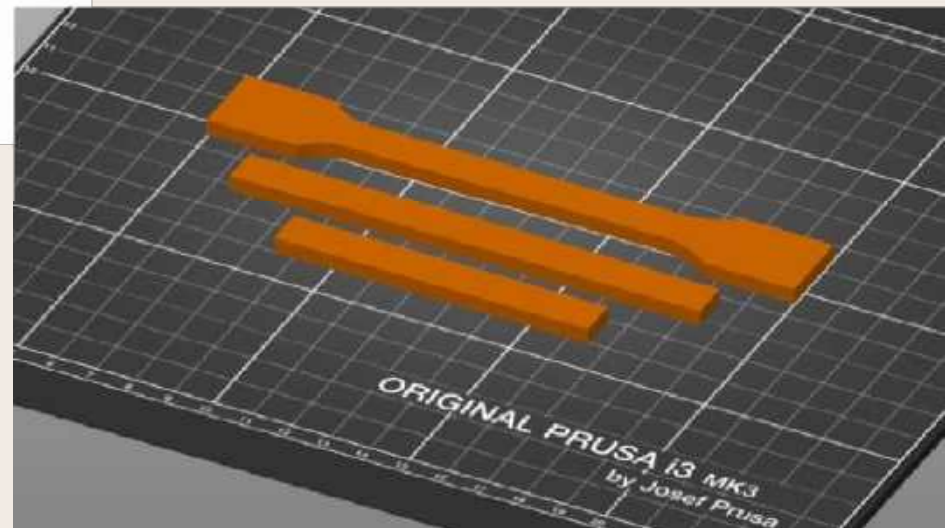
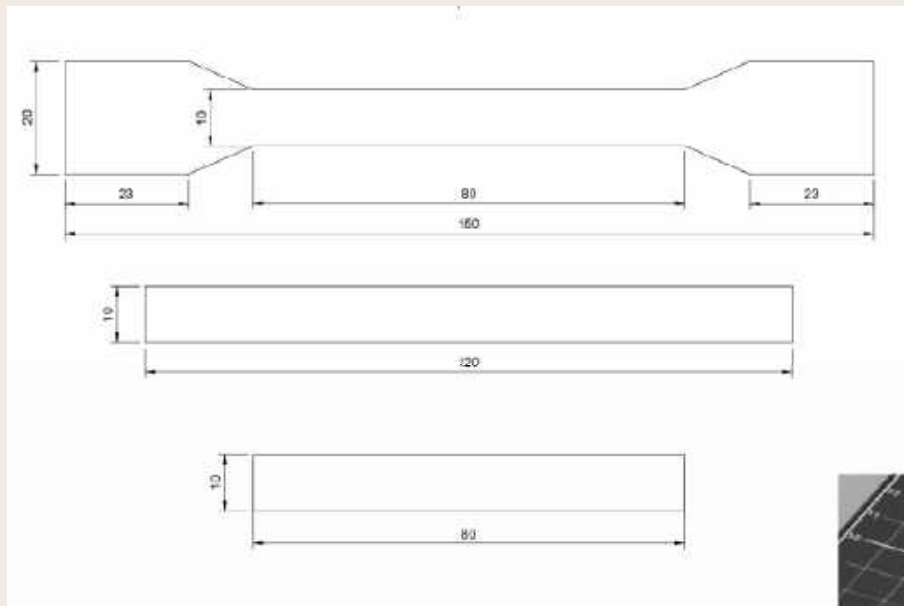


Порівняння необробленого та відпаленого зразка PLA

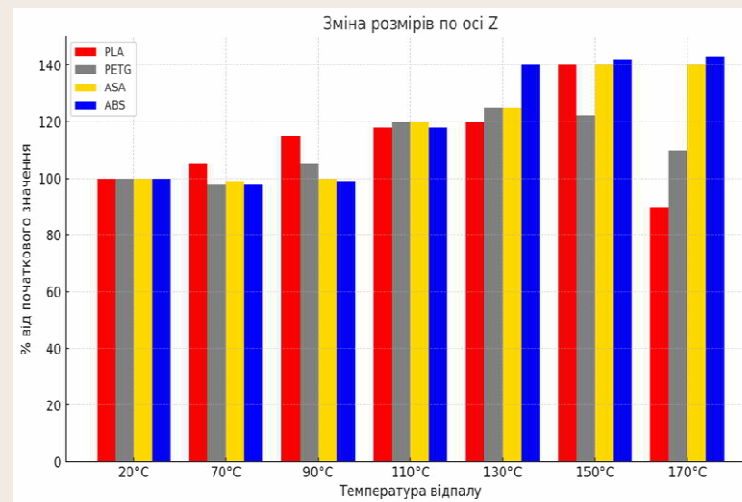
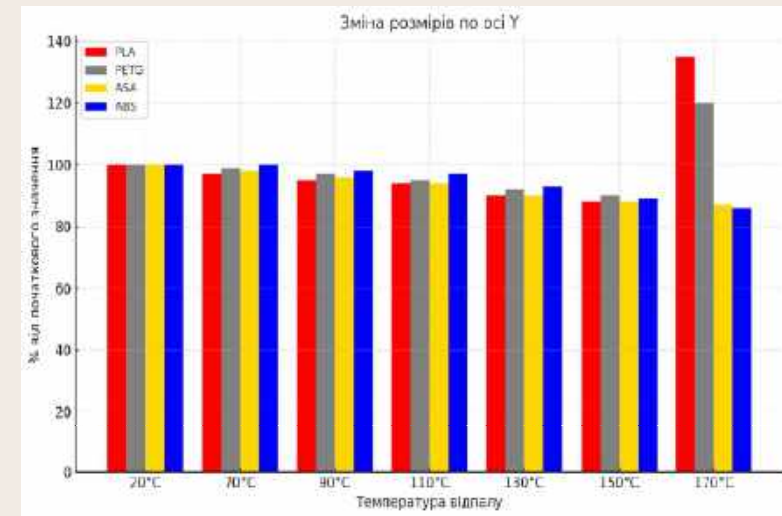
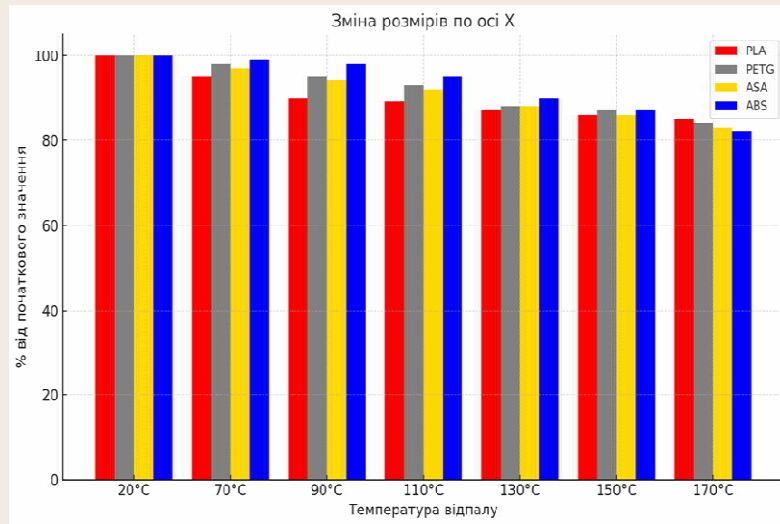


Порівняння необробленого та відпаленого зразка PETG

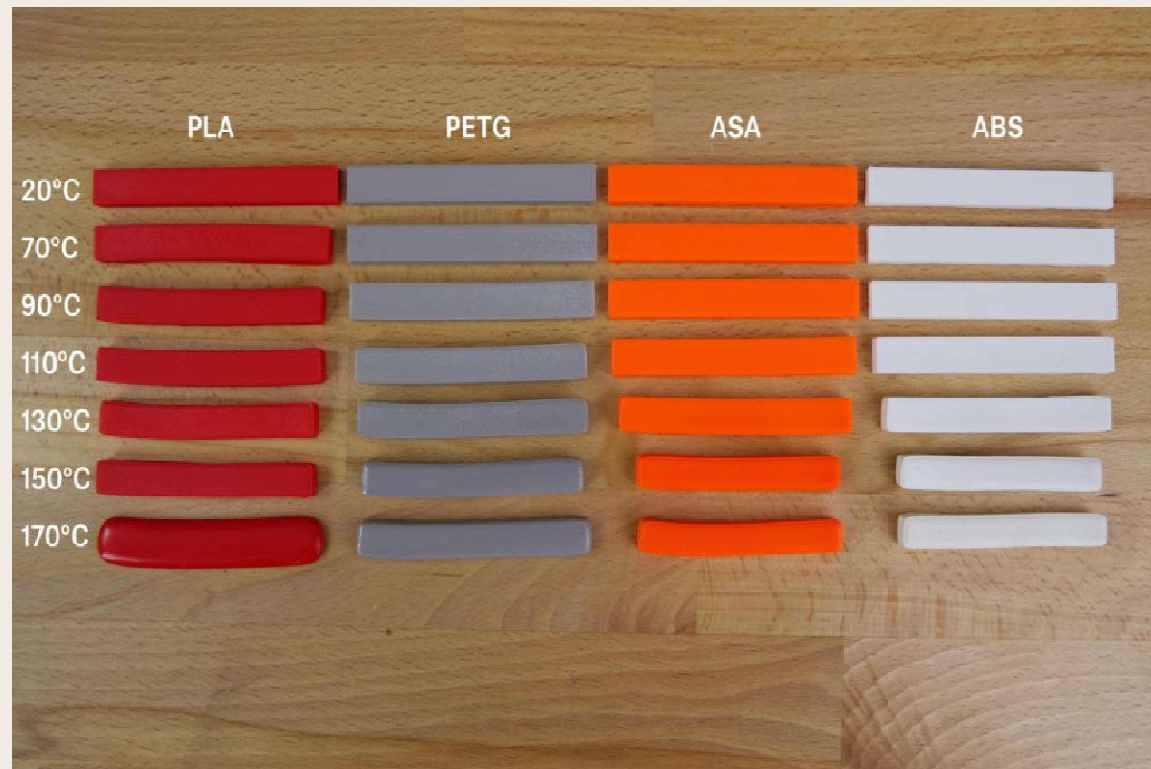
# Приклад зразків для досліджень



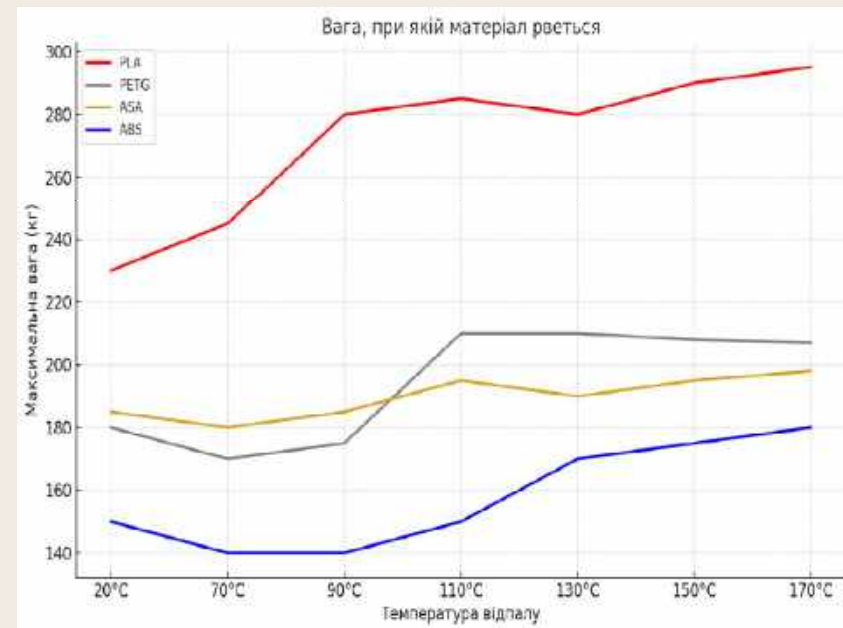
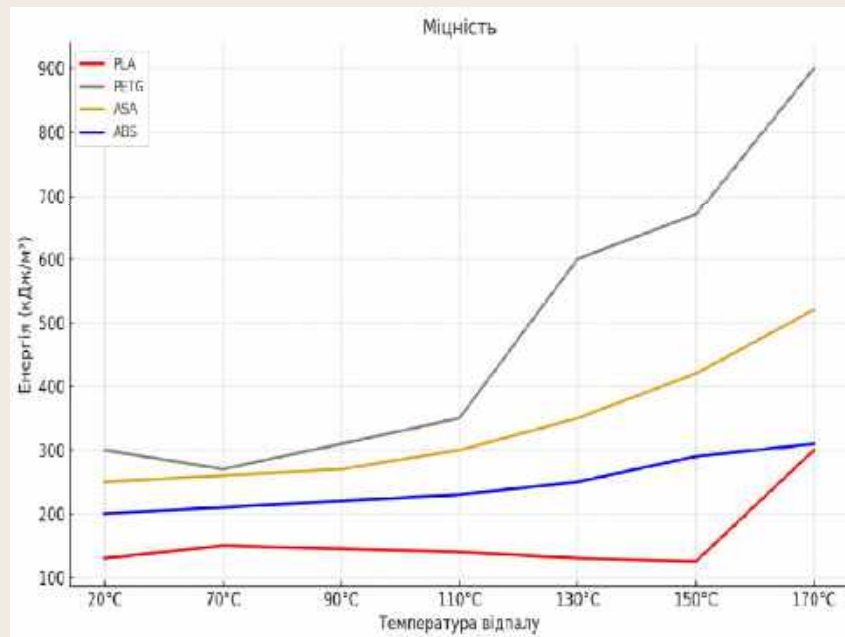
# Відхилення розмірів під впливом температури у різних площинах



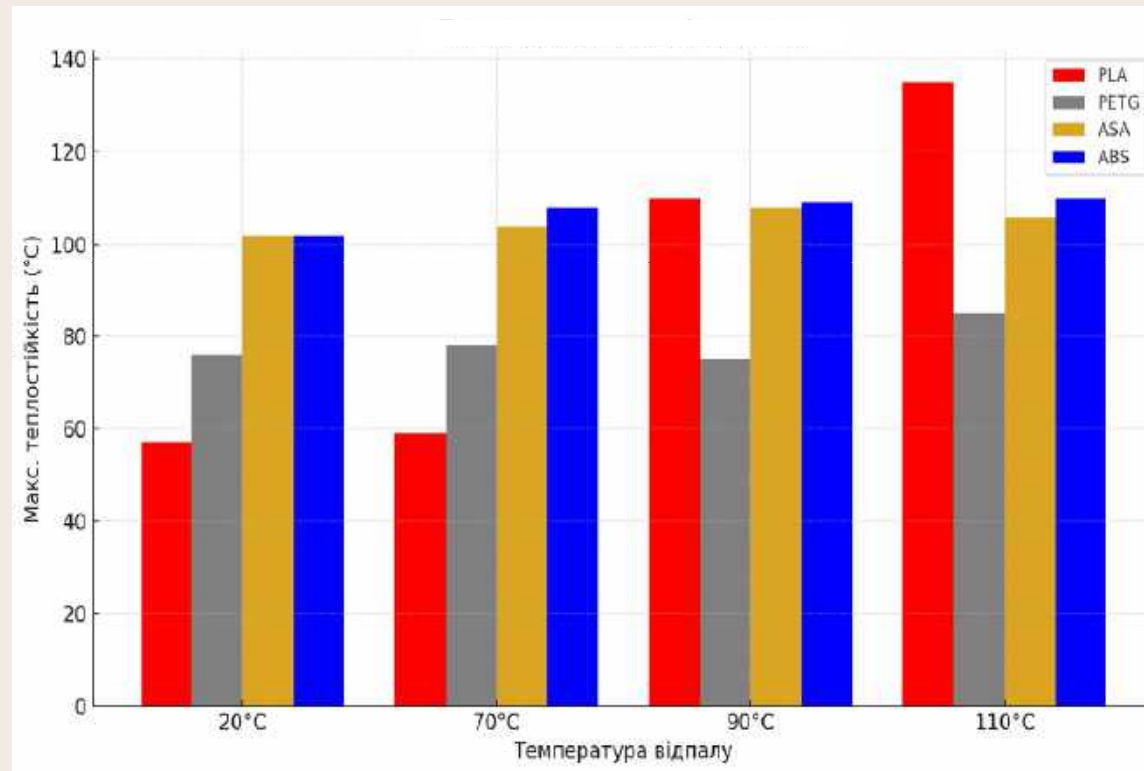
# Вигляд зразків після відпалу під впливом температури



# Зміна фізичних характеристик міцності в залежності від температури відпалу



# Зміна термостійкості філаментів після відпалу



# Висновок

Метою даної роботи було вдосконалення технології виробництва складнопрофільних полімерних деталей методом 3D-друку з використанням FDM-технології. Робота спрямована на підвищення якості деталей шляхом оптимізації параметрів друку та застосування додаткових методів обробки.

У першому розділі розглянуто історичний розвиток технології FDM-друку, проаналізовано основні матеріали та їх властивості, а також вплив кінематики принтерів і термокамер на процес виготовлення.

Другий розділ присвячено виявленню проблем, що виникають при виготовленні складнопрофільних деталей, зокрема дефектів поверхні, геометричних неточностей та зниження механічних характеристик.

У третьому розділі запропоновано шляхи вдосконалення процесу 3D-друку, серед яких оптимізація параметрів друку для покращення механічних властивостей, використання армування волокнами для підвищення міцності, застосування відпалу для стабілізації розмірів і зменшення внутрішніх напружень, а також перспективний метод ремелтовання для підвищення щільності та однорідності матеріалу.

Сформована теоретична база для ремелтовання 3D-друкованих деталей у формах, заповнених дрібнодисперсними порошками, дозволяє оцінити вплив цього методу на покращення щільності, зменшення пористості та підвищення однорідності матеріалу. Ремелтовання розглядається як перспективний напрям для підвищення якості полімерних виробів, зокрема їх механічних та експлуатаційних характеристик, але цей метод потребує подальших досліджень для оптимізації параметрів процесу та впровадження в практичне виробництво.

Таким чином, за результатами даної роботи запропоновано ефективні підходи до покращення якості складнопрофільних полімерних деталей, що дозволяє вважати поставлені цілі досягнутими. Запропоновані методи можуть бути застосовані у процесі виготовлення деталей з використанням 3D-друку

Дякую за увагу