Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра Машинобудування, транспорту і зварювання

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Професійна підготовка фахівця машинобудівних підприємств з підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією FDM

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 5 курсу, групи ДПОМ24мг
спеціальності:015.34«Професійна освіта (Машинобудування)»
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

_____/Владислав ОСИПЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/Антон СКОРКІН
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/Вікторія КНЯЗЄВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

*«До захисту допущено»*

Завідувач кафедри _____/Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/ Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/Валентина СКОРКІНА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. КАРАЗІНА

Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра машинобудування, транспорту і зварювання
Спеціальність 015.34 Професійна освіта (Машинобудування)
Освітньо-професійна програма Професійна освіта (Машинобудування)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МТіЗ
_____ О.С. Подоляк
"06" 10 _____2025 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти

студенту (ці) Владиславу ОСИПЕНКО
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Професійна підготовка фахівця машинобудівних підприємств з підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією FDM

затверджена наказом 4801-5/3664 від 06.10. 2025 р.

2. Термін здачі магістрантом закінченої роботи " 01 " грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: *Зразки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити): *Вступ. Актуальність професійної підготовки фахівця машинобудівних підприємств з підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією fdm. Аналіз способів виробництва виробів з полімерних композиційних матеріалів в аддитивних технологіях. Розробка теоретичних основ технології п'ятиосівного друку з армуванням. Розробка дидактичного проєкту факультативного заняття на тему «підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією fdm». Висновки. Список джерел інформації. Додатки.*

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів: *У вигляді презентації PowerPoint.*

6. Консультант:

| Розділ | Консультант | Підпис, дата | | Оцінка (бали) |
|---|---|---|---|---|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв | |
| педагогічний | Синельник І.В. | | | |

7. Дата видачі завдання «7» 10 2025р.

Керівник _____ Антон СКОРКІН
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Владислав ОСИПЕНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

# КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
## виконання кваліфікаційної роботи

| № з/п | Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання | Термін виконання | Позначки керівника про виконання завдань |
|---|---|---|---|
| 1. | Вибір теми й обґрунтування проблеми дослідження. Визначення об'єкта, предмета, мети й завдань. | | |
| 2. | Складання плану роботи. Підбор літератури й інших джерел | | |
| 3. | Оформлення завдання проектування для затвердження теми кваліфікаційної роботи | | |
| 4. | Підготовка аналітичної частини | | |
| 5. | Підготовка теоретичної частини | | |
| 6. | Розробка дослідницької частини | | |
| 7. | Розробка методичного розділу | | |
| 8. | Підготовка графічного матеріалу | | |
| 9. | Доробка проекту по зауваженнях наукового керівника | | |
| 10. | Доробка проекту по зауваженнях консультантів | | |
| 11. | Оформлення кваліфікаційної роботи. Підготовка до захисту. | | |
| 12. | Захист кваліфікаційної роботи | | |

Здобувач вищої освіти _____ Владислав ОСИПЕНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

Нормоконтроль _____ Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я, прізвище)

# ЗМІСТ


| | |
|---|---|
| Вступ | 7 |
| Розділ 1 Актуальність професійної підготовки фахівця машинобудівних підприємств з підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією fdm | 10 |
| 2 Аналіз способів виробництва виробів з полімерних композиційних матеріалів в аддитивних технологіях | 22 |
| 3 Розробка теоретичних основ технології п'ятиосівного друку з армуванням | 35 |
| 4 Практична реалізація технології п'ятиосівної друку з армуванням | 47 |
| 5 Експериментальне дослідження взаємозв'язків між технологічними параметрами друку з армуванням і характеристиками армованого виробу | 58 |
| Розділ 6 Розробка дидактичного проєкту факультативного заняття на тему «підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією fdm» | 67 |
| Висновки | 89 |
| Список використаних джерел | 90 |

Реферат магістерської кваліфікафійної роботи з теми “ 9. Професійна підготовка фахівця машинобудівних підприємств з підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією FDM ”

**РЕФЕРАТ**

Робота містить 91с., 44 рис., 18 табл., 23 джерел.

Кваліфікаційна робота (дипломний проєкт) присвячений науковому обґрунтуванню та вдосконаленню системи підготовки фахівців машинобудівних підприємств з підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією FDM.

У першому розділі розглянуто Актуальність професійної підготовки фахівця машинобудівних підприємств з підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією fdm.

У другому розділі виконано Аналіз способів виробництва виробів з полімерних композиційних матеріалів в аддитивних технологіях.

У третьому розділі виконано Розробка теоретичних основ технології п'ятиосьового друку з армуванням.

У четвертого розділі Практична реалізація технології п'ятиосьового друку з армуванням.

У п’ятому розділі Експериментальні дослідження впливу режимів різання на вихідні параметри.

Запропонована методика може бути покладена в основу інноваційних технологій під час навчання для отримання кваліфікованих фахівців машинобудівної галузі.

***Ключові слова***: професійна підготовка, машинобудівна галузь, фахівець, адитивне виробництво, полімерні композити

Abstract of the master's qualification work on the topic “9. Professional training of specialists of machine-building enterprises to increase the strength characteristics of products obtained by the additive manufacturing method using five-axis FDM technology”


## ABSTRACT

The work contains 91 pages, 44 figures, 18 tables, 23 sources.

The qualification work (diploma project) is devoted to the scientific substantiation and improvement of the system of training specialists of machine-building enterprises to increase the strength characteristics of products obtained by the additive manufacturing method using five-axis FDM technology.

The first section considers the relevance of professional training of specialists of machine-building enterprises to increase the strength characteristics of products obtained by the additive manufacturing method using five-axis FDM technology.

The second section analyzes the methods of manufacturing products from polymer composite materials in additive technologies.

In the third section, the development of theoretical foundations of the technology of five-axis printing with reinforcement is carried out.

In the fourth section, the practical implementation of the technology of five-axis printing with reinforcement.

In the fifth section, experimental studies of the influence of cutting modes on the output parameters.

The proposed methodology can be used as the basis for innovative technologies during training to obtain qualified specialists in the mechanical engineering industry.



**Keywords:** professional training, mechanical engineering industry, specialist, additive manufacturing, polymer composites

# ВСТУП

Поточний етап у розвитку адитивних технологій характеризується їх активним проникненням у різні галузі виробництва та пошуком виробів, для виробництва яких вони найкраще підходять. Цей процес має ряд обмежень, пов'язаних з принципово непереборними особливостями адитивного виробництва: температурною усадкою розплаву матеріалу після його укладання, шаруватою структурою виробів, що отримуються, невисокою продуктивністю. Крім того, у технології пошарового напрямку матеріалу (Fused Deposition Modeling, FDM) найбільш істотними залишаються такі недоліки, як анізотропія властивостей виробів (що виражається в низькій міцності на межах розділу послідовно накладених шарів) і низька міцність полімерних матеріалів, що використовуються в даній технології.

Найбільш поширеним підходом до підвищення міцності виробів у технології FDM є застосування полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), в першу чергу – ПКМ з дискретними армуючими наповнювачами, що є дрібними включеннями в розплав, такі як мікрогранули або короткі волокна (наприклад, вуглеволокно або скловолокно з діаметром поряд0 мкм). Дослідженню таких матеріалів присвячені роботи багатьох авторів, наприклад, GD Goh, I. Blanco, S. Dev Nath, E. Yasa, RW Gray, W. Zhong, ML Shofner та ін.

На даний момент єдиним способом принципово збільшити міцність виробів FDM технології є використання армуючих матеріалів з безперервними волокнами. Роботи C. Savandaiah, K. Chang, G. Fang, JB Robles, F. Safari, X. Tian, A, Todoroki, А. Н. Полілова, А. В. Малахова присвячені різним аспектам застосування безперервних волокон у FDM друку від питань виготовлення армуючого джгута до розробки оптимальних траєкторій армування. Залежно від технології та вмісту волокон при стандартних випробуваннях на розтягування межа міцності σрм армованих зразків становить від 700 до 1500 МПа, модуль пружності E – від 40 до 80 ГПа (при максимумі в σрм ≈ 100 МПа та E ≈ 13 ГПа для 3D-друкованих ком. При цьому міжшарова міцність

армованих виробів забезпечується властивостями полімерного матеріалу матриці тією ж мірою, що і стандартної технології FDM друку.

Як програмне забезпечення, так і саме компонування обладнання повинні забезпечувати більшу гнучкість у виборі технологічних параметрів армування. У разі адитивних технологій гнучкість завжди є однією з ключових особливостей, однак загальновідомі способи FDM друку з армуванням однаково обмежені у своїх можливостях: армувати при 3D друку можна лише таку деталь, яку можна раціонально позиціонувати в трьохкоординатній системі переміщення платформи побудови та друкувальної голівки.

**Об'єкт дослідження** – процес професійної підготовки фахівців машинобудівних підприємств у сфері застосування адитивних технологій, зокрема п'ятиосьової FDM-друку, для забезпечення високих міцнісних характеристик виробів.

**Предмет дослідження** – професійна підготовка фахівців машинобудівних підприємств, спрямована на набуття знань та навичок щодо оптимізації параметрів п'ятиосьового адитивного виробництва для підвищення механічних властивостей виробів.

**Мета дослідження** – обґрунтувати та розробити дидактичний проєкт професійної підготовки фахівців, який забезпечить ефективне освоєння технологій п'ятиосьового FDM-друку та навчить підвищувати міцнісні характеристики виробів за рахунок оптимізації матеріалів, структури шару та параметрів друку.

**Завдання дослідження:**

1. Проаналізувати сучасні підходи до підготовки фахівців машинобудівної галузі з урахуванням впровадження адитивних технологій та цифровізації виробничих процесів.

2. Розробити дидактичний проєкт професійної підготовки, який інтегрує теоретичні знання про адитивне виробництво, цифрові технології моделювання та практичні вправи для підвищення міцності виробів.

**Методи дослідження:** системний аналіз науково-технічної та методичної літератури; порівняльний аналіз технологічних параметрів адитивного виробництва; педагогічне проєктування навчального процесу; моделювання та оптимізація параметрів друку; розробка практичних навчальних ситуацій для формування професійних компетентностей.

**Наукова новизна** полягає у створенні комплексної дидактичної системи професійної підготовки фахівців, яка поєднує знання про сучасні п'ятиосьові адитивні технології з методами підвищення міцності виробів та практико-орієнтованим навчанням. Це дозволяє формувати компетентності, необхідні для роботи з цифровими виробничими комплексами та підвищення якості кінцевої продукції.

**Практичне значення дослідження**: розроблені методичні матеріали можуть бути використані під час підготовки та підвищення кваліфікації операторів і інженерів машинобудівної галузі, а також для створення навчальних програм у навчально-виробничих центрах. Впровадження дидактичного проєкту сприятиме формуванню фахівців, здатних ефективно застосовувати п'ятиосьові адитивні технології для отримання виробів з високими міцнісними характеристиками.

**Структура та обсяг роботи:** робота включає анотації українською та англійською мовами, перелік умовних скорочень, вступ, чотири змістові розділи з висновками до кожного з них, загальні висновки, список використаних джерел та додатки з ілюстраціями, схемами та прикладами оптимізації параметрів п'ятиосьового FDM-друку.

# РОЗДІЛ 1
# АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦЯ МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВ З ПІДВИЩЕННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИРОБІВ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ЗА П'ЯТИОСЬОВОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ FDM

## 1.1. Потреба у вдосконаленні професійної підготовки фахівців для роботи з адитивними технологіями

Сучасне машинобудівне виробництво перебуває у стані активної трансформації під впливом цифровізації та впровадження адитивних технологій. Технологія FDM (Fused Deposition Modeling), особливо у п’ятиосьовому виконанні, дозволяє виготовляти складні за геометрією деталі, скорочує час виробництва і зменшує витрати матеріалів, забезпечуючи при цьому можливість точного контролю якості та механічних характеристик виробів. Однак ефективне використання цих технологій на практиці потребує від фахівців нових знань, навичок та компетентностей, яких традиційна система підготовки не завжди здатна надати.

Традиційні підходи до навчання операторів та інженерів в машинобудівних підприємствах здебільшого були орієнтовані на класичні методи механічної обробки, такі як токарна, фрезерна чи шліфувальна обробка. Основний акцент робився на освоєнні стандартних технологічних режимів, роботі з класичними верстатами та інструментами. Водночас нові адитивні технології потребують глибшого розуміння матеріалів, особливостей структури шарів, контролю внутрішніх дефектів та параметрів друку. Це створює розрив між традиційною підготовкою кадрів та сучасними вимогами виробництва. Такий розрив негативно впливає на здатність фахівців самостійно проводити оптимізацію процесів, оцінювати надійність виробів та приймати технічно обґрунтовані рішення під час виробництва.

Крім того, традиційна освіта часто обмежується теоретичним викладом матеріалу, що не завжди супроводжується практичною реалізацією знань на сучасному обладнанні. Відсутність можливості проводити експерименти та моделювання технологічних процесів у навчальному середовищі знижує рівень сформованих професійних умінь і компетентностей. Як результат, молоді спеціалісти, які виходять на виробництво, не завжди готові самостійно оцінювати міцність і надійність виробів, виявляти та усувати дефекти, або здійснювати оптимізацію технологічних параметрів п'ятиосьового друку.

Сучасне цифрове виробниче середовище накладає додаткові вимоги до компетентностей фахівців. Зокрема, вони повинні володіти знаннями та навичками у сфері комп'ютерного моделювання виробів, аналізу механічних характеристик, оцінки міцності та оптимізації параметрів друку. Здатність працювати з CAD/CAM/CAE-системами, віртуальними тренажерами та цифровими симуляторами дозволяє значно скоротити час на навчання та виробництво, підвищити точність і надійність виробів. Водночас такі навички сприяють розвитку аналітичного мислення, що дозволяє фахівцеві самостійно приймати рішення щодо вибору матеріалу, параметрів друку та структурних особливостей виробу, орієнтуючись на вимоги до його міцності та довговічності.

Практико-орієнтоване навчання у цій сфері є особливо важливим, оскільки дозволяє поєднати теоретичні знання з реальними виробничими ситуаціями. Студенти та молоді спеціалісти отримують можливість безпосередньо працювати з адитивними комплексами, аналізувати результати експериментів, виявляти помилки та шукати шляхи оптимізації. Такий підхід сприяє формуванню у них професійної самостійності, вмінь критично оцінювати технологічні процеси та приймати обґрунтовані рішення під час виробництва.

Особливу увагу слід приділити підготовці фахівців до роботи з параметрами, що впливають на міцність виробів, виготовлених методом FDM. До таких параметрів належать товщина шару, напрямок укладання нитки,

температура та швидкість друку, а також структура внутрішніх каналів і заповнення. Недостатня компетентність у цій сфері може призвести до зниження механічних характеристик виробів, виникнення дефектів і браку продукції, що безпосередньо впливає на якість та надійність виробництва.

Таким чином, потреба у вдосконаленні професійної підготовки фахівців для роботи з адитивними технологіями є об’єктивною і зумовлена низкою факторів: швидким розвитком цифрових виробничих систем, необхідністю забезпечення високих міцнісних характеристик виробів, підвищенням вимог до якості та надійності продукції, а також потребою у формуванні нових компетентностей у сучасних фахівців машинобудівних підприємств. Інтеграція теоретичних знань з практичною роботою на сучасних п’ятиосьових FDM-системах та використання цифрових симуляцій створює умови для підготовки кваліфікованих кадрів, здатних ефективно працювати в умовах сучасного виробництва та забезпечувати оптимальну міцність і надійність виробів.

Системне оновлення підготовки фахівців включає також формування здатності до аналітичного мислення, роботи з цифровими моделями виробів та проведення експериментальних досліджень для визначення оптимальних режимів друку. Практико-орієнтований підхід дозволяє поєднати навчання з реальними виробничими ситуаціями, що значно підвищує готовність фахівця до оперативного прийняття рішень та самостійної оптимізації технологічних процесів.

Висновок, який випливає з викладеного, полягає у тому, що вдосконалення професійної підготовки фахівців машинобудівних підприємств у сфері адитивного виробництва є необхідною умовою забезпечення високих міцнісних характеристик виробів, що створює конкурентні переваги для підприємств та сприяє впровадженню інноваційних технологій у виробничі процеси.

## 1.2. Вплив сучасних освітніх технологій на ефективність підготовки фахівця

Сучасне машинобудівне виробництво вимагає від фахівців не лише володіння класичними навичками обробки матеріалів, а й уміння працювати в умовах цифрового виробничого середовища. Особливо це стосується адитивних технологій, таких як п’ятиосьова FDM-друк, де успіх процесу безпосередньо залежить від правильного підбору параметрів, матеріалів та структури виробу. У зв’язку з цим, впровадження сучасних освітніх технологій у підготовку інженерно-технічного персоналу стає ключовим фактором підвищення ефективності навчання.

Однією з основних складових сучасної підготовки є використання CAD/CAM/CAE-систем. CAD-системи дозволяють студентам і фахівцям створювати цифрові моделі виробів, прогнозувати їхню геометричну точність та оцінювати розподіл матеріалу у виробі. CAM-системи забезпечують генерацію інструментальних траєкторій і планування технологічних процесів, що особливо важливо при роботі з п’ятиосьовим FDM-друком, де необхідно враховувати напрямок укладання нитки, товщину шару та швидкість друку. CAE-системи дають змогу моделювати механічні та теплові характеристики виробів, передбачати місця концентрації напружень і оцінювати міцність виробу ще на етапі проєктування. Використання цих систем у навчальному процесі дозволяє студентам отримати практичний досвід цифрового моделювання, навчитися передбачати властивості виробу та оптимізувати параметри процесу без ризику для реального обладнання.

Другим важливим інструментом сучасної підготовки є цифрові симулятори та віртуальні тренажери. Вони створюють можливість моделювати роботу з реальними адитивними комплексами у безпечному навчальному середовищі. Студенти можуть відпрацьовувати операції з налаштування принтера, зміни параметрів друку та контролю якості виробу віртуально, що дозволяє значно скоротити час на освоєння реального

обладнання і зменшити витрати матеріалів. Віртуальні тренажери сприяють формуванню аналітичних навичок: учні отримують можливість експериментально перевіряти вплив різних параметрів друку на міцність та геометричні характеристики виробу, оцінювати ризики виникнення дефектів і виробляти навички оптимізації технологічного процесу.

Інтегровані навчальні середовища є ще одним ефективним засобом підвищення якості підготовки фахівців. Вони об'єднують у собі модулі теоретичного навчання, цифрового моделювання та практичних лабораторних робіт, створюючи єдину навчально-інформаційну систему. Такий підхід дозволяє учням одночасно освоювати теоретичні основи, проводити віртуальні експерименти та відпрацьовувати практичні навички на симуляторах або реальному обладнанні. Інтегроване середовище сприяє кращому засвоєнню матеріалу, формуванню комплексного розуміння технології та підвищенню професійної компетентності.

Важливим аспектом використання сучасних освітніх технологій є можливість персоналізації навчального процесу. Система дозволяє адаптувати рівень складності завдань під індивідуальні здібності студентів, пропонувати додаткові вправи для поглиблення знань або моделювати складні виробничі ситуації для розвитку аналітичного та критичного мислення. Це забезпечує формування висококваліфікованого персоналу, здатного ефективно працювати з адитивними технологіями, прогнозувати властивості виробів і здійснювати оптимізацію процесів для підвищення міцності та надійності продукції.

Таким чином, впровадження сучасних освітніх технологій, таких як CAD/CAM/CAE-системи, цифрові симулятори та інтегровані навчальні середовища, є невід'ємною складовою ефективної підготовки фахівців машинобудівних підприємств. Вони дозволяють поєднати теоретичні знання з практичними навичками, формують аналітичне мислення, уміння оцінювати міцність виробів, прогнозувати наслідки зміни технологічних параметрів та приймати обґрунтовані рішення у виробничому процесі. Використання цих

інструментів сприяє створенню висококваліфікованих фахівців, готових до роботи в умовах сучасного цифрового виробництва та впровадження інноваційних технологій у практику машинобудівних підприємств.

### 1.3. Формулювання теоретичних передумов для розробки сучасної методики підготовки фахівців

Сучасні тенденції розвитку машинобудівного виробництва, зокрема впровадження адитивних технологій, зумовлюють необхідність перегляду підходів до професійної підготовки інженерно-технічних кадрів. Однією з ключових передумов є адаптація навчальних програм до особливостей п’ятиосьового FDM-друку. П’ятиосьова адитивна технологія відрізняється високою складністю процесу: виріб формується шар за шаром, одночасно переміщаючи друкарську головку у трьох координатах та змінюючи кут нахилу друку, що дозволяє створювати складні геометричні конструкції без опорних елементів. Така технологія вимагає від фахівця не тільки знань основ адитивного виробництва, але й уміння прогнозувати наслідки зміни технологічних параметрів на міцнісні характеристики виробу.

Традиційні навчальні програми здебільшого орієнтовані на класичні методи виробництва і не враховують специфіку роботи з п’ятиосьовим обладнанням. Недостатня підготовка у цій сфері може призвести до зниження якості продукції та зменшення її експлуатаційних характеристик. Тому адаптація навчальних програм включає оновлення навчальних планів, введення курсів з цифрового моделювання, лабораторних робіт з відпрацювання параметрів друку та практичних завдань з оцінки міцності виробів. Важливо, щоб навчальні програми відображали реальні виробничі ситуації, давали студентам можливість експериментувати з матеріалами, структурою шару та параметрами друку у безпечному середовищі цифрових симуляторів.

Ще однією об’єктивною передумовою є визначення факторів, що впливають на міцність виробів, виготовлених методом FDM. До основних факторів належать матеріал, структура шару, щільність заповнення, товщина шару, температура друку та швидкість подачі матеріалу. Матеріал визначає базові механічні характеристики виробу, його модуль пружності, твердість та витривалість. Структура шару та напрямок укладання нитки впливають на розподіл напружень і здатність виробу витримувати зовнішні навантаження. Параметри друку, такі як температура плавлення, швидкість та послідовність накладання шарів, визначають якість зчеплення між шарами і рівномірність структури. У процесі навчання фахівців важливо навчити аналізувати ці фактори та прогнозувати їхній вплив на міцність виробів, а також проводити оптимізацію параметрів для досягнення заданих характеристик.

Наступною важливою передумовою є обґрунтування інтеграції теоретичних знань, цифрових технологій та практичних вправ у навчальний процес. Теоретичні знання формують у студентів розуміння фізико-механічних властивостей матеріалів, принципів адитивного виробництва та взаємозв’язку параметрів друку з міцнісними характеристиками виробів. Цифрові технології, такі як CAD/CAM/CAE-системи, симулятори та віртуальні тренажери, дозволяють моделювати процеси друку, прогнозувати міцність виробів та оцінювати вплив змін технологічних параметрів без ризику для реального обладнання. Практичні вправи та лабораторні роботи забезпечують формування професійних умінь: підготовку моделі до друку, налаштування принтера, контроль параметрів процесу, оцінку результатів та внесення коректив. Такий інтегрований підхід дозволяє студентам отримати комплексний досвід роботи, підвищує ефективність навчання та сприяє формуванню високого рівня професійної компетентності.

Крім того, інтеграція теоретичних знань і практичних навичок дозволяє фахівцю навчитися приймати обґрунтовані рішення в умовах нестандартних виробничих ситуацій. Студенти отримують можливість аналізувати технологічні процеси, визначати критичні точки, прогнозувати дефекти та

пропонувати шляхи їх усунення. Це формує у них навички аналітичного мислення, здатність до самостійної оптимізації виробничих процесів та ефективного використання цифрових інструментів у роботі.

Важливо також зазначити, що інтегрований підхід дозволяє гнучко адаптувати навчальний процес під потреби різних категорій студентів і рівень їх підготовки. Викладач може змінювати складність завдань, пропонувати додаткові вправи або моделювати складні виробничі ситуації для розвитку критичного мислення та практичних навичок. Такий підхід сприяє формуванню фахівців, здатних до безперервного навчання та швидкої адаптації до нових технологій, що є об'єктивною вимогою сучасного виробництва.

Отже, об'єктивними передумовами для розробки сучасної методики підготовки фахівців у сфері адитивного виробництва є: необхідність адаптації навчальних програм до особливостей п'ятиосьового друку, визначення та контроль факторів, що впливають на міцність виробів, а також інтеграція теоретичних знань, цифрових технологій і практичних вправ. Врахування цих передумов дозволяє створити навчальну програму, яка не лише формує базові знання, а й забезпечує практичну готовність студентів до роботи на сучасних адитивних комплексах, підвищує ефективність навчання та сприяє підготовці висококваліфікованих фахівців для сучасного машинобудівного виробництва.

## 1.4. Професійні компетентності та очікувані результати підготовки

Професійна підготовка фахівців машинобудівних підприємств у сфері адитивного виробництва спрямована на формування комплексу компетентностей, що забезпечують здатність ефективно працювати з сучасними технологіями та гарантувати високу міцність і надійність виготовлених виробів. Основним завданням підготовки є підвищення рівня знань, умінь та навичок у сфері п'ятиосьового FDM-друку, а також розвиток здатності до самостійного аналізу та оптимізації технологічних процесів.

Однією з ключових професійних компетентностей є здатність до оцінки міцності виробів, виготовлених методом адитивного виробництва. Фахівець повинен володіти знаннями про властивості матеріалів, механічні характеристики виробів, вплив структури шару та параметрів друку на міцність і надійність. Оцінка міцності передбачає використання як теоретичних, так і практичних методів: проведення експериментальних досліджень, моделювання навантажень у цифровому середовищі та порівняння результатів із нормативними вимогами. Вміння правильно інтерпретувати отримані дані та приймати обґрунтовані рішення є критично важливими для забезпечення високої якості продукції.

Наступною важливою компетентністю є оптимізація параметрів адитивного виробництва. Вона охоплює підбір температурних режимів, швидкості друку, товщини шару, напрямку укладання нитки та щільності заповнення. Фахівець повинен розуміти взаємозв'язок між цими параметрами і кінцевими характеристиками виробу, а також вміти визначати оптимальні налаштування для конкретного виробу з урахуванням вимог до його міцності, точності та експлуатаційних властивостей. Компетентність у цій сфері забезпечує ефективне використання адитивного обладнання та зменшує ризик виникнення браку продукції.

Третя ключова компетентність полягає у застосуванні цифрових інструментів для моделювання та аналізу технологічних процесів. Сучасні CAD/CAM/CAE-системи дозволяють створювати цифрові моделі виробів, симулювати механічні навантаження та передбачати критичні точки у конструкції. Застосування цифрових симуляторів дозволяє студентам відпрацьовувати навички оптимізації процесу, прогнозувати результативність виробництва та оцінювати можливі ризики. Цифрові інструменти також сприяють розвитку аналітичного мислення та здатності приймати обґрунтовані рішення у виробничих умовах.

Важливою передумовою підготовки фахівців є формування здатності до самостійного моделювання та вдосконалення технологічних процесів. Це

передбачає розвиток умінь створювати нові моделі виробів, аналізувати їхні властивості, проводити експерименти у цифровому середовищі та впроваджувати зміни у виробничий процес з метою підвищення міцності та надійності продукції. Такий підхід формує у студентів професійну автономію, дозволяє самостійно вирішувати складні технічні завдання та забезпечує ефективне використання набутих знань на практиці.

Практична значущість підготовки фахівців у сфері адитивного виробництва полягає у безпосередньому впливі на конкурентоспроможність сучасних машинобудівних підприємств. Підготовлені фахівці здатні не лише працювати з високотехнологічним обладнанням, а й проводити аналіз результатів, оптимізувати процеси друку, підвищувати міцність виробів та зменшувати виробничі втрати. Це сприяє підвищенню якості продукції, зниженню дефектів та браку, а також впровадженню інноваційних технологій у виробничу практику.

Очікувані результати підготовки включають формування у фахівців комплексних навичок: вміння працювати з CAD/CAM/CAE-системами, оцінювати та оптимізувати параметри друку, моделювати процеси та прогнозувати механічні властивості виробів, проводити аналіз отриманих результатів та приймати технічно обґрунтовані рішення. Крім того, результатом підготовки є здатність до безперервного вдосконалення професійних компетентностей, що дозволяє адаптуватися до змін у технологіях та вимогах ринку.

Таким чином, формування професійних компетентностей у сфері п’ятиосьового адитивного виробництва забезпечує високий рівень підготовки фахівців, здатних працювати у сучасному цифровому виробничому середовищі. Вони володіють знаннями та практичними навичками, необхідними для забезпечення високої міцності виробів, оптимізації технологічних процесів і впровадження інновацій на машинобудівних підприємствах. Інтеграція теоретичної підготовки, цифрового моделювання та практичної роботи створює умови для формування кваліфікованих,

компетентних та самостійних фахівців, які здатні ефективно реалізовувати сучасні технологічні процеси та забезпечувати високий рівень якості продукції.

**Висновки до розділу 1**

Аналіз сучасного стану машинобудівного виробництва та освітніх процесів свідчить про нагальну потребу у вдосконаленні професійної підготовки фахівців у сфері адитивного виробництва, зокрема п’ятиосьового FDM-друку. Традиційні підходи до навчання, орієнтовані переважно на класичні методи механічної обробки, не забезпечують необхідного рівня компетентностей для роботи з сучасними цифровими технологіями та складними геометричними виробами. Це створює розрив між вимогами виробництва та фактичними можливостями випускників професійно-технічних та вищих навчальних закладів, що потребує системного оновлення освітніх програм.

Впровадження цифрових технологій у навчальний процес, зокрема CAD/CAM/CAE-систем, цифрових симуляторів і віртуальних тренажерів, дозволяє ефективно поєднувати теоретичні знання з практичними навичками, формуючи у фахівців аналітичне мислення, здатність прогнозувати властивості виробів і оцінювати міцність та надійність продукції. Інтегровані навчальні середовища забезпечують комплексне засвоєння матеріалу, дають змогу моделювати технологічні процеси та проводити оптимізацію параметрів друку без ризику для реального обладнання, що істотно підвищує якість підготовки інженерно-технічного персоналу.

Однією з ключових передумов для розробки сучасної методики підготовки є адаптація навчальних програм до особливостей п’ятиосьового друку, що включає врахування специфіки матеріалів, структури шару, параметрів друку та їх впливу на міцність виробів. Інтеграція теоретичних знань, цифрового моделювання та практичних вправ дозволяє формувати

комплексні професійні компетентності, включаючи здатність до оцінки міцності виробів, оптимізації технологічних параметрів та самостійного вдосконалення виробничих процесів.

Очікувані результати підготовки полягають у створенні фахівців, здатних ефективно працювати у сучасному цифровому виробничому середовищі, приймати обґрунтовані рішення щодо підбору параметрів друку, оцінки міцності виробів та їхнього технологічного вдосконалення. Практична значущість такої підготовки проявляється у можливості підвищення конкурентоспроможності машинобудівних підприємств, оптимізації виробничих процесів та впровадження інноваційних технологій, що забезпечують високу якість та надійність продукції.

Таким чином, проведений аналіз свідчить, що формування сучасних компетентностей у сфері адитивного виробництва є критично важливим для розвитку машинобудівної галузі. Врахування специфіки п’ятиосьового друку, цифрового моделювання та практико-орієнтованого навчання створює підґрунтя для підготовки висококваліфікованих, компетентних і самостійних фахівців, здатних забезпечити високу міцність виробів та ефективну роботу сучасних виробничих систем. Ця підготовка є невід’ємною складовою підвищення технологічної спроможності підприємств та розвитку інноваційного потенціалу галузі загалом.

# 2 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВИРОБНИЦТВА ВИРОБІВ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В АДДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

## 2.1 Полімерні композиційні матеріали та адитивні технології

В даний час терміни «адитивні технології», «адитивне виробництво» та «адитивні технологічні процеси» найчастіше використовуються щодо технологій та процесів об'ємного друку (3D друку). Згідно з визначенням ГОСТ Р 57558-2017, адитивний технологічний процес – це процес виготовлення деталей, який заснований на створенні фізичного об'єкта за електронною геометричною моделлю шляхом додавання матеріалу, як правило, шар за шаром, на відміну від вичитуючого (субтрактивного) виробництва (механічної обробки) і традиційного форми. У той самий час традиційні технології виробництва композиційних матеріалів також можна зарахувати до поняття «адитивної технології» у її сенсі, т. е. методу виробництва, заснованого об'єднанні розрізнених компонентів, а чи не зрізанні частини поверхневого шару заготовки. Незалежно від походження композиційного матеріалу один із його компонентів пластичний – він називається «сполучною» або «матрицею» і виконує роль «тіла» виробу, тоді як інший компонент, «наповнювач» або «арматура», відрізняється високою міцністю та жорсткістю та переносить ці властивості на всю композицію; при цьому композиції набувають властивостей, яких не мають окремі складові [1, с. 334].

У вужчому сенсі під «адитивними технологіями» (АТ) розуміється клас методів виробництва, які «автоматично створюють складні тривимірні об'єкти без інструментального їх виготовлення шляхом перетворення даних, що надходять з CAD-системи» [3, с. 9]. АТ стали природним розвитком технологій «швидкого прототипування», які служили для спрощеного виготовлення макетів, прототипів і т. п. чорнових реалізацій: якщо можна таким чином «надрукувати» макет деталі, що точно відтворює її хоча б за формою і розмірами, з'являється спокуса отримати і справжню деталь.

Реалізація такої ідеї в рівній мірі вимагала удосконалення технології, апаратури та матеріалу, тим більше що в галузі традиційного виробництва композитних матеріалів (і виробів з них) вже існували схожі за принципом методи формоутворення. Тільки питанням часу було застосування їх в АТ і, зокрема, адаптація способів зміцнення виробів шляхом введення армування - наповнювача, що зміцнює, з тканин, волокон, гранул, порошків, присадок і т. п. Як буде показано нижче, ці додатки були з успіхом зроблені.

Низька середня вартість обладнання та матеріалів завжди була великою перевагою технології пошарового наплавлення полімерного матеріалу (Fused Deposition Modelling, FDM), розробленої С. Скоттом Крампом у 1988–89 рр.; на ринку вона представлена з 1990 року його компанією Stratasys. FDM – термін, заявлений у патентах Stratasys, для обходу юридичних обмежень ентузіасти ввели синонімічний термін «Fused Filament Fabrication» (FFF). Під «філаментом» розуміється термопластичний матеріал у вигляді прутка, який подається в екструдер, плавиться і шар за шаром осідає на платформі (рисунок 2.1).

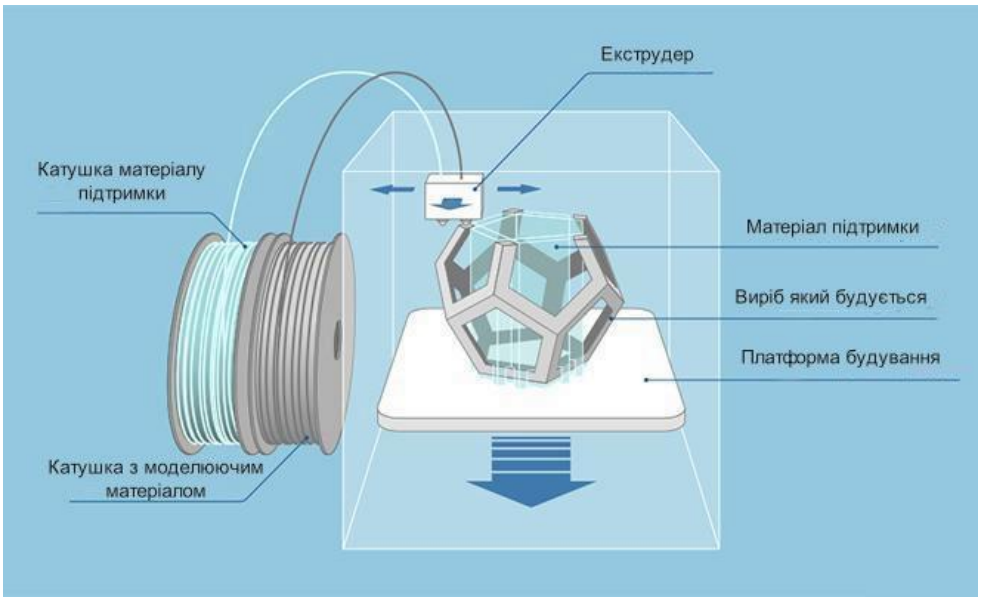



Рисунок 2.1 – Принцип технології FDM/FFF

Позитивні якості та недоліки FDM технології протилежні стереолітографії. В одному технологічному процесі завдяки безпосередньому підведенню матеріалу до робочого органу може використовуватися не один, а

кілька термопластиків для виробництва композиційного виробу з декількох матеріалів або деталі з розчинними підтримками. Завдяки простоті та низькій вартості обладнання та витратних матеріалів вона дозволяє отримувати дуже дешеві зразки, причому набагато швидше, ніж на стереолітографічній машині. Точність таких зразків у десятки разів нижча і коливається від сотих до десятих часток міліметра [3, с. 27-28]; втім, цього цілком достатньо для забезпечення точності виготовлення від 10 до 14 квалітету (залежно від обладнання, матеріалу та кваліфікації оператора, зокрема, володіння методиками компенсації усадки матеріалу). Сукупність зазначених причин призвела до того, що після закінчення терміну дії основних патентів Stratasys з'явилося безліч таких машин у найпростішому та дешевому виконанні.

В адитивному виробництві металевих об'єктів, а також композиційних матеріалів, призначених для високих навантажень і температур, найкраще показала себе технології селективного (вибіркового) лазерного спікання – Selective Laser Sintering, SLS (спікання полімерного порошку) і Selective Laser Melting, SLM (спікання металевого порошку). Біля джерел технології стояли DTM Corp. (США, 1987 р.; куплено 3D Systems у 2001 р.) та EOS GmbH (Німеччина, 1989 р.) – обидві компанії створюють установки для виготовлення виробів із полімерних, металевих та керамічних порошків. Синтез виробів за SLS та SLM технологіям має схожі принципи і в загальному випадку здійснюється в такий спосіб. Порошок насипається в область побудови та розрівнюється валиком, а потім спікається спрямованим лазерним променем у формі одного шару моделі. Потім зверху насипається і вирівнюється ще один шар порошку і випалюється ще один шар моделі, який спікається з попереднім, і так, поки модель не буде побудована (рисунок 2.2).

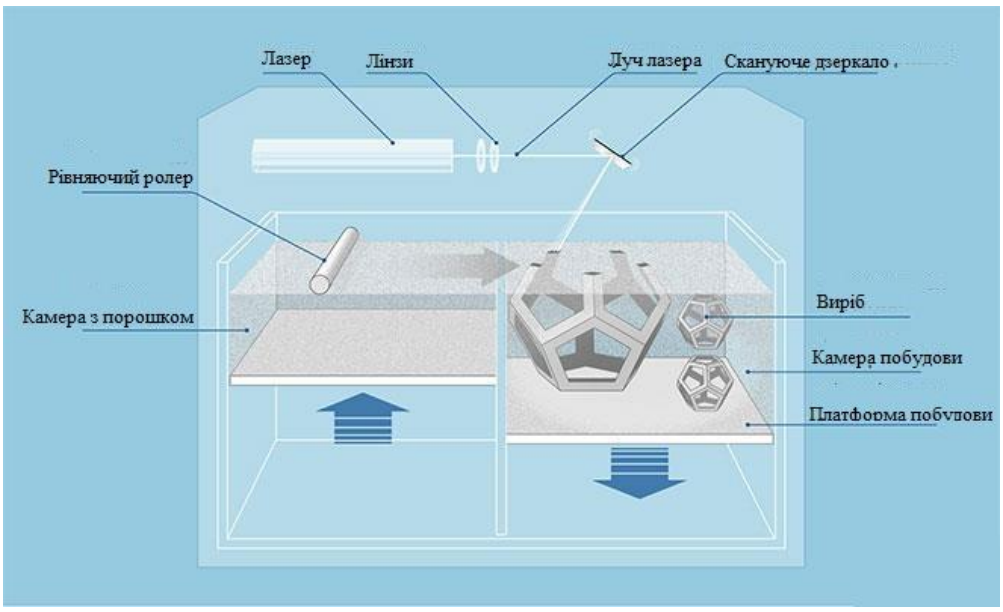



Рисунок 2.2 – Принцип SLS/SLM технології

На сьогоднішній момент технології селективного спікання – найдорожчі з усіх АТ через високу складність та вартість як обладнання, так і матеріалів, оскільки до порошків для синтезу пред'являються дуже високі вимоги щодо точності форми та розмірів. Великою перевагою є можливість виробництва цілісних металевих виробів зі складною конфігурацією (наприклад, тонкими викривленими внутрішніми каналами), точність лінійних розмірів можна забезпечити з похибкою до 0,05% від номінального розміру [3, с. 21].

## 2.2 Адитивне виробництво виробів, армованих дискретними наповнювачами

Композиційні матеріали з дискретними наповнювачами були добре відомі задовго до появи АТ. Під «дискретними» наповнювачами розуміються будь-які дисперсні наповнювачі (азбест, слюда, кварц тощо) і волокнисті наповнювачі будь-якого походження як коротких, рубаних волокон. Можна сказати, що включення таких наповнювачів у вихідний матеріал (чи то розчин фотополімеру, порошок або філамент) – досить очевидний крок, причому в загальному випадку застосування армованого дискретним наповнювачем матеріалу навіть не потребує значних змін у конструкції адитивної установки.

Більш менш докладні огляди ключових віх у розробці та застосуванні таких матеріалів наводилися різними дослідниками, наприклад, у роботах [10, 11, 12, 13]. Перші публікації на тему 3D друку полімерами з рубаним волокном або частинками відносяться до кінця 1990-х – початку 2000-х років. Серед них із завидною частотою згадують статті Грея та ін. ([14] – 1998 р., поліпропілен, армований термотропним рідкокристалічним полімером), Чжуна та ін. ([15] – 2001 р., ABS-пластик, армований скловолокном), Шофнера та ін. вуглеволокном). Багато перших дослідах виникали подібні проблеми з розшаруванням надрукованих об'єктів, їх негнучкістю чи пористістю. Втім, вони показували зростання межі міцності при розтягуванні зразків – приблизно десятки відсотків, більше чи менше залежно від матеріалу та умов.

Крім суто технічних недоробок тоді відзначалися і суттєві теоретичні питання, наприклад, про орієнтацію рубаного волокна, екструдованого з полімерною основою під час друку. Залежно від траєкторії руху екструдера робилися припущення розташування волокон (їх «вирівнюванні» у напрямі струменя); на основі відомих ще з середини минулого століття праць із традиційних наповнених пластмас робилися спроби передбачення механічних властивостей надрукованого об'єкта. Схема «вирівнювання» коротких волокон наведена, наприклад, в оглядовій частині роботи [10], а в [11] наводилися результати моделювання процесу вирівнювання волокон при екструзії з дослідження за 2015 р. Автори останнього за підсумками випробувань міцності робили висновок, що орієнтація коротких волокон (хрест-навхрест у сусідніх шарах) дозволила підвищити максимальну межу міцності до 44% порівняно з хаотичним розташуванням волокон.

До періоду між 2015 та 2020 рр. такі початкові проблеми, як пористість та розшарування, вже були значною мірою подолані, з'явилася велика кількість наповнених рубаним волокном філаментів для адитивних установок, що працюють за технологією FDM (в т.ч. для настільних 3D принтерів). Однак незалежно від ступеня наповнення полімеру максимум міцності, який виявився доступним для друкованих виробів – це показники пластиків,

виготовлених традиційними методами, такі як лиття під тиском або пултрузія [10, 13]. При цьому порівняння проводиться головним чином за тією ж найпростішою характеристикою міцності при розтягуванні і не враховує набагато менш вражаючі можливості зразків, що навантажуються в міжшаровому напрямку. Втім, шаруватість друкованих виробів і, як наслідок, яскраво виражена анізотропія їх механічних властивостей (порівняно з монолітними литими зразками) – це проблема, внутрішньо властива самому принципу адитивного виробництва, і пошаровим армуванням її вирішити.

## 2.3 Адитивне виробництво виробів, армованих безперервним волокном

На 2024 р. усі відомі технології друку з армуванням реалізують один із п'яти представлених принципів укладання безперервного волокна під час друку.

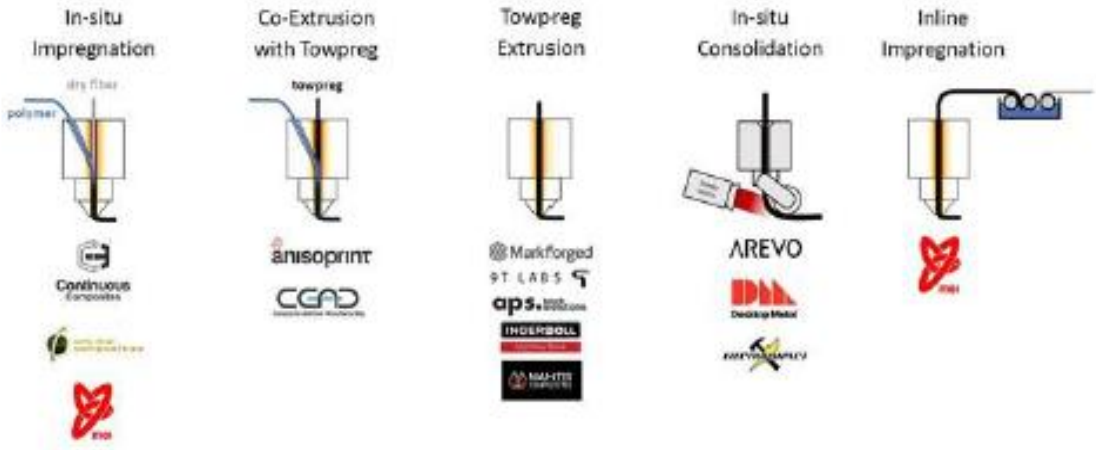



Рисунок 2.3 – Принципові схеми укладання безперервного волокна у процесі 3D друку

Історично першими методами є друк із просоченням волокна на місці (In-situ Impregnation) і з проточним просоченням (Inline Impregnation). У цих випадках джгут із сухих волокон проходить через ємність з рідким сполучним в екструдері (In-situ) або перед екструдером, наприклад, у ванні (Inline), після чого через сопло екструдера укладається на платформу. Сполучне або самостійно застигає при охолодженні (якщо використовувався термопластик),

або піддається зовнішньому впливу (наприклад, фотополімерне сполучне затверджують УФ-випромінюванням, як у SLA-технології).

Принцип друку з екструзією препрега показаний малюнку 1.4. Використання препрега уможливило організувати подачу армуючого філаменту так само, як і подачу звичайного пластикового прутка, і реалізувати процес друку з армуванням у вигляді простого алгоритму послідовного друку двох частин виробу спочатку матричним, а потім армуючим екструдерами. При цьому метод екструзії препрега в загальному випадку вимагає тільки спеціального пристрою для нагріву та подачі армуючого філаменту, при цьому якісна адгезія армування до матеріалу матриці в загальному випадку може досягатися просто шляхом розігріву та викладення самого волокна, без подачі додаткового сполучного затвердіння і т.п. додаткові операції.

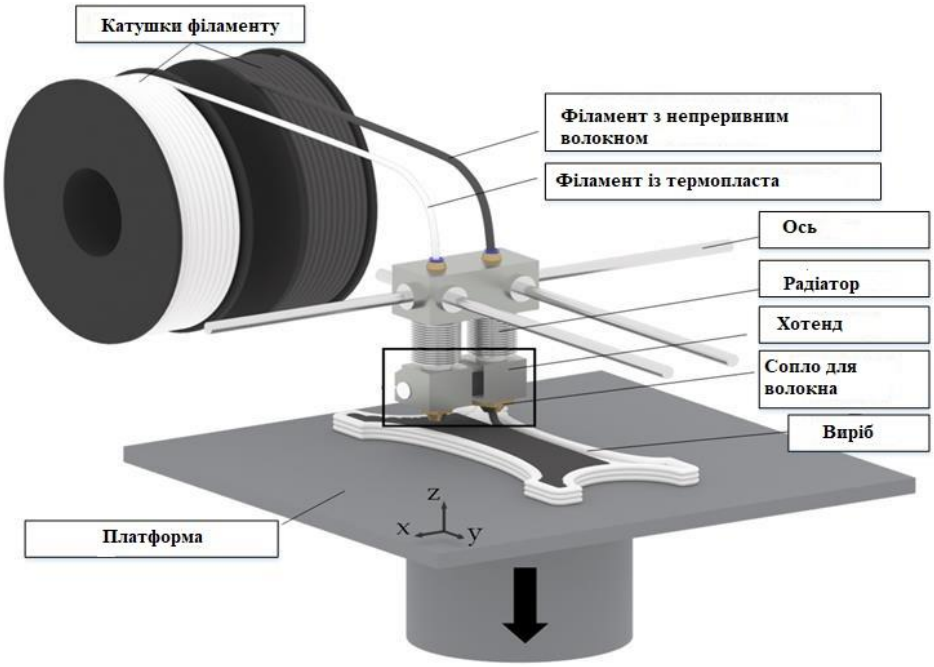



Рисунок 2.4 – Принцип побудови армованого виробу при армуванні шляхом екструзії препрега (Markforged)

Піонером в галузі друку з екструзією препрега виступила компанія Markforged (США, заснована у 2013 р.), приблизно до цього ж періоду (2013–16) належать перші публікації та патенти [10, 11, 12, 13]. Технологія Markforged ґрунтується на використанні препрегів із термопластичним сполучним, в першу чергу – на основі нейлону (Onyx – суміш нейлону з

наповнювачем з коротких вуглецевих волокон). Внутрішній прогрес можна оцінити, наприклад, на основі даних про міцність матеріалів Markforged за 2017 [43] і 2020 [44]: межа міцності зразків з нейлону, армованого безперервним вуглецевим волокном, за результатами випробувань зріс з 700 до 800 МПа 4 вигин, що в обох випадках приблизно в 10 разів перевищує показники для пластикових зразків.

На малюнку 2.5 показаний приклад реалізації технології Markforged для виробництва кріпильного пристосування для транспортування поршня корабельного двигуна на фінському підприємстві Wärtsilä в 2019 р. За даними статті [47], оригінальний сталевий виріб було замінено збірною конструкцією з декількох елементів, надрукованих на вуглеволокном, і витримало при випробуваннях граничне навантаження 960 кгс (при масі одного поршня 240 кг). При цьому маса пристосування була знижена на 75% (з 8 до 2 кг), а також була досягнута економія коштів підприємства в 1000 на виробництво кожного виробу.

Рисунок 2.5 – Приклад застосування 3D-друкованого армованого виробу як заміни сталевого пристосування

Інші компанії, що використовували екструзію препрега: 9T Labs (Швейца-рія, 2018 р.), Desktop Metal (США, заснована в 2015 р.; представила технологію укладання волокна маніпулятором в 2019 р.), Mantis Composites (США, 2; до створення великих об'єктів).

Екструзія препрега – простий, економічний та досить гнучкий спосіб армування, на що вказує і безліч прикладів застосування технології Mark-

forged як для дослідних, так і для виробничих цілей. Одна з основних складностей у реалізації технології, заснованої на цьому способі – це зробити армуючий філамент з рівномірним і глибоким просоченням, який при цьому мав би стабільні розміри поперечного перерізу та хороші показники круглості. Крім того, адгезія в цьому випадку забезпечується за рахунок простого злипання матеріалів матриці та просочення армуючого філаменту - це означає, що для кожної препрега є сумісні матричні матеріали і несумісні, з якими препрег не злипається.

Дорогою коекструзії препрега зі сполучним матеріалом пішла компанія Anisoprint (2014 р.). Як матеріал для просочення джгута була використана термореактивна смола - на відміну від термопластиків, цей клас полімерів після нагрівання, опромінення або т. п. обробки твердне остаточно і не плавиться щоразу при нагріванні. Як матричний матеріал при друку використовується термопластик, який екструдується в процесі друку одночасно з подачею нагрітої препрега (рисунок 1.6). Термореактивна оболонка армуючого філаменту при цьому не плавиться, як у методі екструзії препрега, а тільки розм'якшується, щоб покращити її адгезію з коекструдованим полімером і полегшити її укладання та згинання в місцях переходу з однієї траєкторії на іншу.

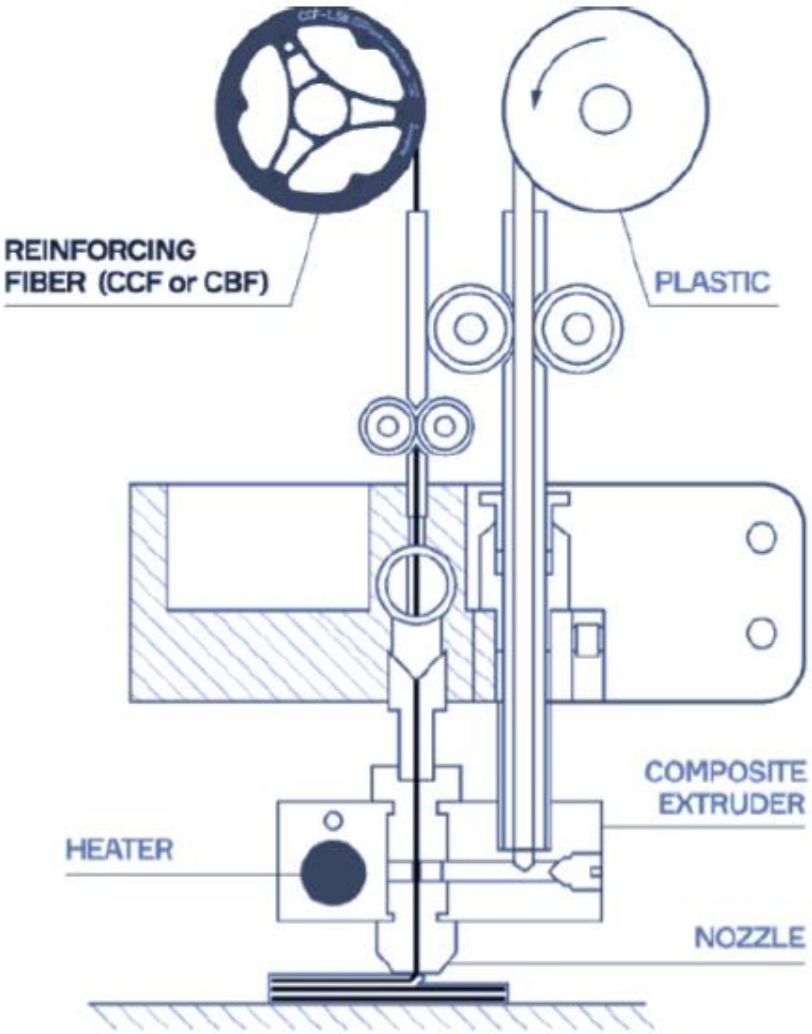



Рисунок 2.6 – Принцип побудови армованого виробу при армуванні шляхом коекструзії препрега та сполучного (Anisoprint)

Спеціалістами компанії під розроблену технологію 3D друку з армуванням успішно адаптовано ряд виробів, деякі з яких описані в публікації [49] – для всіх наведених виробів (в основному «плоскої» або призматичної форми) вдалося виграти від 10 до 50% маси за рахунок розрахунку та виборчого армування найбільш навантажених місць.

Серед недоліків всіх описаних технологій друку з укладанням безперервного волокна вказують на невисоку продуктивність, наявність пір на межах розділу матриці та арматури, а також слабкість міжшарової взаємодії так само на рівні стандартного 3D друку або трохи вище [48, 49, 53, 54]. На вирішення цих проблем був націлений спосіб з'єднання (консолідації) на місці (Insitu Consolidation), розроблений компанією Arevo (США, заснована в 2013

р., представила високошвидкісну композитну систему АП в 2020 р.). Суть процесу полягає в подачі препрега 131, його різкому нагріванні за допомогою лазера 206 та з'єднанні з платформою 322 (або попереднім шаром 151) за допомогою притискного ролика 204 (рисунок 2.7).

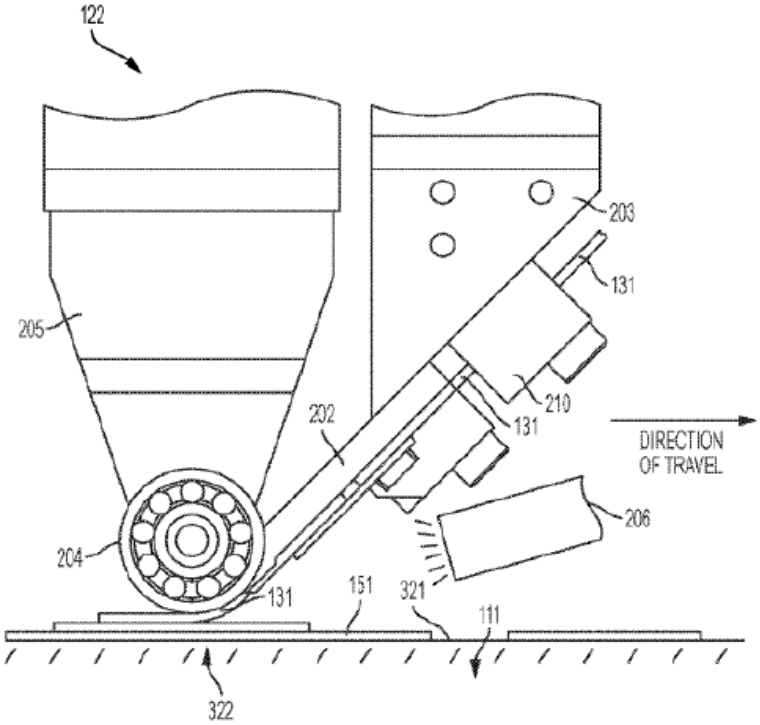



Рисунок 2.7 – Принцип армування шляхом консолідації препрега та матриці «за місцем»

Дослідження [53], проведене компанією, показало межу міцності зразків при стандартних випробуваннях на розтягування на рівні даних Markforged або вдвічі вище при односпрямованому укладанні волокон - до 1000-1500 МПа, що можна порівняти з деякими марками традиційно виготовлених ПКМ з безперервним вуглеволокном.

У той же час застосування спрямованого лазера для нагрівання волокна і роликового механізму накочення призводить до необхідності повертати голівку для кожної зміни напрямку укладання волокна. У зв'язку з цим потрібне ускладнення конструкції (як мінімум одна додаткова кутова вісь у системі переміщення головки) та значне збільшення кількості неодружених переходів при укладанні армування. У самій статті описується, що запропонований спосіб нагрівання і укладання волокон забезпечив швидкість

викладки в 2-4 рази вище, ніж у Markforged, однак такий виграш у продуктивності справедливий лише для простих виробів у вигляді тестових смуг з односпрямованим армуванням. Найчастіше всередині реальних виробів потрібно створити армуючий каркас складнішої форми, сітчастий або повторює зовнішні обриси деталі. У всіх цих випадках масивна друкуюча головка Arevo буде змушена здійснювати дуже багато додаткових холостих ходів, і в міру зменшення довжини прямих відрізків армуючих траєкторій різниця у швидкості укладання за допомогою лазера і ролика буде все менш значною порівняно з більш простими схемами укладання Markforged і Anisoprint.

Застосування філаментів з дискретними наповнювачами не ставить додаткових вимог до програмного забезпечення (далі – ПЗ) для підготовки керуючих програм. Такі матеріали за формою та поведінкою повністю схожі зі звичайними пластиковими прутками і лише підбору режиму друку (як, втім, будь-який інший матеріал у FDM технології).

Армуючий філамент з безперервним волокном вимагає складнішого підходу до побудови траєкторій як безпосереднього укладання матеріалу, так і холостих переміщень. На відміну від розплаву пластику, джгут з безперервного волокна не можна довільно стискати для зміни ширини лінії та висоти шару в широких межах, його необхідно різати в кінці траєкторії і потім довикладати відрізаний фрагмент волокна всередині виробу, також потрібно врахувати ряд параметрів, що визначають структуру армуючого каркаса матричного матеріалу.

Один із прикладів ПЗ, в якому враховано весь необхідний функціонал для безперервного волокна – це слайсер Eiger компанії Markforged (рисунок 2.8).

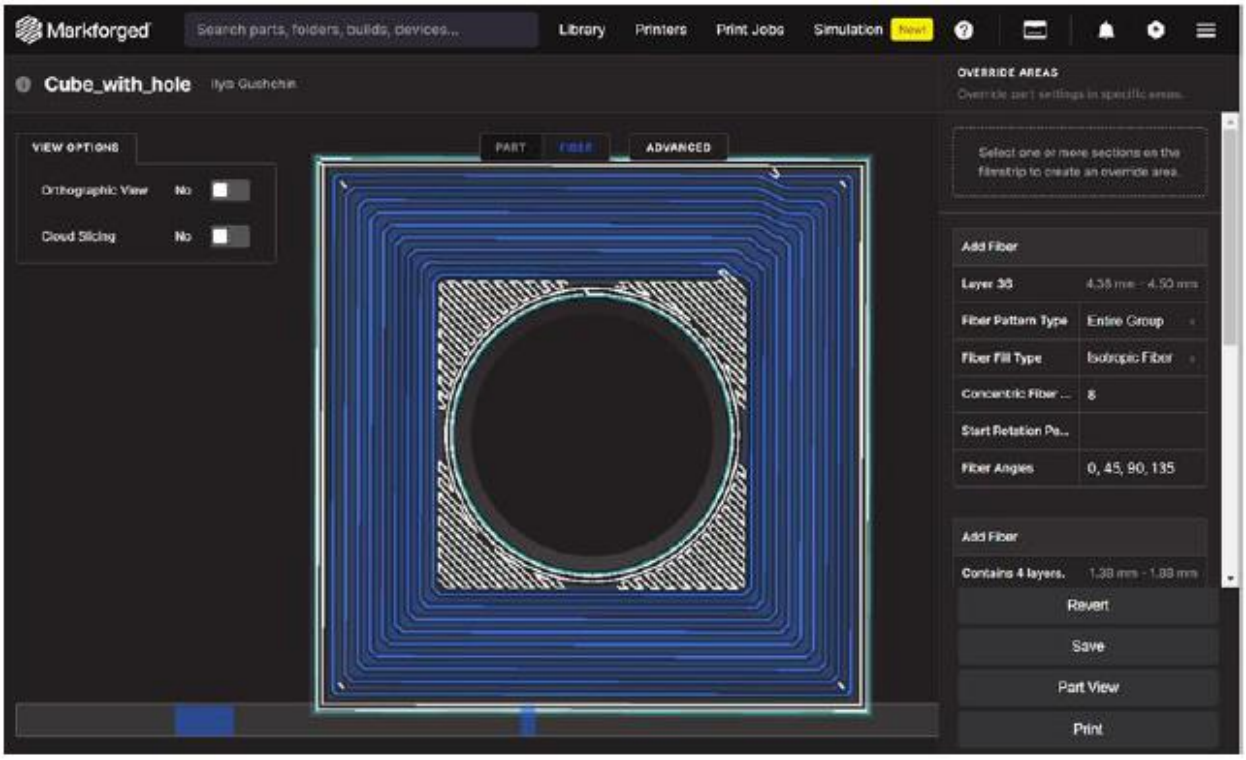



Рисунок 2.8 – Інтерфейс ПЗ Eiger (Markforged) для підготовки керуючої програми друку армованого виробу

Як і при двоекструдерному друку двома пластиками, траєкторії укладання різних матеріалів показані лініями з різними кольорами та шириною (як правило, ширина лінії армуючого матеріалу більша за лінію матричного матеріалу). В армуючому каркасі на малюнку 1.8 безперервне волокно укладається вздовж бічних стінок моделі, причому певним чином задані повороти на кутах, переходи з одного відрізка траєкторії армування на інший, місця відсікання і довикладки безперервного волокна після відрізу (показані тонкими лініями). Також передбачено заливання матричним матеріалом тих фрагментів шару, в якому безперервне волокно не укладається, з метою зафіксувати армування в шарі і не дати зміщуватися в площині шару.

# 3 РОЗРОБКА ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ТЕХНОЛОГІЇ П'ЯТИОСІВНОГО ДРУКУ З АРМУВАННЯМ

## 3.1 Принцип п'ятиосьового друку з армуванням безперервним волокном

Як було зазначено в розділі 1, основою для технології, що розробляється, є метод друку з укладанням просторових криволінійних шарів, викладений у роботах [19, 39, 48, 65, 66] – метод п'ятиосьового або 5D друку. Відмінною особливістю методу 5D друку є можливість синтезу виробу без використання плоскої платформи як основа, як і в більшості інших адитивних технологій. Друк виробу може проводитися на різних підставах, наприклад, на циліндричній підставі, закріпленому на платформі з двома додатковими можливими рухами - нахилом виробу та його обертанням у процесі виробництва.

На основі аналізу традиційних технологій виробництва ПКМ, технологій FDM друку з укладанням безперервного волокна та технології п'ятиосьового FDM друку запропоновано новий метод друку з вибірковим виконанням частин виробу з безперервного волокна для покращення його механічних характеристик.

У базовій частині запропонований метод реалізує технологію друку з армуванням, засновану на використанні друкуючої головки з двома (або більше) екструдерами, як мінімум один з яких призначений для друку основної частини виробу (матриці) з будь-якого полімерного матеріалу для FDM друку (чистого полімеру або наповненого короткими волокнами), а інший - для укладання армуючих траєкторій термопласту (препрега), здатного злипатися з матрицею за рахунок адгезійної взаємодії між полімерами матриці та просочення армування (рисунок 2.1).

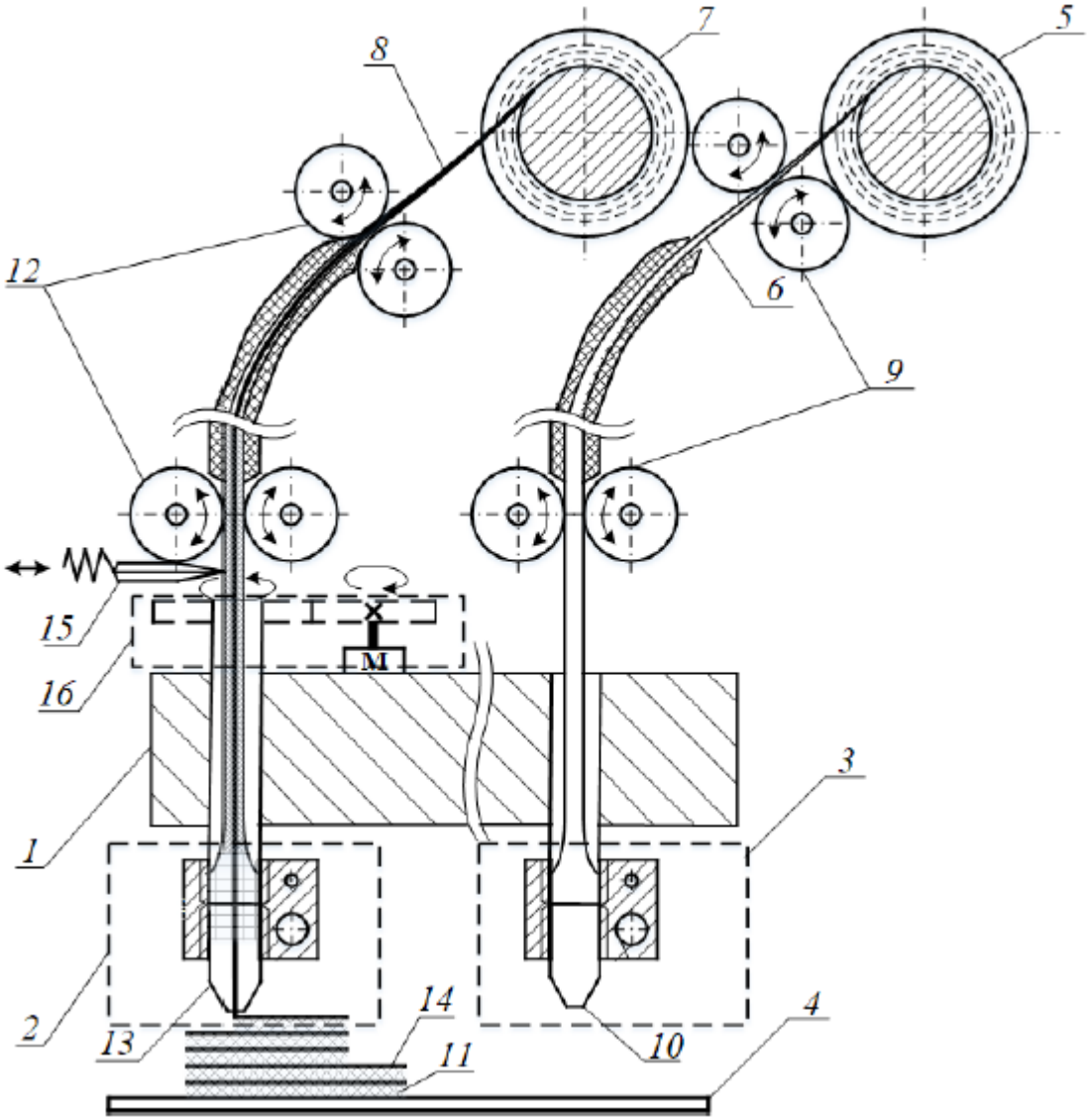



Рисунок 3.1 – Принципова схема процесу FDM друку з армуванням безперервним волокном: 1 – головка друкуючого принтера; 2 – друкувальний блок для безперервного волокна; 3 – друкувальний блок для матеріалу матриці; 4 – приймальна поверхня (платформа для 3D друку, оснастка або заготівля для 5D друку); 5 – котушка матеріалу матриці; 6 – матеріал матриці (філамент для друку FDM); 7 – котушка безперервного волокна; 8 – безперервне волокно (армуючий філамент); 9 – система подачі матеріалу матриці (опціонально на голівці, що друкує, або на рамі біля котушки); 10 - сопло для подачі матеріалу матриці; 11 – шари пластику (матриця композитного об'єкта); 12 – система подачі безперервного волокна (опціонально на голівці, що друкує, або на рамі біля котушки); 13 -

інструмент для викладання безперервного волокна (сопло, ролик або ін.); 14 – шари волокна (армування композитного об'єкта); 15 - система відрізання безперервного волокна; 16 - система повороту друкувальної головки (опціонально).

Відмінною особливістю запропонованого методу є можливість друку без плоскої платформи як підстави. Як і відомої технології п'ятиосьової FDM друку, використовується основа циліндричної форми 8, закріплене на платформі з двома додатковими кутовими ступенями рухливості (рисунок 3.2). Як і в описаному вище принципі триосьового друку з армуванням, ключовий вузол установки - друкуюча головка 1, що містить як мінімум два екструдери: екструдер 3 для друку матричним матеріалом 7, що подається з відповідної котушки 6, і екструдер для безперервного волокна 2, в котрий подається з котушки 4.

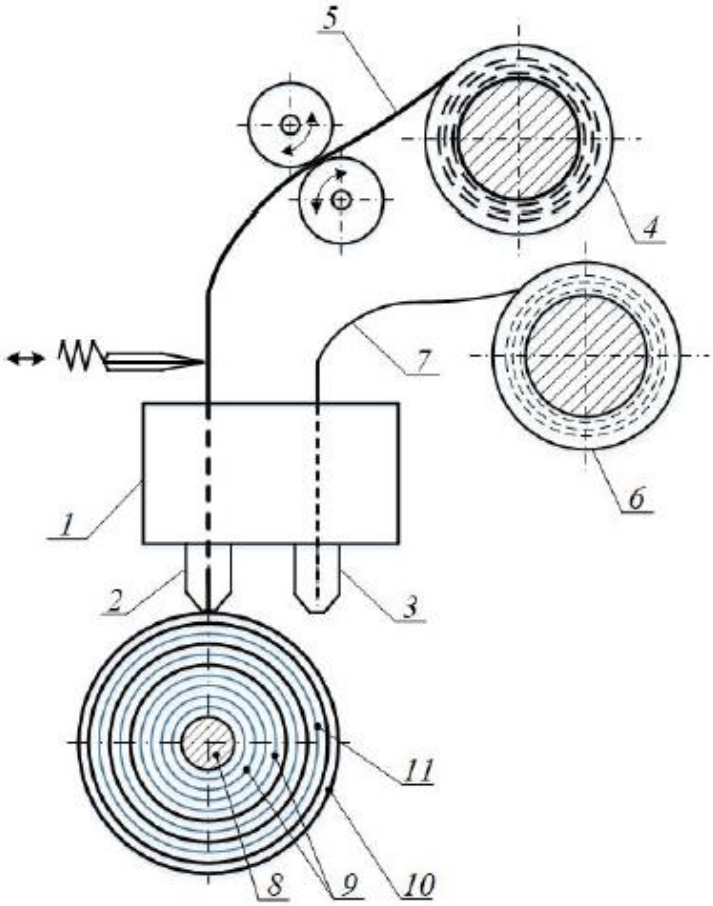



Рисунок 3.2 – Принципова схема процесу п'ятиосьової FDM друку з армуванням безперервним волокном.

На циліндричній підставі перші шари виробу 9 друкуються за допомогою матричного екструдера 3. У певних шарах друкувальна головка перемикається на екструдер (або інший інструмент) для укладання безперервного волокна 2, щоб сформувати армуючі шари 10 відповідно до одного зі способів формування армуючих каркасів. Шари з безперервним волокном 10 можуть укладатися безпосередньо один на одного або після кожного армуючого шару може викладатися деяка кількість Nмат проміжних шарів 11, які повністю заповнюються матричним матеріалом (рисунок 2.2).

### 3.2 Способи формування армуючих каркасів при п'ятиосьовому друку

Для армування безперервним волокном циліндричних шарів при п'ятиосьовому друку опрацьовано кілька варіантів армуючих структур, заснованих на стандартних малюнках заповнення при FDM друку та геодезичних траєкторіях укладання волокон при виготовленні композиційних виробів методом навивки або плетіння. Так, для армування масивних виробів за формою стрижнів, трубок, роликів і шківів передбачена можливість укладання волокон лініями з кутом φ, що варіюється в кожному шарі (рисунок 2.3). Укладання здійснюється за рахунок спільного руху подачі s (подача волокна в сопло або інший інструмент для укладання), поздовжнього руху друкуючої головки вздовж осі Y і повороту основи навколо осі C. Для поліпшення адгезії волокон до поверхні шару також можуть здійснюватися невеликі за величиною переміщення вздовж осі X (поперек осі C).

Даний варіант побудови армуючого каркаса може бути виконаний двома способами. У способі № 1 (рисунок 2.3 а) в кінці кожної геодезичної лінії відбувається відсікання волокна, довикладення його без подачі додаткового матеріалу і потім перехід на наступну лінію. У способі № 2 (рисунок 2.3 б) перехід з однієї лінії на іншу здійснюється без відсікання, всі лінії з'єднуються в одну максимально довгу траєкторію.

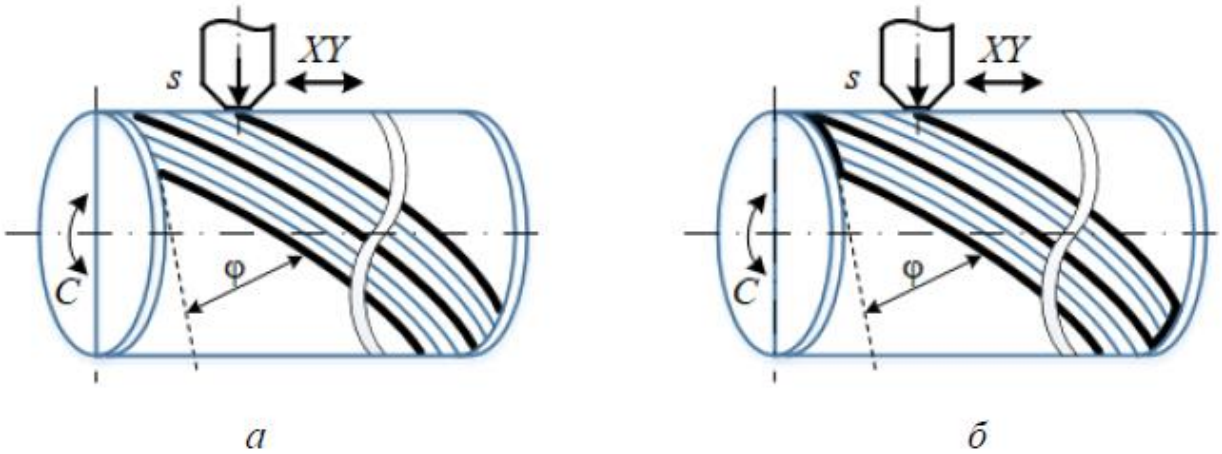



Рисунок 3.3 – Схема укладання безперервного волокна при побудові лінійного армуючого каркаса: а – лінійне укладання, спосіб №1; б - лінійне укладання, метод № 2.

У разі, коли виріб має тонку стінку і є жорстке технологічне обмеження на кількість шарів армування, яке можливо в ньому розмістити при 5D друку, раціонально використовувати армуючий сітчастий каркас, в якому в кожному шарі волокна укладаються в двох напрямках ± φ з взаємним накладенням ліній всередині . Як і для способів № 1-2, укладання волокна здійснюється за рахунок спільного руху подачі s, поздовжнього руху друкуючої головки вздовж осі Y і повороту основи навколо осі C, а також при необхідності з невеликими переміщеннями вздовж осі X. Однак для сітчастих каркасів обертання основи повинно забезпечуватися навколо осі тільки в одному напрямку. Переходи з лінії на лінію забезпечуються також поворотом основи осі З.

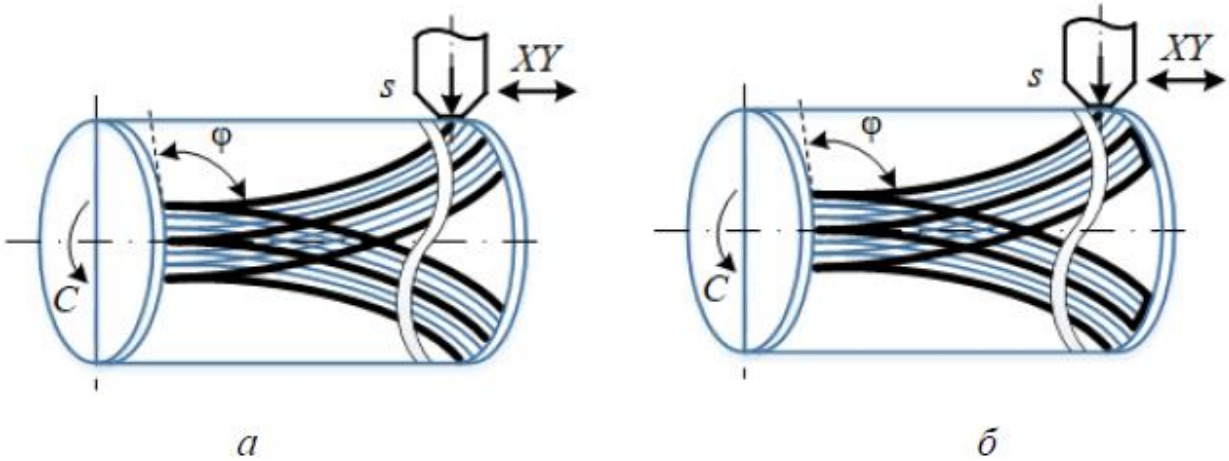


Рисунок 3.4 – Схема укладання безперервного волокна при побудові сітчастого армуючого каркасу: а – сітчасте укладання, спосіб №3; б – сітчасте укладання, метод №4.

Аналогічно способам № 1-2 сітчастий каркас може бути реалізований за способом № 3 з відсіканням волокна після укладання кожної пари ліній ±φ (рисунок 2.4, а) або за способом № 4 зі з'єднанням сусідніх ліній максимально довгі траєкторії (рисунок 2.4, б).

Для каркасів обох типів (лінії та сітка) бічні контури шару виконуються із матричного матеріалу (термопластика). Щільність укладання армуючих ліній для кожного способу може змінюватись виходячи з конфігурації виробу та вимог до його міцності та жорсткості. У разі, якщо армуючі лінії укладаються не суцільно, проміжки між армуючими лініями також заповнюються лініями матриці, як показано на рисунках 2.3, 2.4. Відносне розташування ліній армування та матриці у поперечному перерізі виробу, армованого за одним із способів № 1–4, зображено на малюнку 2.5.

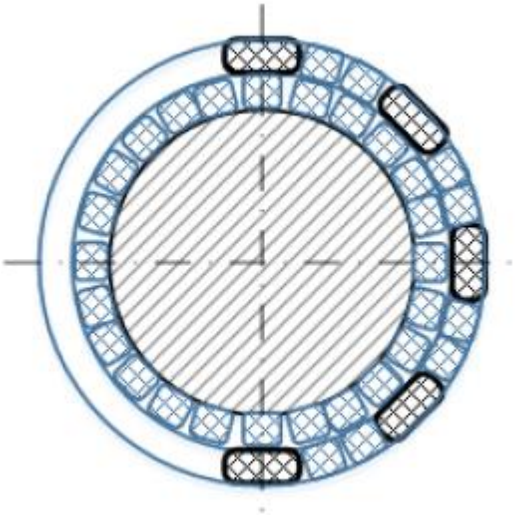


Рисунок 3.5 – Переріз циліндричного виробу, армованого за одним із способів № 1–4

Для армування тонкостінних виробів, а також для надання жорсткості краям масивних зразків передбачена можливість побудови концентричних армуючих каркасів відповідно до способів № 5 і № 6. У базовому варіанті концентричного армування за способом № 5 траєкторії укладання волокна

повторюють зовнішні обриси моделі, включаючи тонкі стінки, вирізи показано малюнку 2.6. Такий спосіб армування є лише дуже наближеним варіантом реалізації «біоподібних» траєкторій армування, запропонованих у роботі [59], однак для ряду виробів з тонкими стінками або вирізами (подібних до конструктивно-подібного елемента на малюнку 2.6, а) він здатний забезпечити побудову ефективного армуючого каркаса, на відміну від відомих.

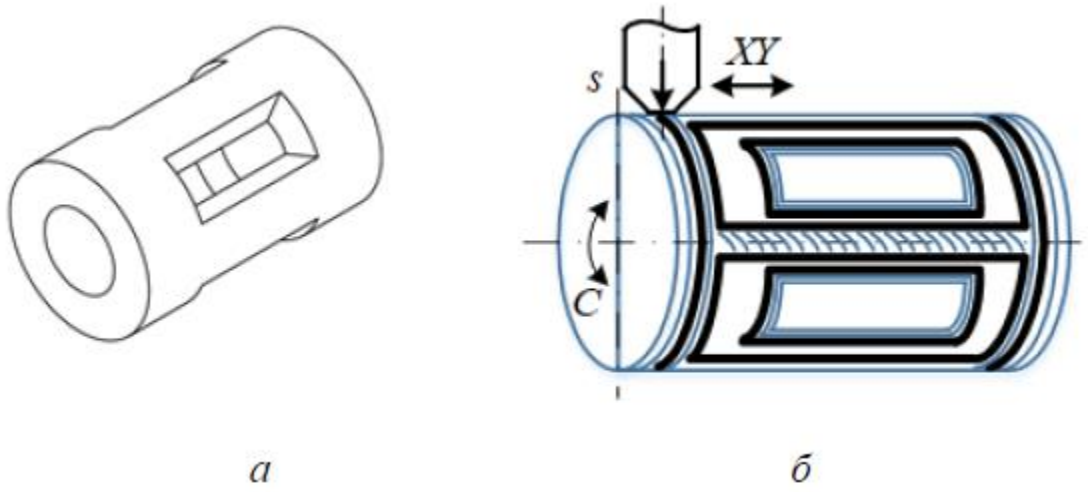



Рисунок 3.6: а – аксонометричний Рисунок тонкостінного виробу; б – схема укладання волокна при армуванні контурів циліндричного шару за способом №5.

Для укладання волокна навколо бічних контурів і отворів здійснюється складний спільний рух подачі s, руху головки, що друкує, уздовж осей Y і X і повороту основи навколо осі C в обох напрямках. Якщо навколо отвору, вирізу тощо. викладається кілька армуючих контурів, вони викладаються однією лінією, без відсікання, як показано на малюнку 2.7, обхід кожного контуру здійснюється строго в один бік. Односторонній рух при декількох обходах кожного отвору і з'єднання контурів в одну лінію здійснюються для поліпшення адгезії волокна до попереднього шару.

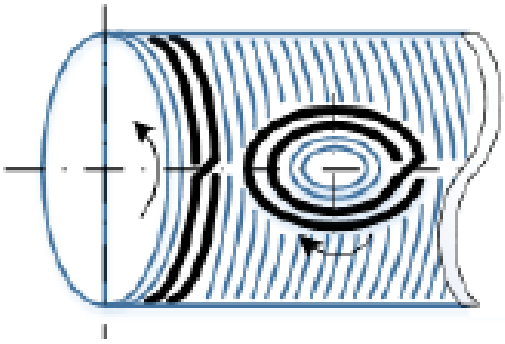


Рисунок 3.7 – Обхід отворів при побудові концентричного армуючого каркасу за способом № 5

Зовнішні контури виробів і краї отворів виконуються з концентричних ліній матричного матеріалу (стінок), як і відомої технології п'ятиосьового друку, щоб сформувати рівні зовнішні поверхні виробу. У випадку, якщо потрібна обробка отворів (свердління, розгортання, нарізування різьблення) завжди обробляється термопластик, з армуючими лініями інструмент у цьому випадку не контактує.

### 3.3 Аналітичне дослідження міцності армованих зразків

У силу того, що для матеріалів, що використовуються в технології FDM друку з армуванням, є вкрай мало відомостей про їх механічні властивості самих по собі та в комбінаціях один з одним, а також через велику залежність цих властивостей від технологічних умов процесу друку, об'єктивно встановити залежності між значеннями технологічних параметрів та показниками міцності виробу можна лише досвідченим шляхом. Однак у разі окремих параметрів область та напрями їх варіювання можливо визначити аналітично, виходячи лише з геометричних міркувань.

З найбільшим успіхом аналітичний метод дослідження можна застосувати для оцінки впливу кута підйому φ армуючих ліній для армуючих каркасів, побудованих за одним із способів № 1-4, на міцність армованого виробу. При цьому, якщо у разі найпростішого навантаження на розтягнення цей зв'язок виражатиметься простою синусоїдальною залежністю, при згинальних навантаженнях висловити її в зручній для практичного застосування формі складно.

Для побудови наочної залежності міцності на вигин від кута підйому армуючих ліній у цій роботі проведено кінцево-елементне моделювання в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Для зіставлення властивостей виробів, армованих за різними малюнками, вибрано зразок та схема випробування на статичний триточковий вигин відповідно до ГОСТ Р 56810-2015, показані на малюнку 2.8.

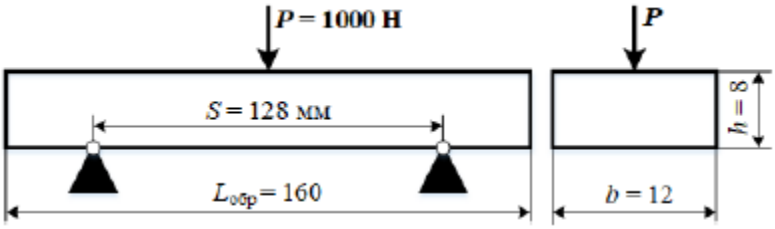



Рисунок 3.8 – Габарити зразка та принципова схема випробування на статичний вигин (ГОСТ Р 56810-2015)

Зразок встановлений на дві шарнірні опори з можливістю повороту щодо них і навантажується посередині зосередженим навантаженням в 1000 Н. Для імітації вдавлювання пуансона і опор в матричний матеріал у точках докладання навантаження і контакту з опорами моделі передбачені заокруглення пази глибиною 0,2 мм з радіусом. Розміри пазів задані, з досвідчених даних, зібраних за результатами попередніх випробувань [48].

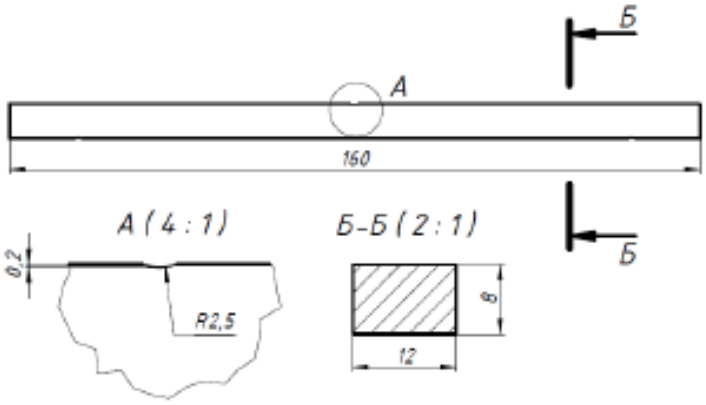



Рисунок 3.9 – Розміри та форма зразка, що моделюється.

Як матеріал матриці використаний термопластик PA6 [34, 67, 68], матеріал армування – вуглеволокно UMT-42S-12K [69].

Розглянуто поведінку чотирьох типів зразків.

- зразок № 1 (рисунок 2.10 а) являє собою цільний брусок з PA6 без армування і імітує виріб з квазіізотропною поведінкою, одержуване при п'ятиосьовому друку;
- зразок № 2 (рисунок 2.10 б) – зразок з плоским армуванням за відомими способами, армування з 10 ниток вуглеволокна розташоване в площині XY (розташування зразка «плашмя»);
- зразок № 3 (рисунок 2.10, в) – зразок з плоским армуванням за відомими способами, армування з 10 ниток вуглеволокна розташоване в площині XZ (розташування зразка «ребром»);
- зразок № 4-1 (Рисунок 2.11, а) з п'ятиосьовим армуванням відповідно до способу № 1, армування з 10 ниток вуглеволокна розташоване паралельно осі за кільцевим перерізом (орієнтація волокон φ = 90°);
- група зразків з № 4-2 по № 4-9 з п'ятиосьовим армуванням відповідно до способу № 1, армуючий каркас являє собою 10 ниток, навитих навколо осі зразка з кутом підйому ліній ? = 88-45 ° - як приклад наведені зразок з ? (Рисунок 2.11, в).

Розшарування матриці, відшарування волокон від матриці не розглядаються.

Зміст волокон у всіх зразках: масою cm = 0,048 = 4,8%; за обсягом cV = 0,037 = 3,7%.

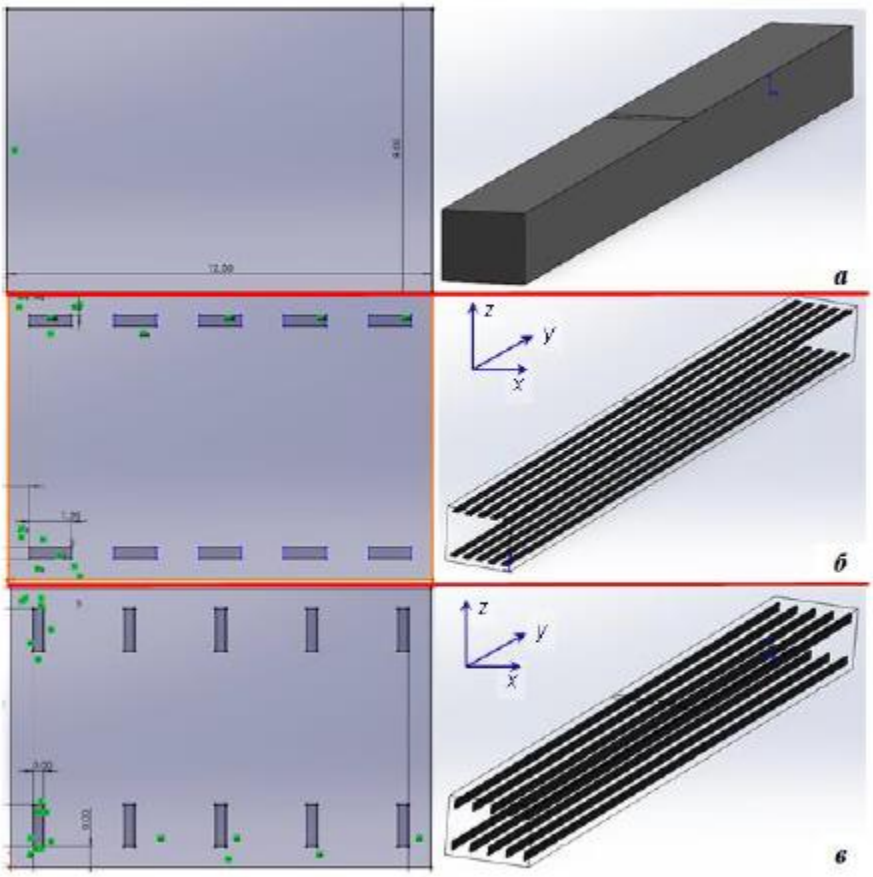



Рисунок 3.10 – Структура зразків, що моделюються: а – неармований зразок № 1; б - зразок № 2 з плоским армуванням XY;
в – зразок № 3 із плоским армуванням XZ.

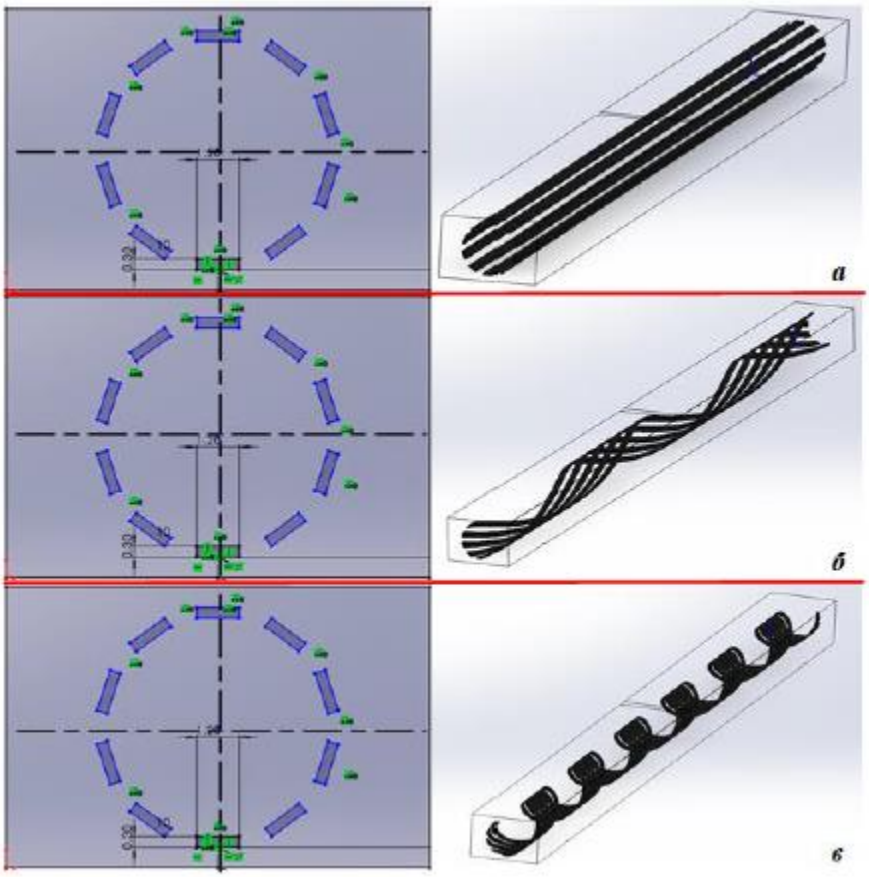



Рисунок 3.11 – Структура зразків, що моделюються, з лінійним армуючим каркасом, побудованим за способом № 1: а – зразок № 4-1 з паралельним розташуванням армуючих ліній; б - зразок № 4-5 з армуючими лініями, навитими під кутом φ = 75 °; в – зразок № 4-9 з армуючими лініями, навитими під кутом = 45°.

За результатами дослідження для кожного зразка фіксувалися 3 параметри, які на рисунках 2.12, 2.13 показані на прикладі неармованого зразка № 1:

максимальний прогин wmax у середині зразка від прикладеного навантаження – рисунок 2.12;

еквівалентна напруга за Мізесом у нижній σниз і верхній σверх частини центрального перерізу зразка (максимальна напруга розтягування та стиснення відповідно) – Рисунок 2.13.

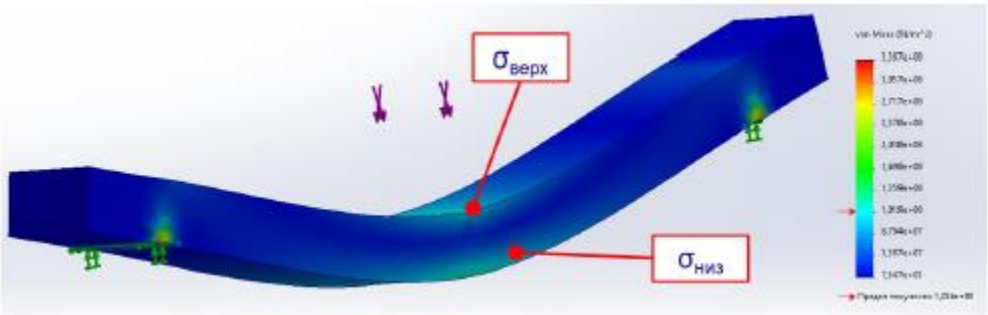



Рисунок 3.12 – Поведінка зразка № 1 під навантаженням під час моделювання. Точки фіксації еквівалентних напруг за Мізесом σниз і σверх

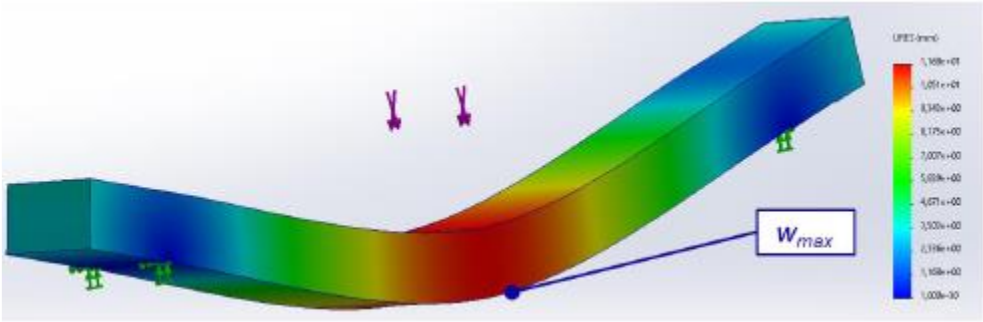



Рисунок 3.13 – Поведінка зразка № 1 під навантаженням під час моделювання. Точки фіксації максимального прогину wmax

На рисунках 3.14 і 3.15 показані отримані за результатами моделювання залежність максимальної стискаючої напруги σверх і σниз, МПа від кута підйому армуючих ліній φ. Прямими лініями показані порівняльні дані для неармованого зразка №1 та зразків з плоским армуванням №2 та 3.

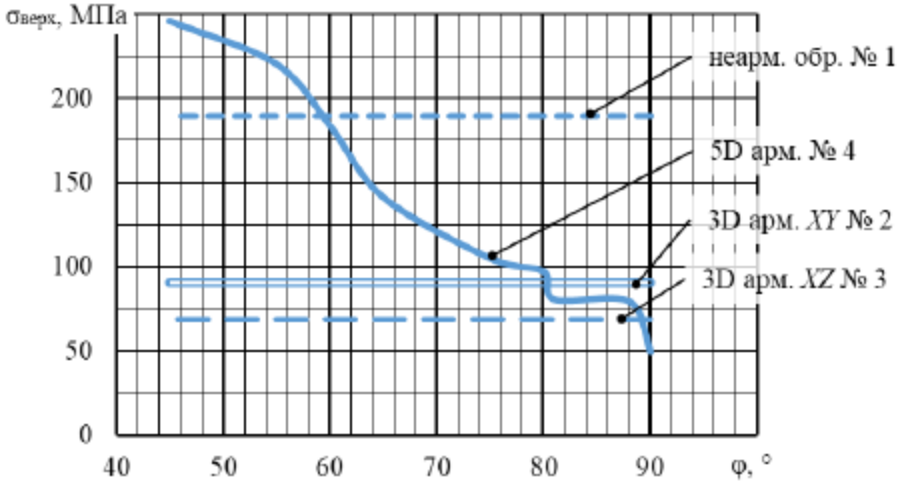



Рисунок 3.14 – Отримані при моделюванні значення максимальної напруги стиснення σверх, Мпа

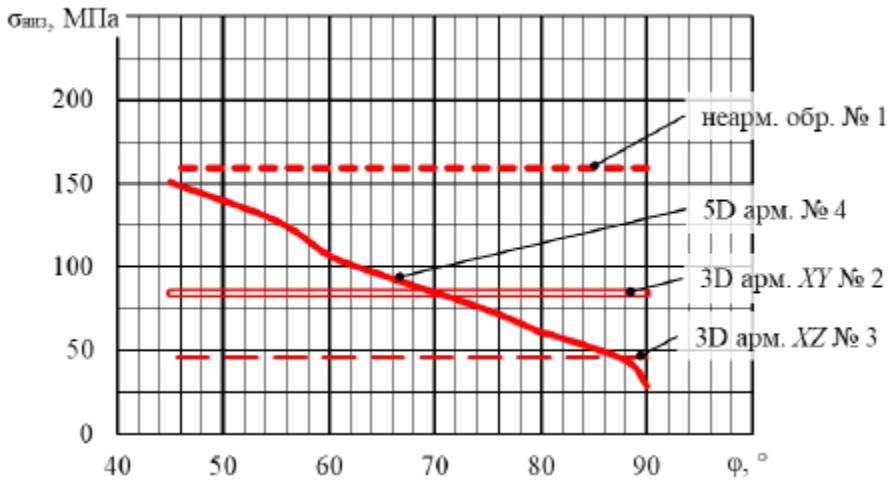



Рисунок 3.15 – Отримані при моделюванні значення максимальної напруги розтягування σниз, МПа

На малюнку 2.16 показана отримана за результатами моделювання залежність максимальної стискаючої напруги wmax, мм від кута підйому армуючих ліній φ.

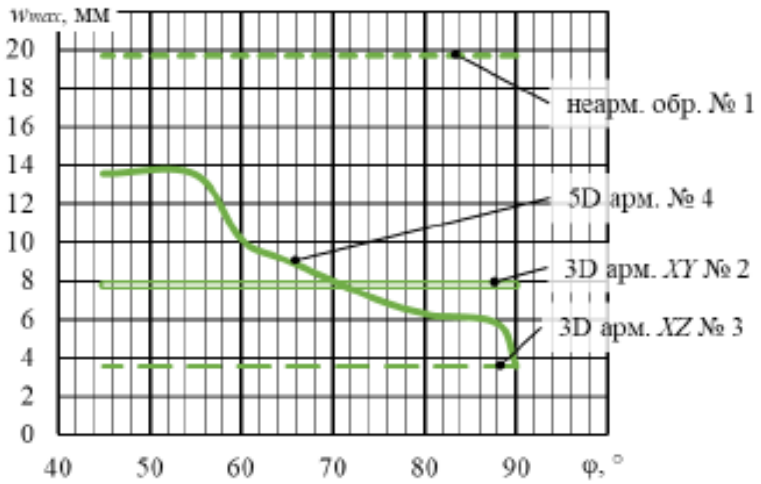



Рисунок 3.16 – Отримані при моделюванні значення максимального прогину середини зразка wmax, мм

Як і очікувалося виходячи з геометрії армуючого каркаса, найкращі характеристики при згинанні демонструє зразок № 4-1 з паралельним розташуванням волокон (φ = 90°), проте з дослідних даних відомо, що результати для нього завищені, оскільки така армуюча структура найбільш вразлива до розшарування (як і вироби з плоскими 3).

У той же час для зразків з п'ятиосьовим армуванням за способом № 1 при ? 75° прогин і еквівалентні напруги перевищують результати «оптимальної» схеми з ? Також кожному сімействі графіків добре помітний діапазон між лініями для плоско армованих зразків. При використанні п'ятиосьового армування зі значенням кутів φ, що забезпечують збереження вихідного параметра всередині даного діапазону, можна говорити про «перерозподіл» здатності, що несе армуючого каркаса, тобто. виріб краще чинить опір згинальному навантаженню в одному напрямку і гірше - в іншому напрямку. При виході ж за межі верхньої межі діапазону (тобто лінії для плоского армованого зразка XY) п'ятиосьове армування взагалі втрачає сенс, оскільки пручається навантаженню гірше, ніж обидва варіанти реалізації плоских армуючих каркасів.

За результатами аналітичного дослідження висувається припущення, що при згинальних навантаженнях п'ятиосьове армування з φ ≥ 70° забезпечить кратно більші показники міцності (такі як межа міцності і модуль пружності) порівняно з неармованими п'ятиосьовими виробами, а також порівняні або найкращі у порівнянні з кращими з неармованими п'ятиосевими армуваннями При цьому п'ятиосьові схеми армування здатні забезпечити симетрію механічних властивостей досліджуваного зразка, яка неможлива для виробів з плоским армуванням, а також підвищити опір виробів розшарування при згинальних навантаженнях.

# 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ П'ЯТИОСІВНОЇ ДРУКУ З АРМУВАННЯМ

## 4.1 Розробка п'ятиосьової установки адитивного виробництва для друку з армуванням

В рамках реалізації пристрою розроблена конструкція п'ятиосьової установки адитивного виробництва виробів, армованих безперервним волокном, в рамках технології FDM, у тому числі друкувальна головка з екструдером для укладання безперервного волокна, механізм відсікання волокна в друкуючій головці, податчик безперервного волокна, тримач котушки волокна та схема. Для виробництва установки (п'ятиосьового принтера FDM) підготовлений комплект конструкторської документації, що використовується при серійному виробництві принтерів Stereotech 530 Fiber.

Загальний вигляд і компонування розробленого принтера представлені малюнку 3.1. Принтер складається з наступних основних частин:

− модуль електрики, на який також монтується податчик безперервного волокна;

− модуль вертикального переміщення Z;

− модуль горизонтального переміщення XY;

− друкуюча головка з екструдером для безперервного волокна;

− модуль друку, встановлюваний на спеціальні тримачі модуля Z (5D модуль чи нагрівальна платформа, не показана малюнку).

Армуючий філамент (безперервне волокно), намотаний на спеціальну котушку, встановлюється на відповідний тримач усередині робочої камери принтера. Волокно завантажується в податчик, розташований на верхній панелі модуля електрики, подається через фторопластову трубку до друкувальної голівки і надходить у екструдер для безперервного волокна.

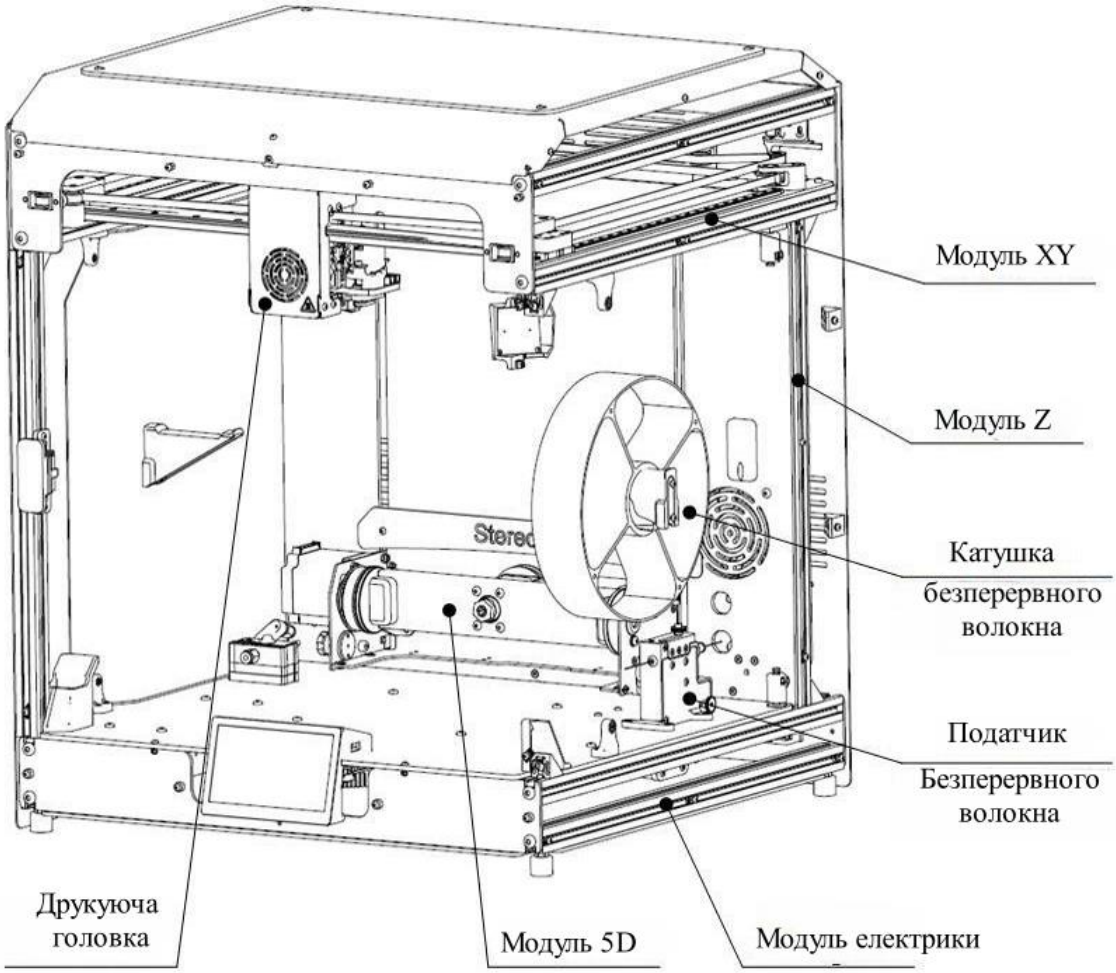



Рисунок 4.1 – 5D принтер Stereotech 530 Fiber, загальний вигляд та компоновка

Пристрій розробленої голівки для друку з армуванням наведено на малюнку 4.2. Друкувальна головка містить два екструдери: основний (лівий) екструдер для друку структур з матричного матеріалу та екструдер для безперервного волокна (правий). Основний екструдер жорстко фіксується по висоті, висота екструдера для волокна налаштовується під нього залежно від режиму друку. Регулювання висоти установки екструдера для волокна здійснюється вручну за допомогою системи, що включає циліндричну напрямну 1, пружину стиснення 39 і регулювальний баранець Л (рисунок 3.2 а).

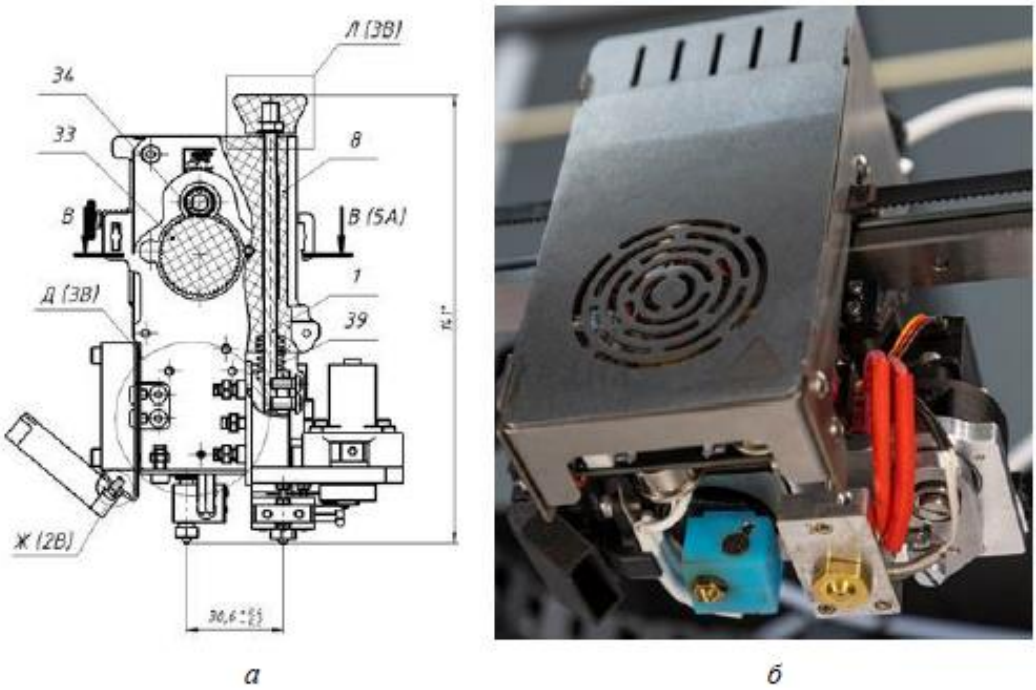



Рисунок 4.2 – Друкувальна головка Stereotech 530 Fiber: а – фрагмент складального креслення; б – фотографія модуля, встановленого на 5D принтер

Екструдер для волокна (рисунок 3.3) виконаний у вигляді окремого модуля, що знімається з головки друкуючої повністю для зручності обслуговування. Він ділиться на три основні частини (рисунок 3.3, а): базову частину, яка включає приймаючий патрубок 1 для армуючого філаменту і направляючу 4 для установки в друкувальну головку, привід механізму відсікання 2 і ексцентриковий механізм відсікання 3, що передає рух відрізу волокна від приводу до леза. Привід механізму відсікання може бути виконаний на основі крокового двигуна або сервоприводу. Екструдер підключається до плати управління друкуючою головкою двома джгутами (рисунок 3.3, б): 4- або 3-піновим джгутом приводу відсікання (для крокового двигуна або сервоприводу відповідно), 4-піновим джгутом блоку нагрівання волокна (включає гільзовий нагрівач і терморезистор).

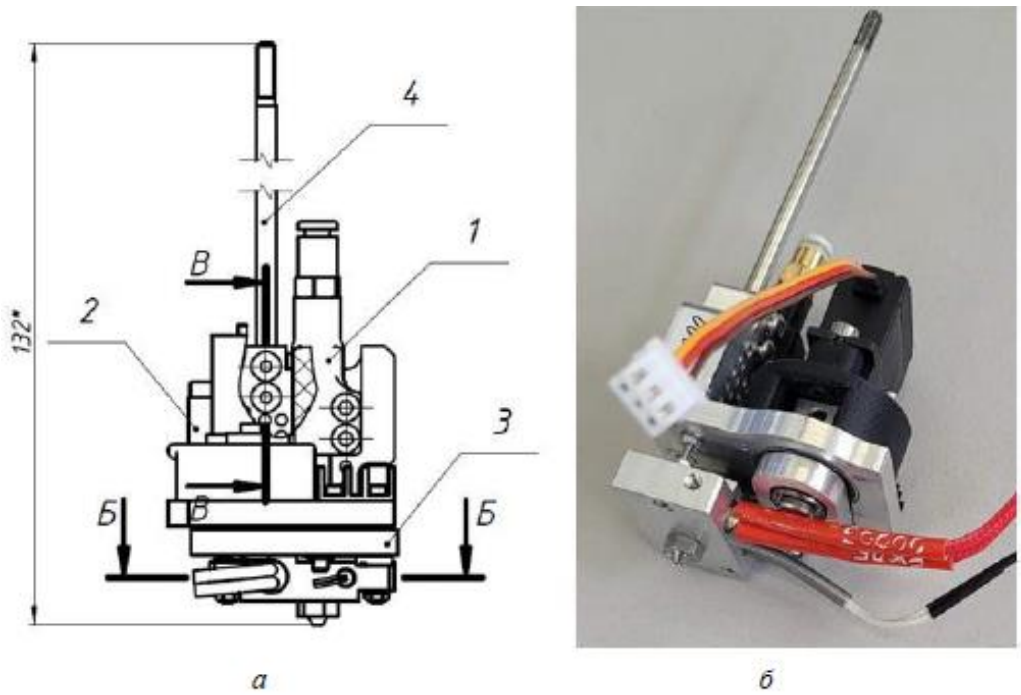



Рисунок 4.3 – Екструдер для безперервного волокна: а – фрагмент складального креслення; б – фотографія екструдера у зборі

Основні функції, що виконуються екструдером – нагрівання безперервного волокна, його укладання та розгладжування по поверхні шару при побудові армуючого каркасу виробу. Укладання та розгладжування здійснюється за допомогою спеціального сопла з вкладишем із фторопластової трубки.

## 4.2 Підготовка моделей для друку з армуванням

Режим візуалізації укладання шарів під час підготовки моделі для друку з армуванням показано малюнку 3.4. Даний режим дозволяє оцінити шляхи переміщення друкувальної головки, а також наочно визначити області моделі, в яких буде зміцнюватися.

Режим показу порядку укладання матеріалу у межах обраного шару показаний малюнку 3.5. Лінії заповнення, виконані з безперервного волокна, відображаються контрастним чорним кольором, а також відрізняються шириною від ліній матричного матеріалу.

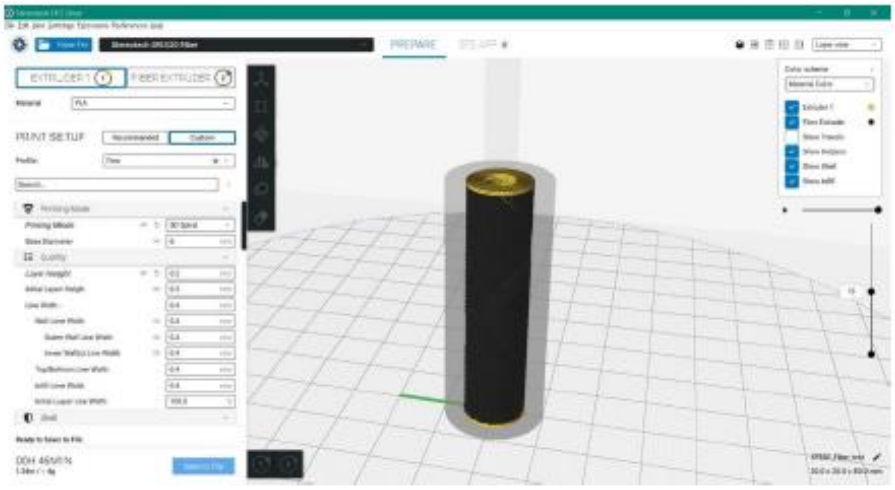


Рисунок 4.4 – Режим візуалізації укладання шарів

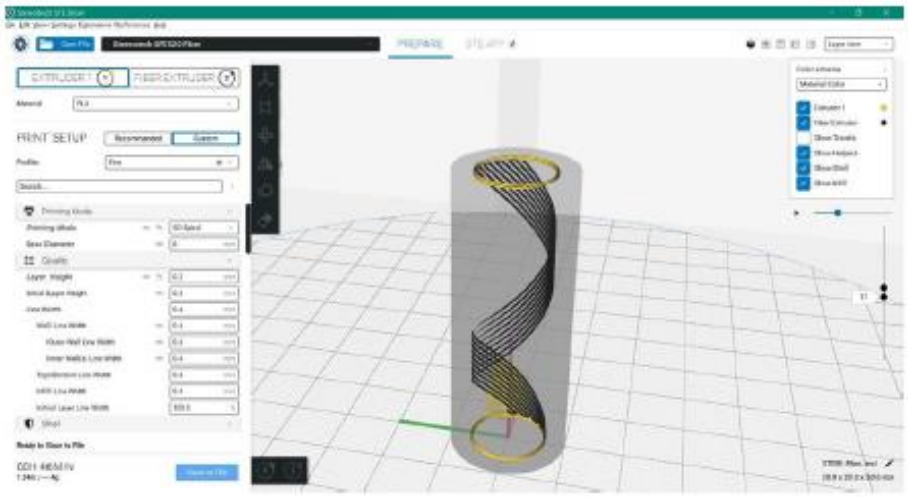


Рисунок 4.5 – Режим показу порядку укладання матеріалу у межах обраного шару

Режим показу ділянок армування та моменту відрізання матеріалу показано на малюнку 3.6. Викладення волокна після відрізу відображається тонкою блакитною лінією.

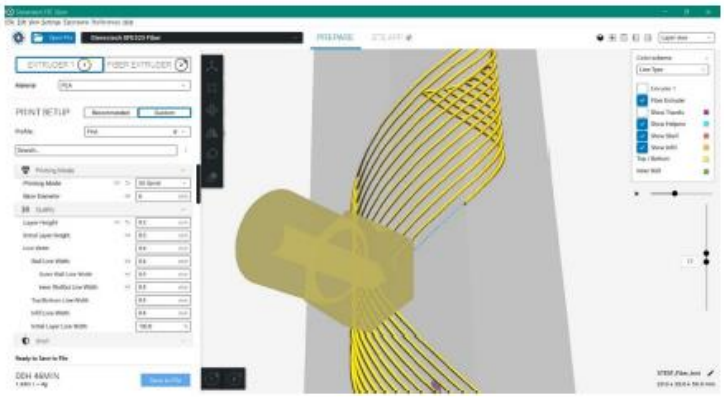


Рисунок 4.6 – Режим показу ділянок армування та моменту відрізання матеріалу

Для налаштування укладання волокна додано додаткові налаштування у категоріях «Якість» (ширина армуючої лінії), «Швидкість» (швидкість укладання волокна), «Матеріал» (коефіцієнт подачі та температура нагріву волокна) – рисунок 4.7, а також окрема категорія налаштувань армування, Reinforcement (рисунок 4).

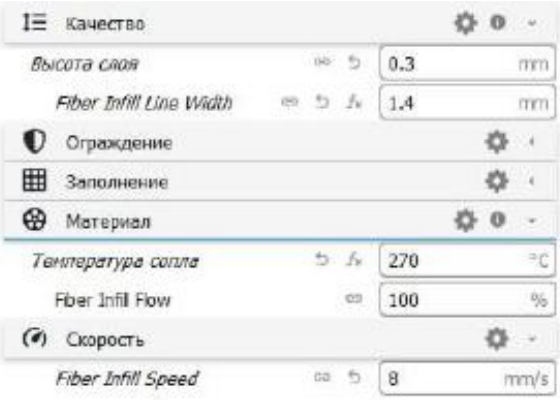



Рисунок 4.7 – Розподілені налаштування армування у загальних категоріях налаштувань STE Slicer

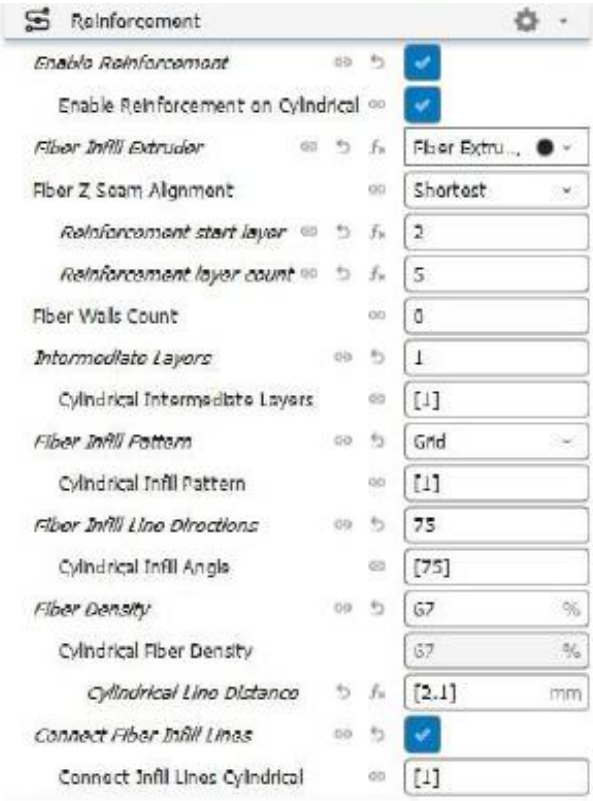


Рисунок 4.8 – Категорія налаштувань Reinforcement для налаштування армування безперервним волокном

Реалізація запропонованих способів побудови каркасів армуючих показана на прикладі конструктивно-подібного елемента у вигляді фрагмента шнекової вилки (рисунок 3.9, а). Товстими чорними лініями (рисунок 3.9 б) показані траєкторії укладання волокна. Залежно від конфігурації виробу налаштовується щільність укладання волокон ρF (рисунок 3.10 а), кут φ підйому ліній (рисунок 3.10 б) кількість армуючих контурів (якщо використовуються способи №5 або 6 – Рисунок 3.11). Тонкими чорними лініями показано довикладення волокна після кожного відрізу.

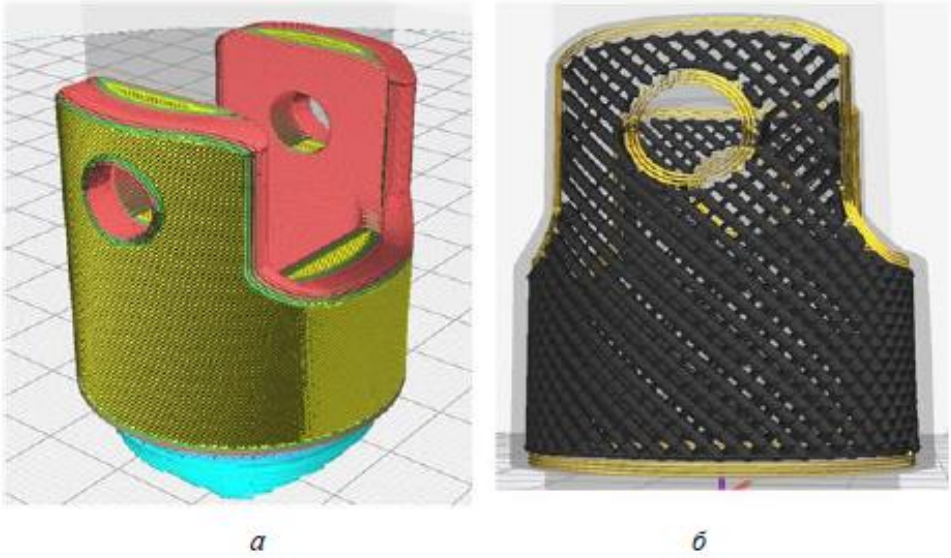



Рисунок 4.9 – Приклад візуалізації траєкторій під час підготовки керуючої програми друку з армуванням: а – загальний вигляд виробу; б - сітчасте армування за способом № 4, ρF = 100%, φ = 45 °

Кольоровими лініями показані траєкторії матеріалу матриці: зовнішні шари виробу, бічні контури армуючих шарів, а також заповнення проміжків між волокнами, якщо використовується щільність армування менше 100% (рис. 3.10 б). Траєкторії для матричного екструдера теж будуються автоматично за заданими параметрами друку.

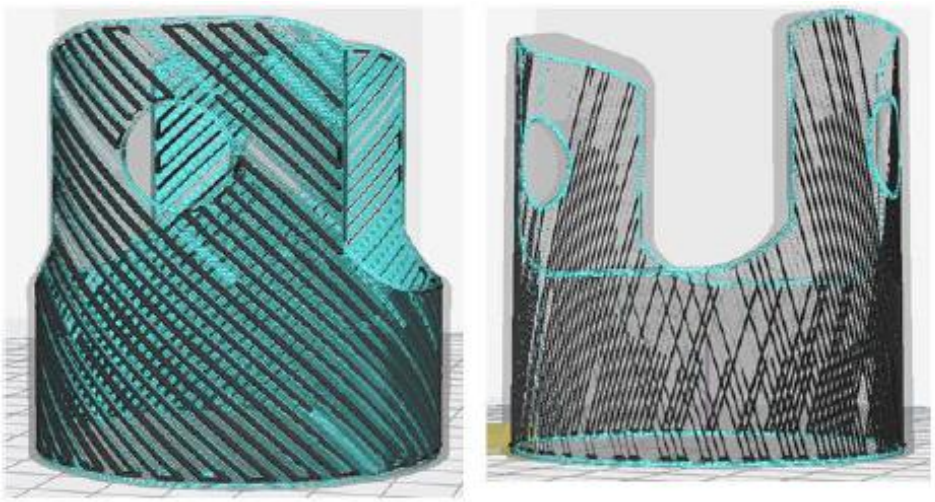


Рисунок 4.10 – Приклад візуалізації траєкторій під час підготовки керуючої програми друку з армуванням: а – лінійне армування за способом № 2, ρF = 50%, φ = 45°; б - лінійне армування за способом № 1, ρF = 100%, φ = 75 °

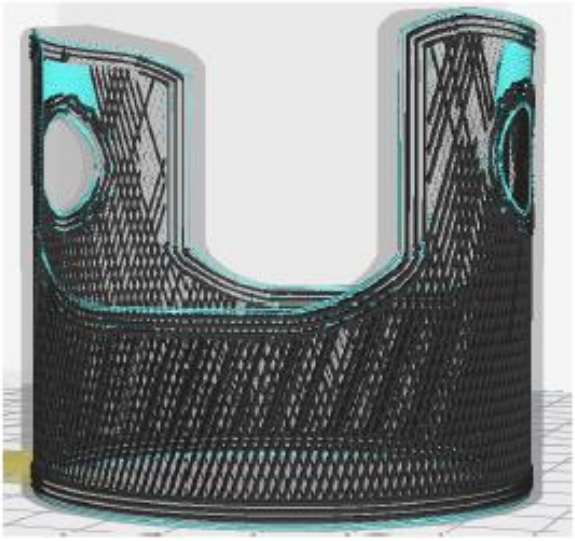


Рисунок 4.11 – Приклад візуалізації траєкторій під час підготовки керуючої програми друку з армуванням: комбіноване армування
за способом № 6, Nк = 3, ρF = 100%, φ = 75 °

# 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ДРУКУ З АРМУВАННЯМ І ХАРАКТЕРИСТИКАМИ АРМОВАНОГО ВИРОБУ

Всі наведені випробування проводилися за допомогою універсальних випробувальних машин ТРМ-С 10 Tochline A1 (похибка вимірювання сили ±1%), Instron 5969 (±0,4%), Biss UT-02-0025 (±0,5%), у відповідних підрозділах вказаних типів. пристосування. Подовження зразків при випробуваннях на розтяг, прогин зразків при випробуваннях на вигин фіксувалися побічно по переміщенню рухомий траверси.

Як матричний матеріал при виробництві зразків використовувалися різні термопластики у вигляді філаментів для FDM друку. Тип матеріалу та вказівка виробника наведені у відповідних підрозділах.

Як армуючий матеріал використовувався армуючий філамент круглого перерізу діаметром dF = 0,6 мм або 0,7 мм з вуглеволокна, просоченого PA6 (препрег з термопластичним сполучним). Для виготовлення препрега використовувався джгут Umatex UMT42S-3K, об'ємний вміст вуглеволокна у філаменті близько 50%.

## 5.1 Випробування на розтягування

Для визначення орієнтовних показників міцності армованих зразків проведено випробування 3D-друкованих зразків з плоским армуванням на розтягування відповідно до ГОСТ Р 56785-2015 [70] (методика підготовки та випробовування зразків, розрахунку механічних характеристик). Виготовлено та випробувано дві серії зразків:

− зразки з матрицею з TPU, армовані різною кількістю ліній вуглеволокна;

− зразки з матрицею з PA6 без армування та армовані 4 лініями вуглеволокна.

Ескіз зразка з розмірами представлений малюнку 4.1. У першій серії випробувань ширина зразка b відрізнялася кожної групи зразків, у другій серії виготовлялися зразки з фіксованим значенням b = 10 мм.

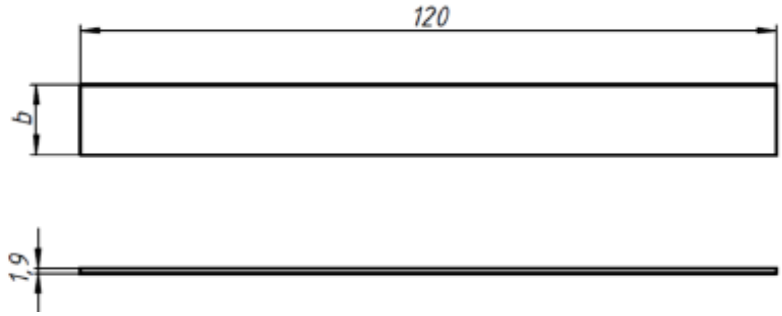



Рисунок 5.1 – Розміри зразка для випробування на розтягування: b – ширина зразка (різна для зразків із різних груп)

У першій серії дослідів виготовлено три групи армованих зразків із застосуванням матеріалів: матеріал матриці – TPU D70.

Розташування волокон у всіх армованих зразках – односпрямоване, вздовж лінії застосування навантаження. На малюнку 4.2, а показана загальна структура армування на прикладі зразка групи 3 (24 нитки вуглеволокна, по 8 ниток у кожному шарі), на малюнку 4.2 б - структура полімерного матеріалу у всіх неармованих шарах (3 контуру шириною 0,4 мм, заповнення лініями під кутом ± ).

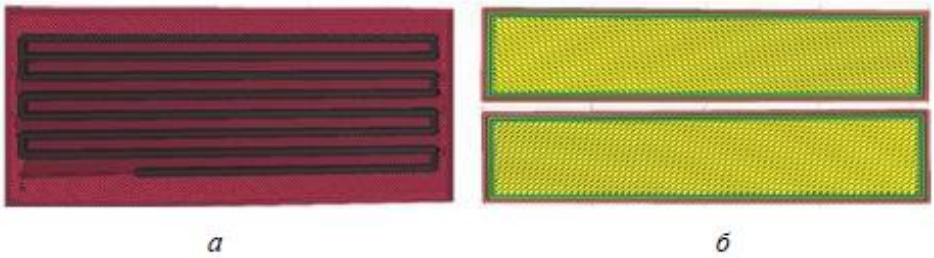



Рисунок 5.2: а – структура армування та ліній матриці на прикладі зразка групи 3 (24 нитки вуглеволокна); б - структура заповнення шарів пластику

Геометричні параметри армування для зразків групи 1 (6 ниток вуглеволокна) показані малюнку 4: кожна нитка при укладанні розкочується в лінію шириною близько 1,2 мм і товщиною близько 0,2 мм. Для армованих

зразків з інших груп геометрія армування аналогічна, залежно від кількості волокна рівномірно розподіляються по поперечному перерізу зразка.

Випробування зразків згідно з ГОСТ Р 56785-2015 проведено на універсальній випробувальній машині ТРМ-С 10 А1 з клиновими універсальними захватами (ЗКУ). Швидкість випробування – 50 мм/хв, відстань між затискачами складала 46 мм. Подовження зразків при випробуваннях фіксувалося на підставі даних про переміщення рухомої траверси. Усі зразки зруйнувалися у робочій зоні, фото зразків після випробувань наведено малюнку 4.3.

Діаграми розтягування зразків груп 1–3 як функція Р (ε) показані на малюнку 4.4 для двох зразків (№1 та №2) з кожної групи (6, 12 та 24 нитки УВ). Фіксувалися максимальне навантаження Pmax, Н і відповідне їй відносне подовження εmax, %.

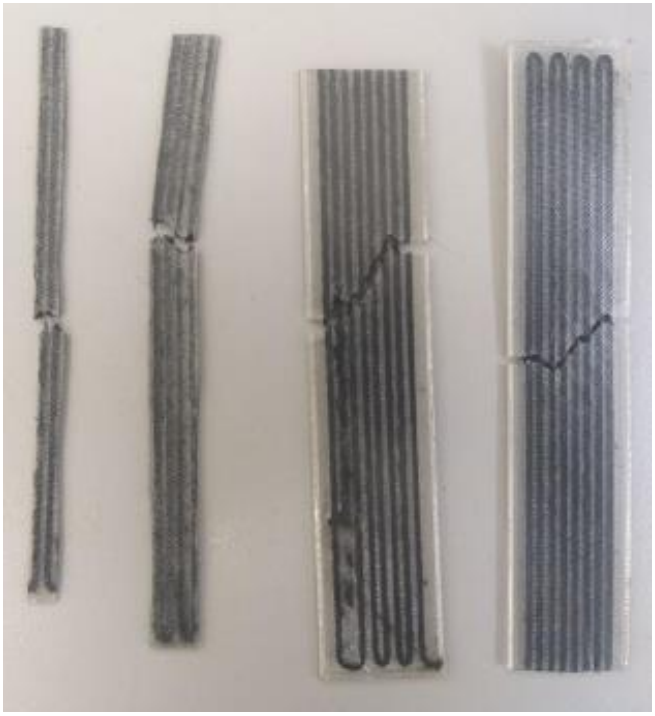


Рисунок 5.3 – Армовані зразки з TPU D70 груп 1–3 після випробувань

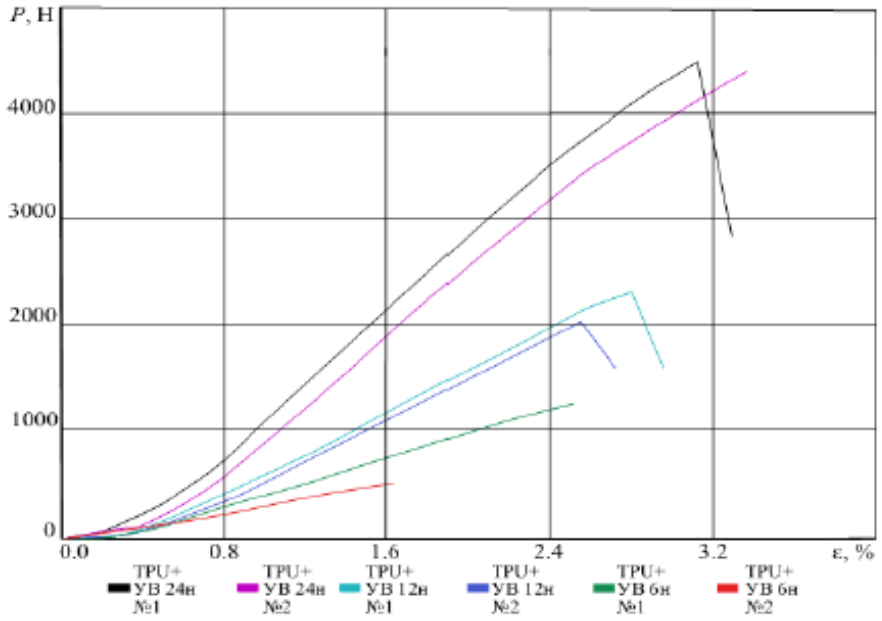
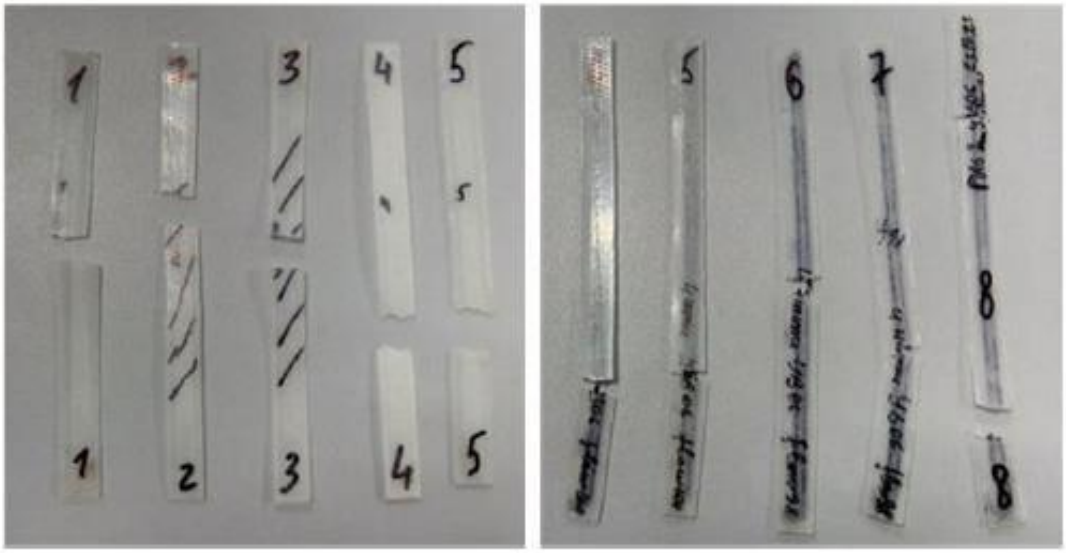



Рисунок 5.4 – Діаграми розтягування армованих зразків із TPU D70

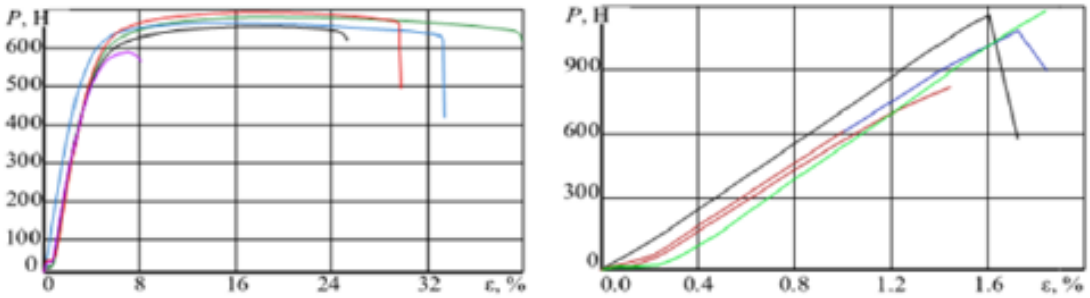
Такий характер руйнування дає підстави говорити про те, що практично всю функцію, що несе, в армованих зразках на собі несе саме вуглеволокно. Відповідно до цього межа міцності σmax розраховувалася для площі повного поперечного перерізу зразка s (згідно зі стандартною методикою) і окремо з урахуванням площі перерізу тільки зони армування sB, що складається з 6, 12 або 24 ниток.

Різницю між руйнуванням армованих та неармованих друкованих зразків добре ілюструє друга серія випробувань. Фото зруйнованих зразків з PA6 наведено малюнку 4.5. Термопласт PA6 - еластичний матеріал, який при розтягуванні подовжується до 10-20% від початкової довжини, що також демонструє діаграму розтягування неармованих зразків (рис. 4.6 а). У той же час діаграми для армованих зразків мають значно різкіший нахил і обриваються при подовженні 1,5–2.0% при більшому навантаженні (рис. 4.6, б).



*а* *б*

Рисунок 5.5 – Зразки з PA6 після випробувань: а – неармовані зразки; б - армовані зразки з 4 нитками вуглеволокна




*а* *б*

Рисунок 5.6 – Діаграма розтягування зразків із другої серії випробувань:

а – неармовані зразки PA6; б - армовані зразки PA6 + УВ (4 нитки)

У першій серії випробувань досліджувався вплив коефіцієнта подачі ksF армуючого філаменту на межу міцності (рисунок 4.7). При зменшенні коефіцієнта на 5% межа міцності в середньому збільшується на 15–20%, причому цей ефект спостерігався для армуючого філаменту двох діаметрів УВ06 та УВ07 із партій, зроблених із різницею у півроку. Збільшення міцності рахунок зменшення подачі може пояснюватися створенням попереднього натягу армуючих ліній у каркасі. Однак розкид результатів при зменшенні коефіцієнта подачі також зростає з 10 до 20%, а проміжні значення коефіцієнта

0,98 і 0,965 показали нестабільні результати на рівні навіть гіршому, ніж при номінальному значенні ksF = 1.

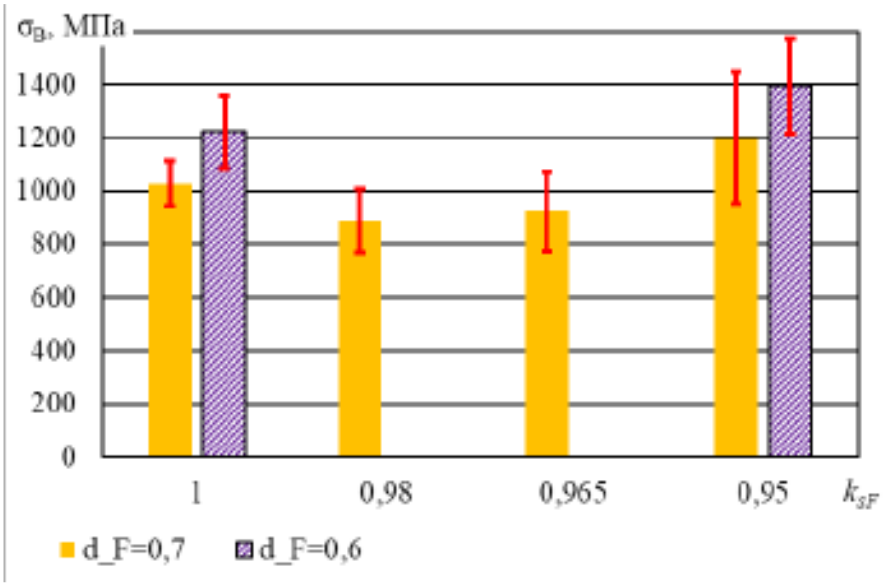



Рисунок 5.7 – Вплив коефіцієнта подачі волокна ksF на межу міцності при розтягуванні σB

У другій серії випробувань досліджувався вплив швидкості укладання волокна та коефіцієнта подачі на межу міцності (рисунок 4.8). При номінальному значенні ksF = 1 збільшення швидкості укладання волокна не мало істотного впливу на межу міцності, однак зі зменшеним коефіцієнтом подачі ksF = 1 збільшення швидкості призвело до підвищення межі міцності до 10%. Втім, підвищений розкид результатів випробувань при зниженні коефіцієнта ksF не дає однозначно судити про те, чи є позитивний зв'язок між швидкістю укладання волокна і міцністю, але отримані результати дозволяють укласти, що в межах встановленого діапазону швидкостей від 5 до 15 мм/с збільшення швидкості не погіршує проч.

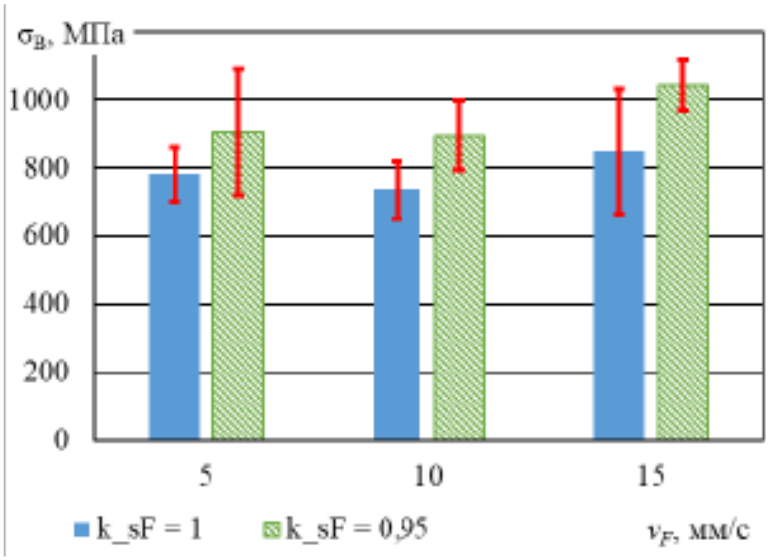



Рисунок 5.8 – Вплив швидкості укладання волокна vF, коефіцієнта подачі волокна ksF на межу міцності при розтягуванні σB

Обмеженням швидкості укладання волокна виступає достатність сили адгезійної взаємодії між матеріалами матриці та армування – якщо викладати волокно занадто швидко, воно не приклеюватиметься до поверхні шару матричного матеріалу.

Через складнощі з обробкою результатів випробування на статичний вигин часто вважаються другорядними, і їх результати не рекомендують використовувати при розрахунках армованих конструкцій. Тим не менш, це дуже поширений вид випробувань завдяки своїй простоті, можливості оцінити вплив умов технологічного процесу виробництва зразків на їх властивості міцності, а також великому об'єму одержуваної інформації: за результатами випробувань можливо розрахувати межу міцності по нормальних напруг, міцність при міжшаровому зсуві, модуль пружності при згинанні і модуль між пружністю. 207].

Об'ємно армовані зразки із вмістом волокна 13–19% показали у півтора-три рази більші значення межі міцності, максимуму дотичних напруг та модуля міжшарового зсуву. Видно якісна відмінність у характері руйнації. На плоских зразках (малюнки 5.9, 5.10) добре помітно розшарування, сліди міжшарового зсуву, а також у зоні стиснення – розпад армуючого джгута на окремі волокна, що видно на зразку XY. Усі об'ємно армовані зразки

ламаються з чітким утворенням тріщини в середньому перерізі (малюнки 5.11, 5.12).

Найкращі результати показав циліндричний зразок. Зразки такої форми ГОСТом не передбачені, проте при менших розмірах перерізу він витримав майже таке ж навантаження, причому і модуль пружності для нього виявився на 60% більше, ніж для зразків з плоским армуванням. У цьому циліндричний зразок повністю симетричний – тобто. незалежно від того, в якому напрямку буде прикладено згинальне навантаження, він покаже однакові характеристики, на відміну від плоских зразків.

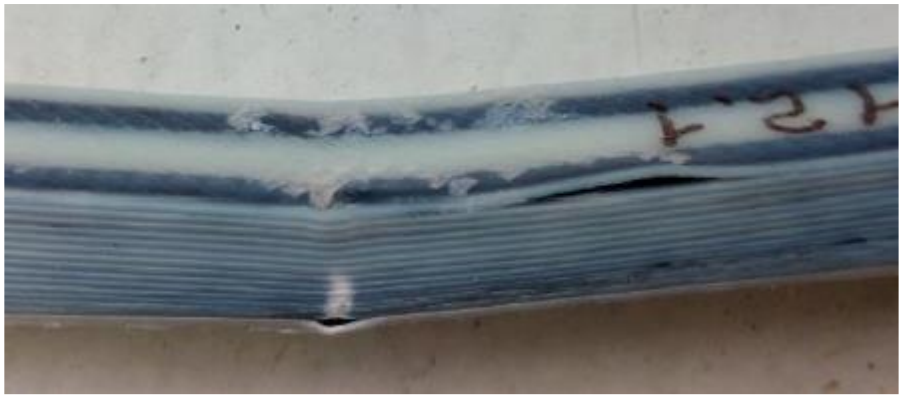


Рисунок 5.9 – Характерне руйнування зразків групи 1 з плоским армуванням XY – міжшарове зрушення (розшарування зразка)

Рисунок 5.10 – Характерне руйнування зразків групи 2 з плоским армуванням XZ – міжшарове зрушення (розшарування зразка)

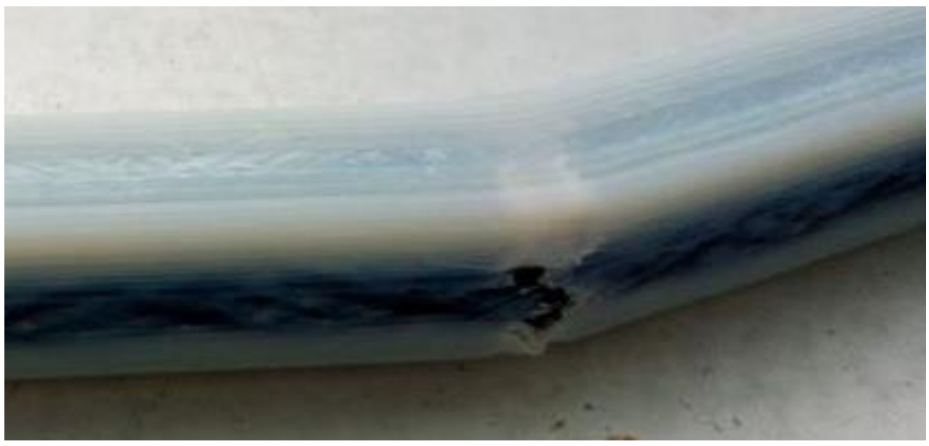


Рисунок 5.11 – Характерне руйнування зразків групи 2 з плоским армуванням XZ – міжшарове зрушення (розшарування зразка)

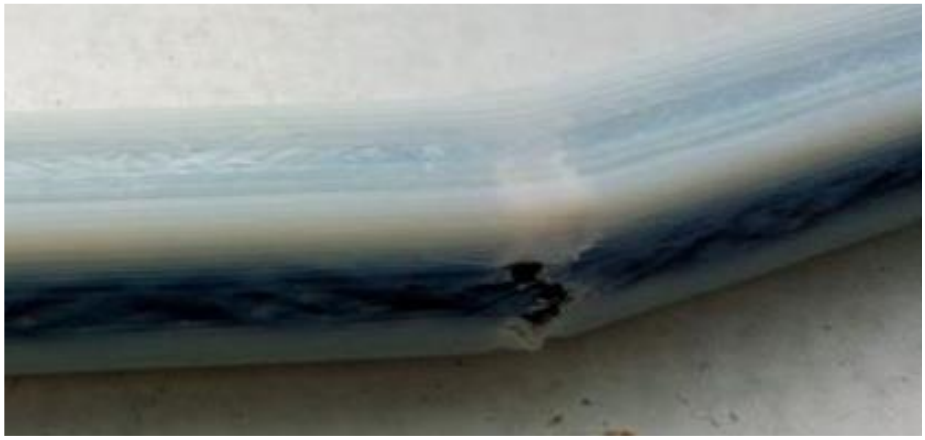


Рисунок 5.12 – Характерне руйнування зразків груп 4-6 у вигляді брусків із сітчастим циліндричним армуванням – розтягування

Рисунок 5.13 – Характерне руйнування зразків групи 7 у вигляді циліндрів із сітчастим циліндричним армуванням – розтягування

За підсумками випробування зразків із п'ятиосьовим армуванням на вигин можна встановити такі закономірності.

Найбільшу ефективність показують зразки, повністю побудовані із замкнутих шарів, як циліндричні зразки групи 7 – межа міцності, максимальні дотичні напруги та модуль зсуву до 2,5 разів більше, ніж у плоско армованих зразків з тим самим вмістом армування. При цьому зразки групи 6 у вигляді брусків з аналогічною структурою армуючого сітчастого каркаса показали меншої концентрації армуючих волокон і більшої товщини зразка.

Незважаючи на те, що зразки у вигляді брусків з циліндричним армуванням показали меншу міцність, ніж зразки циліндричної форми, порівняно з плоско армованими зразками вони показали схожі або кращі показники максимальних нормальних і дотичних напруг, зсуву модуля, тобто. всіх обчислених параметрів, крім модуля пружності при згинанні. Руйнування цих зразків також відбувалося без значного розшарування. У той же час зразки з п'ятиосьовим армуванням з кутом підйому армуючих ліній φ = 45°, випробування яких описані в статті [48], показали, навпаки, гірші результати, ніж зразки з плоским армуванням. Це підтверджує висунуту в розділі 2 гіпотезу про те, що для згинальних навантажень слід використовувати лінійні або сітчасті армуючі каркаси, побудовані за способами № 1-4 або № 6 зі значеннями φ ≥ 70 °.

Як по нормальних, так і по дотичних напруг для зразків у вигляді брусків з п'ятиосьовим сітчастим армуванням (групи 4-6) приріст міцності при збільшенні щільності укладання волокон ρF з 75% до 100% незначний (рисунок 4.14), при цьому розкид значень збільшується майже в армуючого волокна.

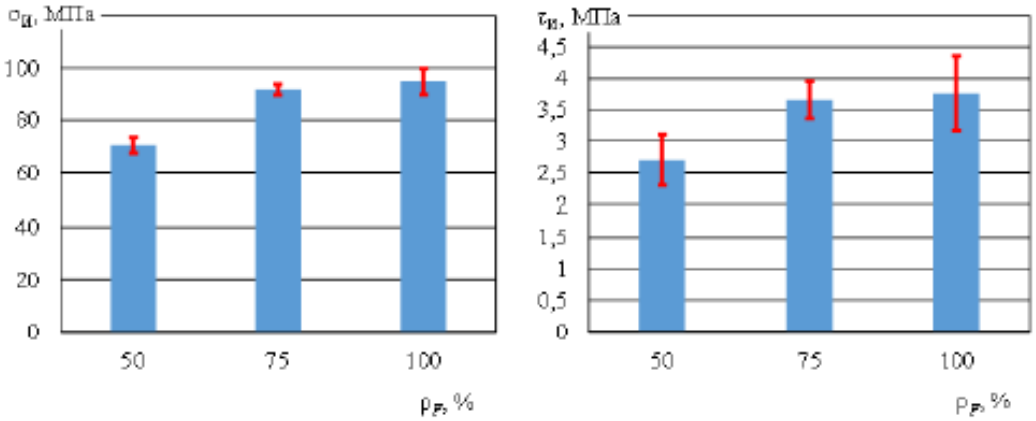


Рисунок 5.14 – Вплив щільності укладання армуючих ліній ρF на показники міцності при статичному вигині

Проведено експериментальну роботу зі встановлення взаємозв'язків між значеннями технологічних параметрів та механічними характеристиками армованих виробів. За результатами виробництва та випробування зразків для основних технологічних параметрів друку з армуванням визначено раціональні для більшості випадків діапазони значень, визначено взаємозв'язки між значеннями деяких параметрів та критеріями якості кінцевого армованого виробу – його міжшаровою міцністю, властивостями міцності при розтягуванні та при статичному вигині.

# РОЗДІЛ 6
# РОЗРОБКА ДИДАКТИЧНОГО ПРОЄКТУ ФАКУЛЬТАТИВНОГО ЗАНЯТТЯ НА ТЕМУ «ПІДВИЩЕННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИРОБІВ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ЗА П'ЯТИОСЬОВОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ FDM»

## 6.1. Постановка цілей факультативного заняття з теми «Підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією FDM»

В таблиці 6.1 наведено оперативні цілі з теми.

Таблиця 6.1

Постановка цілей факультативного заняття

| Цілі факультативного заняття | Цілі формування різних рівнів засвоєння навчального матеріалу | Умови досягнення цілей | Результат у вигляді дій здобувачів освіти |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Сформувати знання та практичні уміння для підвищення міцності виробів, виготовлених методом п’ятиосьового FDM-друку | Рівень знань: – засвоєння принципів п’ятиосьового друку та факторів, що впливають на міцність виробів; – розуміння властивостей матеріалів та параметрів друку; – ознайомлення з можливостями CAD/CAM/CAE-систем. | Доступ до сучасних цифрових систем, лабораторне обладнання для моделювання та експериментів, навчальні кейси та приклади виробів | Використовують цифрові інструменти для моделювання виробів, аналізують фактори міцності, прогнозують вплив параметрів друку |

Продовження табл. 6.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Розвинути практичні навички оптимізації технологічних процесів | Рівень умінь: – моделювання виробів та симуляція механічних навантажень; – оптимізація параметрів друку; – визначення критичних зон виробу та підбір заходів для їх зміцнення | Лабораторні та практичні заняття з використанням адитивного обладнання, доступ до програмного забезпечення для симуляцій | Оптимізують параметри друку для підвищення міцності виробів, пропонують шляхи усунення дефектів та покращення процесу |
| Формування компетентностей для самостійного прийняття рішень у виробничих процесах | Рівень компетентностей: – інтеграція теоретичних знань, цифрового моделювання та практичних навичок; – самостійне моделювання та вдосконалення технологічних процесів; – аналіз та обґрунтування рішень для підвищення якості продукції | Інтегровані навчальні середовища, доступ до кейсів з реальних виробничих ситуацій, підтримка наставника | Демонструють здатність приймати обґрунтовані рішення щодо підвищення міцності виробів та вдосконалення процесів, застосовують комплексний підхід до аналізу та оптимізації технології |

## 6.2. Перелік літературних джерел з теми

1. Гібсон І., Розен Д., Стакер Б. Технології адитивного виробництва: 3D-друк, швидке прототипування та цифрове виробництво. – К. : Видавництво Springer, 2021. – 450 с.

2. Чуа Ч.К., Леонг К.Ф., Лім С.С. Швидке прототипування: принципи та застосування. – Харків : Видавництво World Scientific, 2020. – 520 с.

3. Нго Т.Д., Кашані А., Імбальцано Г., Нгуєн К.Т.К., Хуї Д. Адитивне виробництво (3D-друк): огляд матеріалів, методів, застосувань та проблем. – Журнал «Композити. Частина B: Інженерія», 2018, т. 143, с. 172–196.

4. Хуанг Й., Леу М.Ч., Мазумдер Дж., Донмез А. Адитивне виробництво: сучасний стан, перспективи, прогалини та рекомендації. – Журнал «Наука та інженерія виробництва», 2019, т. 141, № 4, 04080.

## 6.3. Конструювання дидактичних матеріалів з теми «Підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією FDM»

Конструювання дидактичних матеріалів для факультативного заняття з підвищення міцнісних характеристик виробів, виготовлених методом адитивного виробництва за п’ятиосьовою технологією FDM, передбачає створення системи навчальних ресурсів, яка поєднує теоретичну підготовку, цифрове моделювання та практичні завдання. Основною метою конструювання матеріалів є забезпечення цілісного, логічно послідовного та доступного викладу інформації, що дозволяє студентам ефективно освоювати складні технологічні процеси та формувати професійні компетентності.

Дидактичні матеріали включають кілька компонентів. Першим є теоретичний блок, який містить основи п’ятиосьового FDM-друку, фізико-механічні властивості матеріалів, вплив структури шару, товщини та напрямку накладання нитки на міцність виробів. Цей блок супроводжується схемами

технологічних процесів, графіками розподілу напружень у виробах та прикладами розрахунку параметрів друку. Використання наочних ілюстрацій сприяє кращому засвоєнню матеріалу та дозволяє студентам швидко орієнтуватися у складних технологічних процесах.

Другим компонентом є цифрові матеріали, які включають CAD/CAM/CAE-моделі виробів, симуляційні файли та інструкції для роботи з програмним забезпеченням. Ці ресурси дозволяють студентам моделювати виробничі процеси, прогнозувати міцність виробів та оцінювати вплив зміни параметрів друку на кінцеві характеристики. Використання цифрових тренажерів і симуляторів створює безпечне середовище для експериментування, що знижує ризики пошкодження обладнання та матеріалів, а також формує навички роботи з сучасними технологіями у реальних умовах виробництва.

Третім компонентом є практичний блок, що містить лабораторні та контрольні завдання. Студенти виконують моделювання виробів, налаштовують параметри друку, аналізують критичні ділянки виробів та проводять оптимізацію технологічного процесу. Практичні вправи передбачають розробку рекомендацій щодо покращення міцнісних характеристик, порівняння результатів цифрового моделювання з реальними експериментами та аналіз причин відхилень. Такий підхід сприяє розвитку аналітичного мислення, практичних умінь і професійної автономії студентів.

Дидактичні матеріали повинні бути структуровані логічно, послідовно та відповідати рівню підготовки студентів. Для ефективного засвоєння матеріалу рекомендується поєднувати лекційні пояснення, наочні схеми, цифрові симуляції та практичні вправи. Крім того, до матеріалів варто включати контрольні питання, завдання для самостійної роботи та кейси, що моделюють реальні виробничі ситуації, щоб студенти навчалися приймати обґрунтовані рішення і прогнозувати результати технологічних процесів.

Таким чином, конструювання дидактичних матеріалів для теми «Підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом

адитивного виробництва за п’ятиосьовою технологією FDM» ґрунтується на поєднанні теоретичних знань, цифрових симуляцій та практичних завдань. Така комплексна структура матеріалів забезпечує формування у студентів необхідних професійних компетентностей, навичок оптимізації технологічних процесів та самостійного прийняття рішень, що є критично важливим для підготовки висококваліфікованих фахівців у сучасному машинобудівному виробництві.

### 6.4. Аналіз базових умов навчання з теми «Підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією FDM»

В таблиці 6.2 приведено вибір базових понять, визначення способів перевірки та формування базових знань.

Таблиця 6.2

Вибір базових понять, визначення способів перевірки та формування базових знань

| Перелік базових понять, законів, способів дії | Способи (методи, форми, засоби) перевірки рівня сформованості базових знань і способів дій | Способи актуалізації або поповнення базових знань і способів дій |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| Матеріалознавство | Метод – усне опитування.<br>Форма – фронтальна.<br>Засіб – контрольні питання.<br>1.Які основні властивості полімерних матеріалів впливають на міцність виробів, виготовлених методом FDM?<br>2. Як структура шару та орієнтація нитки впливають на механічні характеристики виробу? | Використання навчальних кейсів і проблемних ситуацій, які демонструють практичні аспекти застосування |

| Перелік базових понять, законів, способів дії | Способи (методи, форми, засоби) перевірки рівня сформованості базових знань і способів дій | Способи актуалізації або поповнення базових знань і способів дій |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| | | п’ятиосьового друку у |

Продовження табл. 6.2

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| | 3. Які методи підвищення міцності полімерних та композитних виробів використовуються у адитивному виробництві?<br>4. В чому полягає роль наповнювачів та композитних матеріалів для підвищення міцнісних властивостей виробів? | реальному виробництві Студенти аналізують конкретні приклади виробів, визначають критичні зони, оцінюють вплив параметрів друку та пропонують шляхи оптимізації процесу. Такий підхід сприяє поєднанню теоретичних знань із практичними навичками і формує здатність приймати обґрунтовані рішення. |
| Технологія машинобудування | 1. Які особливості п'ятиосьового FDM-друку відрізняють його від класичних тривісових систем?<br>2. Які параметри друку (швидкість, температура, товщина шару) найбільш критично впливають на міцність виробів?<br>3. Як орієнтація виробу на платформі друку впливає на його механічні характеристики?<br>4. Які технологічні процеси використовуються для контролю якості виробів у FDM-друку? | |
| Системи автоматизованого проектування (CAD/CAM/CAE) | 1. Як CAD/CAM/CAE-системи застосовуються для моделювання виробів і прогнозування їх міцності?<br>2. Які фактори слід враховувати при цифровому моделюванні виробів для оптимізації технології друку?<br>3. Які методи симуляції навантажень на виріб дозволяють оцінити критичні ділянки виробу?<br>4. Як результати цифрового моделювання можуть впливати на вибір параметрів друку? | |
| Механіка та опір матеріалів | 1. Як визначається напруження у виробі, що виготовлений методом FDM?<br>2. Які методи оцінки міцності виробів використовуються для анізотропних матеріалів?<br>3. Що таке критичні зони виробу і як їх визначають?<br>4. Як деформації шару впливають на загальну міцність виробу? | |

Продовження табл. 6.2

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| Інженерна графіка | 1. Як підготовка креслень та технічної документації впливає на точність і міцність виробів?<br>2. Чому важливо враховувати орієнтацію шарів при створенні виробничих інструкцій для п’ятиосьового FDM-друку?<br>3. Які основні елементи креслення слід вказувати для оптимальної роботи 3D-принтера? | |
| Основи адитивного виробництва | 1. Які переваги та недоліки FDM-технології порівняно з іншими методами адитивного виробництва?<br>2. Які критерії вибору технології друку для забезпечення високої міцності виробу?<br>3. Які методи контролю якості виробів дозволяють оцінити їх надійність та відповідність нормативним вимогам?<br>4. Як проводяться випробування виробів на міцність після друку та які основні показники оцінюються? | |

## 6.5. Проєктування мотиваційних технологій навчання з теми «Підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією FDM»

На рис. 6.3 представимо характеристику мотиваційних технологій навчання.

Таблиця 6.3

Визначення способів реалізації мотивації

| Способи реалізації мотивації | Внутрішня мотивація |
|---|---|
| 1 | 2 |
| Вступна мотивація | Доброго дня, шановні здобувачі освіти! Сучасне машинобудування активно впроваджує адитивні технології, |

Продовження табл. 6.3

| 1 | 2 |
|---|---|
| | зокрема FDM-друк, як засіб швидкого виготовлення складних виробів із високими вимогами до міцності та надійності. П’ятиосьова технологія друку відкриває нові можливості для створення виробів складної геометрії, але водночас ставить перед інженерами та операторами серйозні завдання щодо забезпечення оптимальних механічних характеристик. Тому підвищення міцності виробів стає критично важливим аспектом їх експлуатаційної придатності та конкурентоспроможності продукції.<br>Для фахівця сучасного машинобудівного підприємства необхідно не лише розуміти принципи роботи адитивних систем, а й володіти компетенціями щодо аналізу матеріалів, оптимізації параметрів друку, цифрового моделювання та оцінки міцності виробів. Знання та навички, отримані під час вивчення цієї теми, дозволяють ефективно прогнозувати поведінку виробів під навантаженням, виявляти критичні ділянки, вдосконалювати технологічні процеси та забезпечувати високу якість продукції.<br>Мотивація для студентів полягає у формуванні усвідомлення того, що володіння сучасними інструментами та методами оптимізації адитивного виробництва відкриває реальні професійні перспективи. Практичне застосування отриманих знань сприяє розвитку аналітичного мислення, технічної творчості та здатності до самостійного прийняття рішень, що безпосередньо впливає на результативність роботи в інноваційних виробничих середовищах.<br>Таким чином, опанування теми «Підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п’ятиосьовою технологією FDM» мотивує студентів до активного навчання, поєднання теорії та практики, розвитку професійних навичок і компетентностей, необхідних для сучасного високотехнологічного виробництва. |

## 6.6. Проєктування технології формування орієнтовної основи діяльності на факультативному занятті з теми «Підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією FDM»

Вибір методів, форм та засобів формування ООД наведено в таблиці 6.4

Таблиця 6.4

Способи формування ООД на факультативному занятті

| Рівень засвоєння (Блум) | Форми організації навчання | Методи навчання | Засоби навчання |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Запам’ятовування (Remember) – відтворення фактів, понять, термінів | Лекції, семінари, фронтальні опитування | Усне опитування, повторення, читання | Презентації, схеми, таблиці, навчальні матеріали, відео |
| Розуміння (Understand) – пояснення, інтерпретація, узагальнення | Семінари, дискусії, групові обговорення | Пояснення, аналіз прикладів, порівняння процесів | Схеми процесів FDM-друку, ілюстрації, відео демонстрації |
| Застосування (Apply) – використання знань у практичних завданнях | Лабораторні та практичні заняття | Демонстрація, виконання практичних завдань, моделювання | 3D-принтер, CAD/CAM/CAE-системи, матеріали для друку, креслення |
| Аналіз (Analyze) – виявлення причин, розчленування процесів | Робота з кейсами, групові проекти | Аналіз прикладів, розв’язання проблем, порівняння результатів | Комп’ютерні симуляції, цифрові моделі, програмне забезпечення для розрахунку міцності |

Продовження табл. **6**.4

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Синтез (Create) – створення нового, оптимізація процесів | Проектна робота, інтегровані практикуми | Розробка технологічних рішень, моделювання оптимальних параметрів | CAD/CAM/CAE, інтегровані середовища, цифрові тренажери, лабораторні стенди |
| Оцінювання (Evaluate) – обґрунтування рішень, контроль якості | Самостійна робота, індивідуальні проекти | Оцінка виробів, аналіз результатів, прийняття рішень | Тести, лабораторні звіти, моделі для експериментальної перевірки міцності |

## 6.7 Проєктування технології формування виконавчих дій на факультативному занятті з теми «Підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією FDM»

Вибір методів, форм та засобів формування виконавчих дій наведено в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5

Способи формування виконавчих дій з теми

| Рівні засвоєння навчального матеріалу | Форми, методи, засоби |
|---|---|
| 1 | 2 |
| I, II, III, IV | Вправа 1. Аналіз матеріалів та параметрів друку<br>Мета: Ознайомити студентів із властивостями полімерів і композитів, що застосовуються для FDM-друку.<br>Завдання:<br>• Ознайомитись із характеристиками кількох видів матеріалів для FDM (ABS, PLA, нейлон з наповнювачем).<br>• Проаналізувати вплив товщини шару, швидкості друку та температури на міцність виробів. |

| Рівні засвоєння навчального матеріалу | Форми, методи, засоби |
|---|---|
| | • Підготувати таблицю з рекомендованими параметрами для різних матеріалів. |

Продовження табл. 6.5

| 1 | 2 |
|---|---|
| | Вправа 2. Цифрове моделювання виробів<br>Мета: Формування навичок роботи з CAD/CAM/CAE для прогнозування міцності виробів.<br>Завдання:<br>• Створити 3D-модель виробу у CAD-системі.<br>• Провести симуляцію механічного навантаження у CAE-системі.<br>• Визначити критичні зони виробу та підготувати висновки щодо оптимізації конструкції. |
| | Вправа 3. Налаштування та оптимізація процесу друку<br>Мета: Закріпити навички налаштування п’ятиосьового FDM-принтера для підвищення міцності виробів.<br>Завдання:<br>• Встановити параметри друку відповідно до типу матеріалу та геометрії виробу.<br>• Друкувати тестові зразки та оцінити їхню якість.<br>• Внести зміни до параметрів для підвищення міцності та повторити друк. |
| | Вправа 4. Вимірювання механічних характеристик виробів<br>Мета: Навчити студентів проводити експериментальну оцінку міцності виробів.<br>Завдання:<br>• Провести випробування зразків на розтяг, вигин або стиск.<br>• Занести результати вимірювань у таблицю.<br>• Порівняти експериментальні дані з результатами цифрового моделювання. |
| | Вправа 5. Розробка рекомендацій з підвищення міцності виробів |

| | |
|---|---|
| | Мета: Формування компетентності у прийнятті технічних рішень.<br>Завдання:<br>• Проаналізувати результати моделювання та експериментів.<br>• Скласти рекомендації щодо зміни геометрії виробу, структури шару та параметрів друку.<br>• Підготувати звіт із пропозиціями оптимізації технологічного процесу для виробництва виробів з підвищеною міцністю. |

## 6.8 Проєктування контрольних дій з теми «Підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією FDM»

Вибір методів, форм та засобів формування контрольних дій наведено в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6

Засоби контролю з теми факультативного заняття

| Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття | Форми, методи, засоби |
|---|---|
| 1 | 2 |
| III рівень | Контрольні питання.<br>1. Які основні властивості матеріалів впливають на міцність виробів, виготовлених методом FDM?<br>2. Як товщина шару та орієнтація нитки впливають на механічні характеристики виробу?<br>3. Які фактори технологічного процесу друку найбільш критично впливають на надійність виробу?<br>4. Чим відрізняється п’ятиосьовий FDM-друк від класичного тривісового з точки зору міцності виробів?<br>5. Які методи цифрового моделювання використовуються для прогнозування міцності виробів?<br>6. Як CAD/CAM/CAE-системи допомагають у оптимізації параметрів друку?<br>7. Що таке критичні зони виробу і як їх визначають у процесі моделювання та друку?<br>8. Які види експериментальних випробувань застосовуються для оцінки міцності виробів FDM?<br>9. Як результати цифрового моделювання співвідносяться з реальними експериментальними даними? |

| Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття | Форми, методи, засоби |
|---|---|
| 1 | 2 |
| | **10.** |

Продовження табл. 6.6

| 1 | 2 |
|---|---|
| | 11. Які методи підвищення міцності виробів застосовуються на етапі проєктування та друку?<br>12. Як зміна геометрії виробу впливає на його механічні характеристики?<br>13. Які критерії вибору матеріалу для виробів із підвищеними міцнісними властивостями?<br>14. Як інтеграція теоретичних знань, цифрового моделювання та практичних вправ сприяє підвищенню компетентності фахівця?<br>15. Яким чином параметри друку впливають на внутрішню структуру шару та анізотропію матеріалу?<br>16. Які заходи слід застосовувати для оптимізації виробничого процесу з метою підвищення надійності та якості виробів? |

## 6.9 Розробка сценарію факультативного заняття з теми «Підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п'ятиосьовою технологією FDM»

Сценарій заняття, його структура й зміст структурних елементів представлені у вигляді табл. 6.7.

Таблиця 6.7

Сценарій заняття з теми заняття

| № з/п | Структурні елементи заняття | Зміст структурних елементів |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Організаційний момент | Привітання студентів, перевірка присутніх. Налаштування на робочу атмосферу та |

| | | |
|---|---|---|
| | | концентрацію на темі заняття. Пояснення важливості безпечної роботи на адитивному обладнанні та дотримання технологічної дисципліни. |
| 2 | Повідомлення теми і мети заняття | Тема: «Підвищення міцнісних характеристик виробів, отриманих методом адитивного виробництва за п’ятиосьовою технологією FDM». |

Продовження табл. 6.7

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| | | Мета: сформувати у студентів теоретичні знання та практичні навички щодо аналізу міцності виробів, оптимізації параметрів друку та використання цифрового моделювання для підвищення надійності та якості продукції. |
| 3 | Мотивація навчальної діяльності | Обговорення актуальності теми: підвищення експлуатаційної надійності виробів, зменшення дефектів та витрат матеріалів, впровадження інноваційних технологій у виробництво. Демонстрація прикладів застосування п’ятиосьового FDM-друку у сучасному машинобудуванні та прототипуванні. |
| 4 | Актуалізація базових знань | Усне опитування студентів щодо: • Властивостей матеріалів для FDM-друку; • Основних принципів роботи п’ятиосьового принтера; • Впливу товщини шару, швидкості друку та орієнтації шару на міцність виробу; • Основ цифрового моделювання для прогнозування механічних характеристик. Методи: усне опитування, дискусія. Форма: фронтальна. Засоби: креслення, схеми, контрольні питання. |
| 5 | Формування нового навчального досвіду (ООД) | Демонстрація прикладу моделювання та друку виробу на п’ятиосьовому FDM-принтері. Студенти аналізують запропонований процес, виявляють критичні зони, обговорюють можливі помилки та пропонують шляхи підвищення міцності та надійності. Методи: пояснення, демонстрація, лекція-дискусія, мозковий штурм. |
| 6 | Формування вмінь та дій (ВД) | Практичні вправи: 1. Аналіз цифрової моделі виробу та визначення критичних зон навантаження; 2. Розробка параметрів друку для підвищення міцності; 3. Моделювання навантажень у CAE-системі; 4. Вибір оптимальної орієнтації шару та |

| | | |
|---|---|---|
| | | структури заповнення; 5. Підготовка рекомендацій для підвищення надійності та експлуатаційних характеристик виробів. |
| 7 | Формування компетентності (КД) | Контрольні питання та обговорення: • Вплив параметрів друку на механічні властивості виробів; • Методи підвищення міцності та надійності виробів; • Використання цифрового моделювання |

Продовження табл. 6.7

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| | | для оптимізації процесів; • Оцінка результатів практичних експериментів та цифрових симуляцій. |
| 8 | Підбиття підсумків, видача домашнього завдання | Підсумок заняття: важливість оптимізації параметрів друку та цифрового моделювання для підвищення міцності та надійності виробів. Домашнє завдання: підготувати звіт із цифрового моделювання виробу, аналізом критичних зон та пропозиціями щодо підвищення механічних характеристик. |

**Висновки до розділу 6**

У результаті проведеного аналізу та розробки дидактичного проєкту факультативного заняття встановлено, що застосування комплексного підходу до навчання дозволяє ефективно формувати у студентів необхідні професійні компетентності для роботи з п’ятиосьовим FDM-друком. Розроблений проєкт поєднує теоретичну підготовку, цифрове моделювання та практичні вправи, що забезпечує глибоке засвоєння знань про параметри друку, властивості матеріалів і методи підвищення міцнісних характеристик виробів.

Практичні вправи, включені до проєкту, дозволяють студентам не лише відпрацьовувати навички налаштування принтера та моделювання виробів, але й аналізувати результати експериментальних досліджень, оптимізувати параметри друку та розробляти рекомендації щодо підвищення надійності продукції. Це сприяє формуванню у студентів аналітичного мислення,

технічної самостійності та здатності до прийняття обґрунтованих виробничих рішень.

Важливим компонентом проєкту є інтеграція сучасних цифрових технологій (CAD/CAM/CAE-систем, симуляторів механічних навантажень), що дозволяє забезпечити високу якість підготовки фахівців та їхню готовність до роботи у сучасних виробничих середовищах. Впровадження такого дидактичного підходу сприяє підвищенню ефективності навчального процесу, розвитку професійної компетентності та забезпечує безпечну та результативну роботу з адитивними технологіями.

Отже, реалізація запропонованого дидактичного проєкту є доцільною та актуальною, оскільки дозволяє підготувати інженерно-технічних фахівців, здатних ефективно використовувати п’ятиосьові системи FDM-друку, оптимізувати процеси виготовлення виробів і забезпечувати підвищені механічні характеристики продукції. Цей підхід формує професійну самостійність, аналітичне мислення та практичні навички, необхідні для конкурентоспроможної діяльності в сучасному високотехнологічному машинобудуванні.

# ВИСНОВКИ

В результаті проведеного аналізу в області об'ємного друку виявлено необхідність підвищення механічних характеристик полімерних виробів та збільшення стійкості до розшарування виробів із композиційних матеріалів, отриманих шляхом друку з армуванням безперервним волокном.

Запропоновано технологію адитивного виготовлення армованих виробів, що передбачає побудову армуючого каркасу та матриці по одному з шести способів залежно від конфігурації виробу та технічних вимог.

Розроблені та реалізовані у вигляді програмного забезпечення алгоритми автоматизованої підготовки керуючих програм для п'ятиосьового друку з армуванням відповідно до запропонованих способів побудови каркасів армуючих.

В результаті експериментальної перевірки встановлено, що запропонована технологія дозволяє досягти збільшення межі міцності при статичному згині від 1,5 до 2,5 разів і модуля зсуву від 2 до 4 разів для виробів, що виготовляються за технологією п'ятиосьового друку з армуванням безперервним волокном на 10- 20% об'єм та порівняно з відомими методами триосьового FDM друку з армуванням, а також збільшити міцність при міжшаровому зсуві та стійкість армованих виробів до розшарування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Головенкін В. П. Інженерна педагогіка [Електронний ресурс] : підруч. / В. П. Головенкін. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. Режим доступу: http://psy.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/02/Injenerna_pedagogika.pdf

2. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: дидактичне проектування: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УІПА, 2019. – 204 с.

3. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: основні технології навчання: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УІПА, 2019. – 174 с.

4. Лебедик Л.В., Стрельніков В.Ю., Стрельніков М.В. Сучасні технології навчання і методики викладання дисциплін: Навчально-методичний посібник для слухачів курсів підвищення кваліфікації педагогічних працівників закладів середньої, професійної (професійно-технічної), фахової передвищої та вищої освіти / Л. В. Лебедик, В. Ю. Стрельніков, М. В. Стрельніков. – Полтава : АСМІ, 2020. – 303 с.

5. Методика професійної освіти : навч. посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 015 «Професійна освіта» галузі знань 01 «Освіта / Педагогіка» / Д. О. Чернишев, К. І. Почка, Г. Л. Корчова, Ю. С. Красильник, М. В. Руденко. – Київ : Компринт, 2024. – 224 с.

6. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи для здобувачів освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 015 Професійна освіта (за спеціалізацією) / Укр. інж.-пед. акад.; упоряд.: О. Е. Коваленко, Н. О. Брюханова, Н.В. Божко, Н.В. Корольова – Харків: УІПА, 2024. – 82 с.

7. Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Машинобудування)» першого (бакалаврського) рівня. Затверджена вченою радою Української інженерно-педагогічної академії від 28.06.2024 року №13.

8. Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Машинобудування)» другого (магістерського) рівня. Затверджена вченою радою Української інженерно-педагогічної академії від 28.06.2024 року №13.

9. Семенова А.В. Професійна педагогіка: Підручник. / Авт. : О.В. Грабовський, Л.В. Коломієць, О.С. Савєльєва, А.В. Семенова, В.Ф. Яні; за заг. ред. А.В. Семенової. – Одеса: Бондаренко М.О., 2020. – 575 с.

10. Сайт дистанційної освіти Університету – Режим доступу: https:// moodle.karazin.ua

11. EdEra – студія онлайн-освіти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ed-era.com/

12. Український освітній онлайн-портал для вчителів «На Урок» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://naurok.com.ua/

13. «Освіторія Медіа» – онлайн медія про освіта та виховання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://osvitoria.media/

14. Освіта.UA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://osvita.ua

15. Всеосвіта – освітня платформа для професійного зростання педагогічних працівників та підвищення їх педагогічної майстерності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://vseosvita.ua/

16. Recent progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Compo-site / G. D. Goh, Y. L. Yap, S. Agarwala, W. Y. Yeong. // Advanced Materials Technologies. – 2018. – № 4 (1). – 58 с.

17. Dev Nath, S. An Overview of Additive Manufacturing of Polymers and Associated Composites / S. Dev Nath, S. Nilufar. // Polymers. – 2020. – № 12 (11). – 33 с.

18. Yasa, E. Additive Manufacturing of Polymer Matrix Composites / E. Yasa, K. Er-soy. // Aircraft Technology. – 2018. – № 7. – С. 147–169.

19. Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach / A. Alafaghani, A. Qattawi, B. Alrawi, A. Guzman // Procedia Manufacturing. – 2017. – № 10. – С. 791–803.

20. Hambali, R. H. Determination of the effect of part orientation to the strength value on additive manufacturing FDM for end-use parts by physical testing and valida-tion via three-dimensional finite element analysis / R. H. Hambali, P. Smith, A. Rennie. // International Journal of Materials Engineering Innovation. – 2012. – № 3 (3/4). – С. 269–281.

21. Mechanical Properties Optimization of Poly-Ether-Ether-Ketone via Fused Depo-sition Modeling / X. Deng, Z. Zeng, B. Peng. // Materials. – 2018. – № 11 (2). – 11 с.

22. Modeling and evaluation of curved layer fused deposition / S. Singamneni, A. Roy-choudhury, O. Diegel, B. Huang. // Journal of Materials Processing Technology. –2012. – № 212 (1). – С. 27–35.

23. McCaw, J. C. S. Curved-Layered Additive Manufacturing of non-planar, paramet-ric lattice structures / J. C. S. McCaw, E. Cuan-Urquizo. // Materials & Design. –2018. – № 160. – С.949–963.