

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**

Кафедра експлуатації машинно-тракторного парку

**Пояснювальна записка**

до дипломної роботи

освітнього ступеня «Магістр» на тему:

**Обґрунтування застосування матеріалів для 3D  
друку в конструкціях сільськогосподарської техніки**

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МГАІ-4-24  
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

\_\_\_\_\_ Кривьоншев Олексій Олександрович

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Макаренко Дмитро Олександрович

**Рецензент:** \_\_\_\_\_

ДНІПРО – 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра експлуатації машинно-тракторного парку

Освітній ступінь: «Магістр»

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

**ЕМТП**

(назва кафедри)

**ДОЦЕНТ**

(вчене звання)

**Деркач О.Д.**

(підпис)

(прізвище, ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**Кривьоншеву Олексію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи:** «Обґрунтування застосування матеріалів для 3D друку в конструкціях сільськогосподарської техніки»

керівник роботи Макаренко Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, доц.

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

затверджені наказом ДДАЕУ від

«24» жовтня 2025 року № 3182

**2. Строк подання студентом роботи 03.12.2025 року**

**3. Вихідні дані до роботи.** Стан застосування композитних матеріалів неметалевого походження в конструкціях сільськогосподарської техніки. Аналіз сучасних технологій виготовлення деталей з полімерних матеріалів. Огляд літературних джерел з обраної тематики.

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки** (перелік питань, які потрібно розробити). Проаналізувати конструкції сільськогосподарських машин та стан використання композитних матеріалів неметалевого походження в них. Навести програму, методики та обладнання для дослідження характеристик обраних матеріалів. Навести результати та виконати аналіз міцнісних та трибологічних досліджень обраних інженерних пластиків. Розглянути основні вимоги при роботі з FDM принтерами, навести вимоги при підготовці обладнання та під час його використання. Виконати економічну оцінку роботи.

## 5. Перелік демонстраційного матеріалу

Тема роботи, аналіз застосування композитів в конструкціях с.-г. машин, мета та задачі роботи (4 аркуші, А4). Обладнання для підготовки вихідних матеріалів, виготовлення експериментальних зразків та проведення досліджень (2 аркуші, А4). Результати виконаних досліджень (3 аркуші, А4). Техніко-економічні показники роботи (1 аркуш, А4). Висновки та рекомендації (1 аркуш, А4).

## 6. Консультанти розділів дипломної роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|---|----------------|------------------|
|        |   | завдання видав | завдання прийняв |
| 1-5    | Макаренко Д.О., доц. каф. ЕМТП            |                |                  |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |

7. Дата видачі завдання: 12.09.2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проекту                   | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1     | Оглядовий   | до 29.09.2025 року            | виконано |
| 2     | Обладнання та методики досліджень                 | до 07.10.2025 року            | виконано |
| 3     | Результати досліджень матеріалів                  | до 04.11.2025 року            | виконано |
| 4     | Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях | до 13.11.2025 року            | виконано |
| 5     | Економічна частина                                | до 20.11.2025 року            | виконано |
| 6     | Демонстраційний матеріал                          | до 03.12.2025 року            | виконано |

Студент

\_\_\_\_\_

( підпис )

Олексій КРИВЬОНШЕВ

(ім'я та прізвище)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

( підпис )

Дмитро МАКАРЕНКО

(ім'я та прізвище)



УДК 631

## АНОТАЦІЯ

Кривьоншев О.О. Обґрунтування застосування матеріалів для 3D друку в конструкціях сільськогосподарської техніки / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». – ДДАЕУ. Дніпро. 2025. 71 с.

В дипломній роботі проаналізовано конструкції сільськогосподарських машин та стан використання композитних матеріалів неметалевого походження в них. Наведено особливості підготовки обладнання та застосування програмного забезпечення для виготовлення експериментальних зразків з обраних полімерних матеріалів. Розглянуто методика та обладнання для дослідження характеристик обраних матеріалів. Встановлено, що найбільше значення границі текучості серед досліджуваних матеріалів має матеріал Nylon CCF – 62,73 МПа. Матеріали ABS/PC та CoPET мають значно меншу границю текучості 46,38 МПа та 56,17 МПа відповідно. Одержані результати свідчать, що найбільше значення границі текучості при стиску серед досліджуваних матеріалів має ABS/PC – 56,3 МПа, дещо нижче значення має CoPET – 52,07 МПа. Для матеріалу Nylon-CCF зафіксовано найменше значення границі текучості при стиску – 45,96 МПа. Наведено рекомендації щодо застосування досліджуваних матеріалів в конструкціях сільськогосподарської техніки. Розглянуто основні вимоги при роботі з FDM принтерами, наведені вимоги при підготовці обладнання та під час його використання. Виконано економічну оцінку роботи.

*Ключові слова:* сільськогосподарська техніка, FDM технологія, 3D друк, міцнісні характеристики, композити, полімерні матеріали.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| <b>ВСТУП</b> .....  | 8  |
| <br>  |    |
| <b>1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН<br/>ТА СТАН ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ<br/>НЕМЕТАЛЕВОГО ПОХОДЖЕННЯ В НИХ</b> .....  | 10 |
| 1.1 Огляд конструкцій типових сільськогосподарських машин.....  | 10 |
| 1.2 Технології та обладнання для виготовлення деталей з полімерних<br>матеріалів .....  | 25 |
| 1.3 Обґрунтування теми дипломної роботи .....   | 31 |
| <br>  |    |
| <b>2. ПРОГРАМА РОБІТ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ<br/>ДОСЛІДЖЕНЬ</b> .....   | 34 |
| 2.1 Програма виконання робіт та основні завдання наукових досліджень .....  | 34 |
| 2.2 Методика, програмне забезпечення та обладнання для проектування<br>моделей, підготовки (налаштування) файлу-завдання та виготовлення зразків<br>для досліджень на 3D принтері ..... | 37 |
| 2.3 Підготовка отриманих зразків та дослідження міцнісних характеристик<br>матеріалів при розтягу-стиску .....  | 42 |
| 2.4 Методика та устаткування для дослідження трибологічних властивостей<br>матеріалів .....   | 44 |
| <br>  |    |
| <b>3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ</b> .....   | 47 |
| 3.1 Оптимізація температури екструзії (виготовлення) зразків за технологією<br>FDM друку .....  | 47 |
| 3.2 Результати дослідження матеріалів на розтяг-стиск .....   | 49 |
| 3.3 Результати трибологічних досліджень .....   | 55 |
| 3.4 Рекомендації щодо використання досліджуваних матеріалів для<br>виготовлення деталей с.-г. техніки .....   | 59 |

|   |           |
|---|-----------|
|   | 7         |
| <b>4.ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ..</b> | <b>60</b> |
| <b>5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....</b>                            | <b>63</b> |
| <b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>                                | <b>66</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>                       | <b>69</b> |
| <b>ДОДАТКИ .....</b>  | <b>71</b> |

## ВСТУП

Сучасна тенденція закордонних та вітчизняних машинобудівних заводів – поступове впровадження елементів конструкцій з композитів. Застосування деталей з полімерних та ПКМ матеріалів забезпечує такі переваги: зниження маси машин на 20...40%, збільшення довговічності на 1,5...2 рази, економію пального до 10%, кращої стійкості до агресивних середовищ.

У перспективі очікується активніше впровадження вуглецевих і базальтових композитів українського виробництва, що сприятиме зниженню собівартості продукції та підвищенню рівня локалізації технологій. Застосування композитних матеріалів у сільськогосподарській техніці є важливим кроком до підвищення енергоефективності, зменшення витрат на технічне обслуговування та продовження терміну експлуатації машин. З урахуванням світових тенденцій можна припустити, що протягом найближчих 10–15 років композити поступово замінюватимуть традиційні метали у більшості допоміжних, а згодом і частині несучих елементів конструкцій.

Технології переробки полімерних композитних матеріалів (ПКМ) у готові вироби суттєво відрізняються за складністю та собівартістю, тому кожен метод має оптимальну сферу застосування залежно від типу матеріалу та обсягів виробництва. Вибір конкретної технології визначається видом полімеру, розмірами деталі, вимогами до міцності, точності та економічною доцільністю.

3D-друк полімерів відкриває нові можливості для виготовлення складних виробів без потреби у додатковій оснастці, забезпечуючи високу точність, повторюваність і рентабельність при невеликих серіях. Водночас у науковій літературі поки не зафіксовано випадків використання матеріалів для 3D-друку як конструкційних у сільськогосподарському машинобудуванні.

Саме тому, метою дипломної роботи є обґрунтування доцільності виготовлення деталей для трибоспряжень сільськогосподарської техніки за технологією 3D-друку.

Досягнути названу мету можна шляхом вирішення таких завдань:

1. Проаналізувати конструкції сільськогосподарських машин та стан використання композитних матеріалів неметалевого походження в них.

2. Навести обладнання, методики та програму досліджень.

3. Виконати аналіз результатів випробувань обраних матеріалів щодо міцнісних характеристик при дослідженні на розтяг-стик та терті в середовищі без мащення. Навести рекомендації щодо застосування досліджуваних матеріалів в конструкціях сільськогосподарської техніки.

4. Навести основні вимоги при роботі з FDM принтерами, розглянути вимоги при підготовці обладнання та під час його використання.

5. Виконати економічну оцінку використання рекомендованих матеріалів.

Об'єкт дослідження. Процеси деформації та руйнування полімерних матеріалів різної складу основного матеріалу (матриці).

Предмет дослідження. Зміна фізико-механічних характеристик матеріалів в залежності від їх природи.

# **1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН ТА СТАН ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НЕМЕТАЛЕВОГО ПОХОДЖЕННЯ В НИХ**

## **1.1 Огляд конструкцій типових сільськогосподарських машин**

Вирощування сільськогосподарських культур містить комплекс технологічних операцій, якість виконання яких залежить від багатьох факторів.

Вирощування сільськогосподарських культур є надзвичайно складним і водночас невизначеним процесом, оскільки на нього впливає велика кількість взаємопов'язаних природних, біологічних, економічних і технічних чинників. Складність цього процесу полягає насамперед у тому, що він відбувається у відкритій природній системі, де людина не має повного контролю над усіма умовами. Ріст і розвиток рослин залежать від кліматичних факторів – температури, кількості опадів, вологості повітря, тривалості світлового дня, сили вітру тощо. Зміни клімату, які останніми роками стають усе помітнішими, призводять до нестабільності погодних умов: посухи, зливи, заморозків, аномально високих температур. Це створює невизначеність у плануванні термінів посіву, догляду за культурами та збору врожаю.

Не менш важливим джерелом складності є біологічні чинники. Кожна культура має власні потреби щодо умов вирощування, складу ґрунту, вологості, живлення та освітлення. Крім того, існує постійний ризик ураження посівів шкідниками, хворобами чи бур'янами, які можуть знищити значну частину врожаю, навіть за належного догляду. Біологічні процеси в агроєкосистемі не завжди передбачувані, оскільки вони залежать від взаємодії живих організмів і навколишнього середовища, що може швидко змінюватися.

Економічна складова також додає невизначеності. Коливання цін на насіння, добрива, паливо, техніку чи засоби захисту рослин безпосередньо впливають на собівартість і рентабельність виробництва. Крім того, світові

ринки сільськогосподарської продукції залежать від попиту, логістичних можливостей та політичної ситуації, що створює додаткові ризики для фермерів.

Не можна оминати увагою і людський фактор. Рівень підготовки агрономів, своєчасність виконання технологічних операцій, ефективність управлінських рішень – усе це визначає успіх або невдачу виробництва. Навіть при використанні сучасних технологій точного землеробства повністю уникнути невизначеності неможливо, оскільки природні процеси залишаються складними для точного прогнозування.

Отже, складність і невизначеність у вирощуванні сільськогосподарських культур зумовлені багатофакторністю цього процесу, залежністю від некерованих природних умов, біологічною мінливістю, економічними ризиками та людським чинником. Усе це робить аграрне виробництво однією з найменш передбачуваних, але водночас найважливіших сфер господарської діяльності.

При цьому, слід зауважити, що у випадку сприятливих природньо-кліматичних умов, важливим залишається якість та своєчасність виконання технологічних операцій. Ці фактори безпосередньо залежать від технічного рівня техніки та кваліфікації обслуговуючого персоналу. Саме якісна підготовка МТА дозволяє одержати необхідний результат щодо якісних показників виконання технологічної операції.

Серед значного різноманіття технологічних операцій при вирощуванні майже будь якої культури найважливішими залишаються комплекси операцій із підготовки ґрунту (крім технології No-till), сівба, догляд та збирання.

Розглянемо типові конструкції сільськогосподарських машин, які використовуються при виконанні вказаних технологічних операцій.

Дискатором називають ґрунтообробний агрегат, призначений для обробки ґрунту шляхом різання, подрібнення, перемішування рослинних решток з ґрунтом, а також вирівнювання поверхні перед посівом (рис. 1.1).



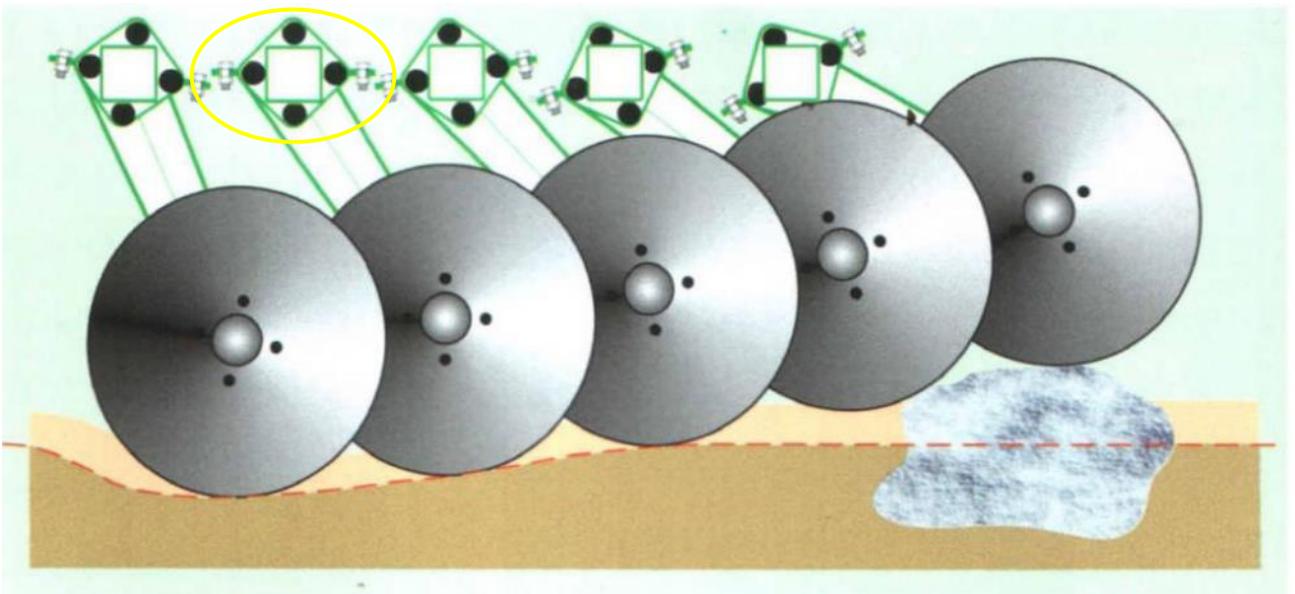
Рис. 1.1 – Типовий агрегат для дискування

Ці машини складаються з рами на якій всі робочі органи, опорні колеса або котки. Вона може бути жорсткою або складною (секційною) для зручності транспортування при великих ширинах захвату. Основними робочими органами таких машин є диски, які встановлюються на стійках, часто кожен диск на індивідуальній стійці, щоб краще копіювати рельєф ґрунту і уникати забивання. Діаметр дисків різний, часто 500-620 мм чи інше (в залежності від моделі). Форма дисків може бути гладкою, зубчастою, хвилястою чи з вирізами для кращого подрібнення і змішування.

Сійки або кріплення дисків можуть бути пружинними чи жорсткими; пружинні чи зі спеціальними демпферами, щоб зменшити ударний вплив при проходженні через коріння, каміння (рис. 1.2) [1].



а



б

Рисунок 1.2 – Загальний вигляд дискового агрегату Hatzenbichler “Disko”:

(а) та схема стійок із демпферними елементами (б)

(джерело [1])

Інші виробники ґрунтообробної техніки виготовляють схожі типові конструкції дискових знарядь (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Луцильний дисковий ЛДД-2500  
(джерело [2])

Як видно із наведених ілюстрацій, в конструкціях дискових агрегатів майже не застосовуються композитні матеріали неметалевого походження, окрім використання демпферних елементів стійок.

Однією із найстарішою та розповсюдженими ґрунтообробними машинами є плуги. Серед сучасних ґрунтообробних машин набирають популярність плуги із відвалами з композитних матеріалів. Тому, виконаємо огляд таких машин та матеріалів з яких виготовляють відвали плугів.

Відвали з композитних матеріалів застосовуються, як на плугах вітчизняного виробництва так і на плугах закордонних виробників ґрунтообробної техніки.

Відвал плуга виготовлений із композитного матеріалу, який відзначається високою міцністю та зносостійкістю. Завдяки цьому він зберігає свою форму й функціональність навіть за тривалої експлуатації в складних умовах. Використання композиту дало змогу суттєво зменшити вагу відвалу порівняно зі сталевими аналогами, що підвищує його маневровість, полегшує роботу з плугом і зменшує навантаження на трактор. Спеціально розроблена форма забезпечує ефективне очищення та перевертання ґрунту під час оранки, сприяючи його кращому аеруванню й зволоженню, а також знижуючи опір, що дозволяє економити тягове зусилля техніки. Крім того, композитний матеріал має анти адгезійні властивості, завдяки яким значно зменшується налипання ґрунту на поверхню відвалу. Це підвищує комфорт роботи, скорочує кількість зупинок для очищення й забезпечує стабільну продуктивність під час польових робіт.

Наприклад вітчизняний виробник ВО «ФОП Дудко» пропонує плуг ПЛН-3-35 із заводу обладнаний відвалами з композитного матеріалу (рис. 1.4) [3].



Рисунок 1.4 – Плуг ПЛН-3-35 з композитними відвалами виробництва ВО «ФОП Дудко» (джерело [3])

На рис. 1.5 наведено відвал корпусу плуга Велес-Агро, розроблений із композитного матеріалу «Текрон» [4].



Рисунок 1.5 – Відвал із композитного матеріалу на корпусі плуга виробництва Велес-Агро (джерело [4]).

Закордонні виробники також пропонують плуги з відвалами з композитних матеріалів, наприклад виробник ґрунтообробної техніки Lemken. Ці відвали можуть бути, як суцільні (рис. 1.6), так і смугові (рис. 1.7).



Рисунок 1.6 – Суцільний відвал із композитного матеріалу для плуга Lemken (джерело [5])



Рисунок 1.7 – Елемент смугового відвалу виготовлений з композитних матеріалів для плуга Lemken  
(джерело [5])

На кафедрі ЕМТП ДДАЕУ також виготовлено полімерного матеріалу та випробувано декілька відвалів плуга ПЛН-3-35 (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Плуг із відвалами з полімерних матеріалів під час випробувань  
(джерело [6])

Полевими випробуваннями [6] підтверджено їх вищу ефективність, у порівнянні із сталевими. Зокрема зафіксовано зменшення витрати палива на гектар та зниження налипання ґрунту на поверхню відвалу.

Таким чином можна зробити висновок, що застосування композитних матеріалів в конструкції плугів на сьогоднішній день є перспективним напрямком в сільськогосподарському машинобудуванні.

Розглянемо застосування композитних матеріалів в конструкції культиваторів. В стандартних конструкціях культиваторів композитні матеріали неметалевого походження не застосовуються. Проте, в наукових роботах вчених [7] доведено ефективність впровадження полімерно-композитних матеріалів (ПКМ) для виготовлення елементів системи копіювання просапних культиваторів (рис. 1.9).

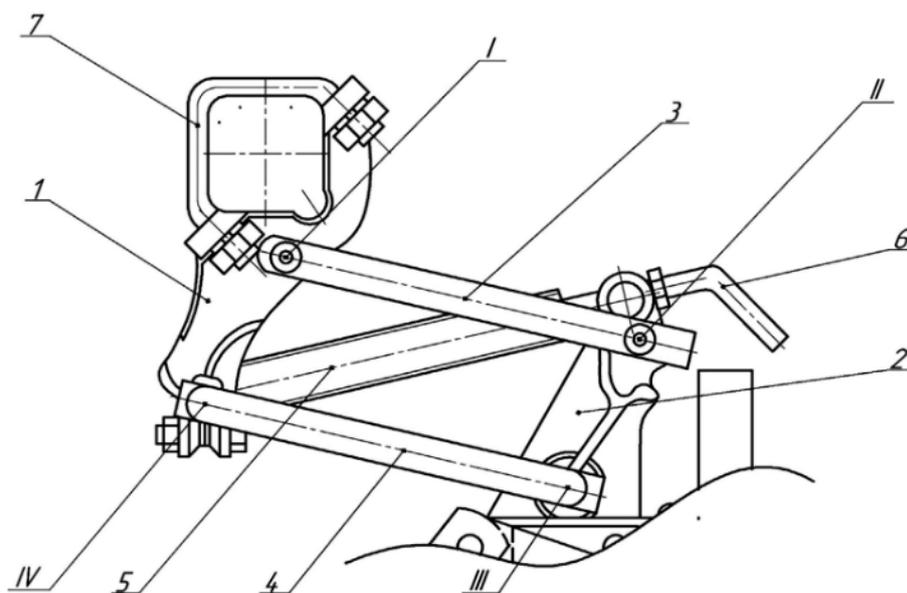


Рисунок 1.9 – Механізм копіювання культиватора

1 – передній кронштейн, 2 – задній кронштейн, 3 – верхня тяга, 4 – нижня тяга, 5 – пружина, 6 – гвинт регулювальний, 7 – фіксатор, I, II, III, IV – місця зносу елементів механізму копіювання

(джерело [7])

Паралелограмний механізм культиваторів являє собою багато шарнірну систему кріплення чотириланкового механізму, елементи якого утворюють паралелограм. Така конструкція забезпечує точне копіювання рельєфу поля й сталий кут нахилу робочого органу відносно поверхні ґрунту. Під час експлуатації культиваторів типу КПС-4,0, КРН-5,6 та інших виявлено низку несправностей, зокрема інтенсивний і передчасний знос осей ланок механізму. Це призводить до порушення технологічного процесу обробітку ґрунту та невідповідності агротехнічним вимогам.

В результаті вказаних порушень процесу обробітку ґрунту спостерігається збільшення нерівномірності ходу робочих органів як в горизонтальному, так і в вертикальному напрямку. В наслідок чого, якість проведеної культивації стає незадовільною.

Впровадження системи технічного обслуговування (ТО) для вказаних конструкцій машин, не змінила кардинальну ситуація, так як створює додаткове навантаження на агрегати, що, у свою чергу, викликає затримки у дотриманні агротехнічних строків проведення агротехнічних операцій.

В роботі [7] запропоновано застосовувати в якості елементів тертя застосовувати деталі із самозмащувальних ПКМ. Проведені дослідження конструкційних матеріалів неметалевого походження підтвердили можливість використання матеріалів з певними фізико-механічними характеристиками та трибологічними властивостями для вказаної конструкції культиваторів.

Посівні машини також мають значну кількість деталей, щ виготовляються з композитних матеріалів – неметалів. Зазвичай це катушки висівних апаратів, насіннепроводи, бункери та ємності для насіння та добрив та ін. (рис. 1.10).



а



б



в

Рисунок 1.10 – Деякі деталі (елементи) конструкції посівних машин, які виготовляються з композитних матеріалів – неметалів: а – катушки дозуючих (висівних) апаратів; б – бункери для насіння; в – розподільні грибки для насіння та добрив

Одними із відповідальними та важливими робочими органами сільськогосподарських машин, що виготовляються з ПКМ є розпилювачі штангових обприскувачів (рис. 1.11).



а



б

Рисунок 1.11 – Форсунка штангова Viardzki: а – загальний вигляд; б – складові елементи потрібної форсунки (джерело [8])

Форсунки та їх розпилювачі у різних виробників дещо відрізняються своєю формою та кількістю розпилювачів, але основні елементи однотипні та містять значну кількість деталей з неметалів (рис. 1.12) [9].

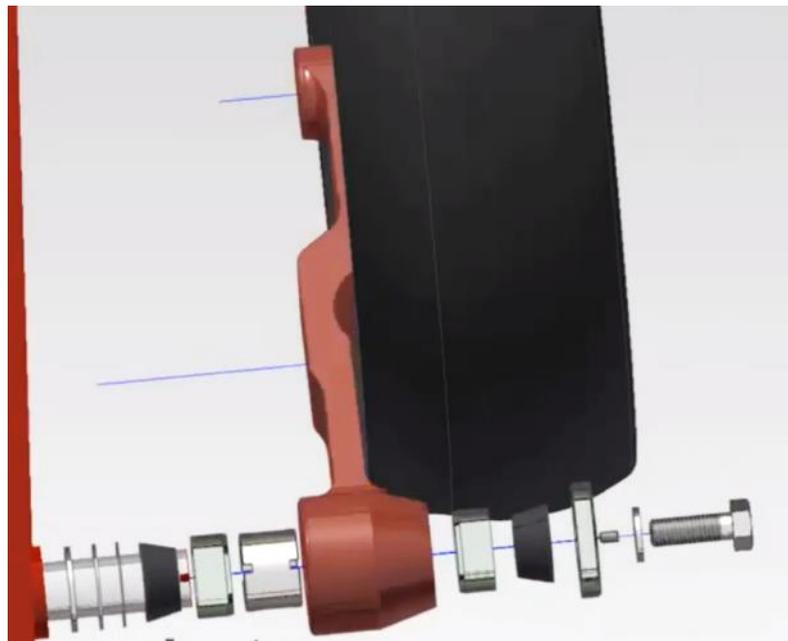


Рисунок 1.12 – Форсунка прохідна (шлангова) з відсікаючим пристроєм 100-08/P (джерело [9])

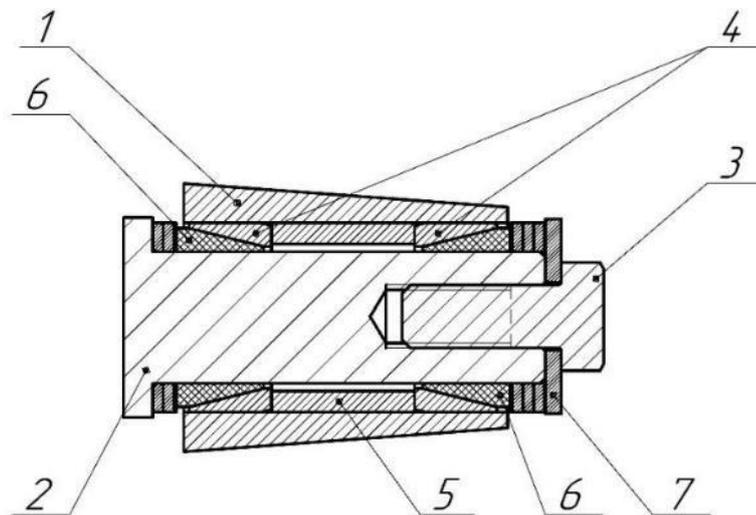
Виготовлення таких форсунок – зазвичай великосерійні партії з десятками тисяч одиниць. Перевагою є незначна собівартість, саме за рахунок значної кількості випущених одиниць. Недоліком же є необхідність розробки та виготовлення устаткування (прес-форм) для одержання кожної окремої деталі такої форсунки.

Крім корпусних деталей з ПКМ відомі дослідження таких матеріалів та впровадження їх в конструкцію посівних машин та культиваторів, в якості елементів рухомих з'єднань, в механізми копіювання поверхні ґрунту [6, 10-11]. В роботі [11] виконані всебічні дослідження характеристик ПКМ для обертових деталей зернозбиральних комбайнів.

Зокрема, в роботах [10, 11] наведено результати розробки ПКМ і адаптації їх властивостей та характеристик та модернізації конструкцій посівних машин. На рис. 1.13 наведено деталі з композитних матеріалів виготовлені для механізмів копіювання посівних машин.



а



б

Рисунок 1.13 – Компоненти модернізованого трибоспряження опорного колеса сівалки Maschio Gaspardo (а) та його схема (б)

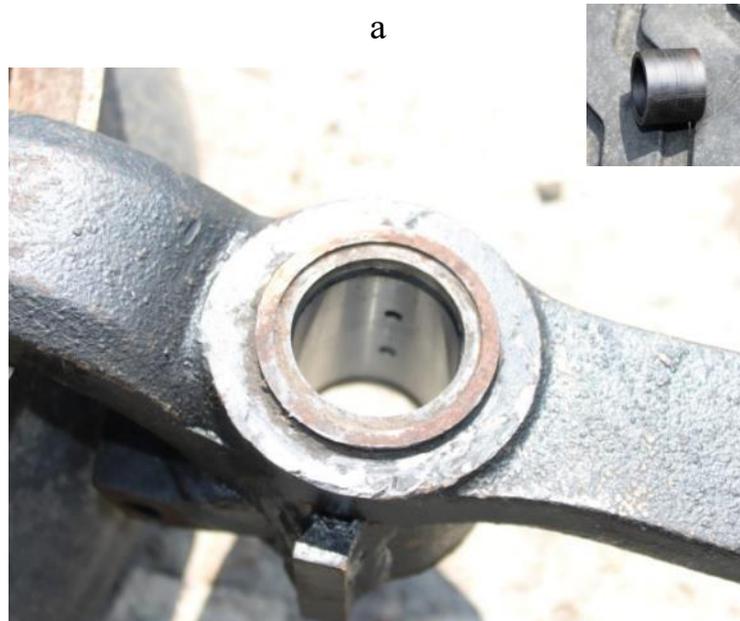
(джерело [10])

Запропоноване рішення дозволило вирішити ряд задач: мінімізувати витрати часу на ТО, підвищити довговічність трибоспряжень механізмів копіювання та якість сівки в цілому. В якості матеріалу для виготовлення деталей використано поліамід наповнений вуглецевим волокном (ВВ).

В роботі [11] наведені результати щодо адаптації складу ПКМ для застосування в конструкціях посівних машин з врахуванням їх режимів експлуатації (рис. 1.14).



а



б

Рисунок 1.14 – Елементи трибоспряжень посівного комплексу Агро-Союз

Turbosem виготовлені з ПКМ

(джерело [11])

Запропоновані елементи тертя з ПКМ вирішили основні проблеми при експлуатації даного посівного комплексу, а саме інтенсивний знос трибоспряжень без необхідності проведення їх мащення при виконання польових робіт.

Проте, технологія виготовлення деталей з обраних матеріалів, а саме лиття під тиском, потребує проектування та виготовлення прес-форм, майже на кожний типорозмір деталі. Наприклад для виготовлення комплекту деталей для вказаної сівалки необхідно чотири різних прес-форми. Ціна кожної прес-форми, в залежності від складності виготовлення та розмірів готової деталі, може становити від 4000 грн до 8000 грн. При незначній кількості машин, які будуть проходити модернізацію, затрати тільки на прес-форми можуть становити 15...30 тис. грн і більше. Тому, дана технологія виготовлення актуальна для мілкового серійного виробництва деталей, хоча б від 5000 шт.

Одержані результати мають декілька позитивних аспектів: суттєве підвищення якості роботи машин, які модернізовані із застосуванням ПКМ та мінімізація витрат часу на їх ТО. Проте, ці елементи тертя потребують використання досить дорогих ПКМ на основі поліаміду та вуглецевого волокна, що суттєво впливає на собівартість.

Технологічний процес одержання вказаних елементів тертя у наведених роботах – лиття під тиском, який потребує значних капіталовкладень на обладнання та оснастку для створення таких деталей. Виконаємо огляд технологій та матеріалів, що мають меншу собівартість та здатні працювати, як елементи трибоспряжень в конструкції сільськогосподарської техніки.

## **1.2 Технології та обладнання для виготовлення деталей з полімерних матеріалів**

Використання композитних матеріалів у сільськогосподарській техніці – це важливий крок до підвищення енергоефективності, зниження витрат на обслуговування та подовження строку служби машин. З огляду на світові тенденції, можна прогнозувати, що протягом найближчих 10...15 років композити поступово витіснятимуть традиційні метали у більшості другорядних і навіть частині несучих елементів.

Використання композитних матеріалів у сільськогосподарській техніці має чітку структурну логіку. Найбільше композити застосовують у тих вузлах, де потрібна мала маса, висока корозійна стійкість, міцність при ударних і вібраційних навантаженнях, а також захист від впливу агресивних середовищ (волога, добрива, паливно-мастильні матеріали, хімікати).

Композити – це багатокомпонентні матеріали, які поєднують властивості двох або більше складових: матриці (або ж основи) та армувального наповнювача. Найчастіше в агротехніці застосовуються такі композити:

- Склопластики (в такого матеріалу матрицею є полімер, а наповнювач – скловолокно);
- Вуглепластики (в якості матриці також виступає полімер, в той час як наповнювач – ВВ);
- Арамідні композити (композити на основі полімерів в якості матриці та наповнювачів – волокон типу Kevlar);
- Гібридні матеріали – це матеріали, що містять комбінації різних основ та наповнювачів.

Переробка конструкційних пластиків у готові вироби здійснюється за допомогою різних технологій, кожна з яких має свої особливості, переваги та недоліки. Найпоширенішими є лиття під тиском, екструзія, пресування, вакуумне формування, ротаційне формування та термоформування. Останнім часом значного розповсюдження набирають технології 3D друку.

Лиття під тиском – це найточніша та найпоширеніша технологія для виготовлення деталей із термопластів. Пластикові гранули розплавляють у циліндрі термопластавтомата (рис. 1.15) й під великим тиском впорскують у металеву форму, де матеріал охолоджується і твердне, набуваючи точної форми. Основними перевагами цього методу є висока точність, можливість отримання складних форм, гладка поверхня та повна автоматизація процесу, що забезпечує високу продуктивність.



Рисунок 1.15 – Термопластавтомат Krauss Maffei

Проте, недоліками даної технології є висока вартість виготовлення прес-форм і обмеження у виробництві дуже великих деталей, оскільки для цього потрібне потужне обладнання та великий тиск.

Екструзія використовується для отримання виробів постійного поперечного перерізу, таких як труби, профілі, листи чи плівки (рис. 1.16). Розплавлений полімер продавлюється через спеціальну фільтру, а потім охолоджується.



Рисунок 1.16 – Екструдер для полімерних матеріалів Lima Extrusion

Головними перевагами екструзії є безперервність процесу, висока продуктивність, рівномірна структура матеріалу та порівняно низька вартість обладнання. Однак технологія не дозволяє виготовляти складні просторові форми, а також потребує стабільних параметрів нагрівання й охолодження, інакше можуть виникати деформації або нерівномірність товщини виробу.

Пресування (компресійне формування) застосовується переважно для термореактивних пластмас, які при нагріванні полімеризуються і стають твердими назавжди. Матеріал у вигляді порошку або гранул засипається в нагріту форму і стискається під великим тиском. Така технологія забезпечує високу міцність і стабільність розмірів деталей, дозволяє виготовляти вироби з армованих матеріалів. Серед недоліків – тривалий цикл формування, високе енергоспоживання та складність повної автоматизації. Як результат собівартість одержання деталей за такою технологією значно перевищує собівартість при застосуванні лиття під тиском.

Вакуумне формування передбачає нагрівання термопластичної плівки або листа до стану еластичності, після чого матеріал притискається до форми вакуумом. Цей метод простий, недорогий і добре підходить для виготовлення середніх та великих виробів, а також коротких серій. Проте точність і міцність отриманих виробів нижчі, ніж при литті під тиском, а товщина стінок може бути нерівномірною. Для роботи потрібно високоточне обладнання та постійний контроль режимів роботи формувальної машини.

Ротаційне формування дає змогу виготовляти великі порожнисті вироби, наприклад баки чи контейнери. Порошкоподібний полімер засипається у форму, яка одночасно нагрівається й обертається навколо двох осей. Полімер рівномірно покриває стінки, а після охолодження утворює готовий виріб. Основними перевагами цього методу є рівномірна товщина стінок, відсутність швів, простота обладнання та низький тиск у процесі формування. Недоліками є тривалість циклу (іноді до години), нижча точність і обмеженість у виборі матеріалів.

Термоформування близьке до вакуумного формування, але передбачає не лише вакуум, а й тиск повітря для притискання розігрітого листа до форми. Ця технологія економічна, проста у виконанні та дозволяє швидко виготовляти великі вироби з невеликою кількістю деталей, наприклад панелі, піддони чи корпуси техніки. Проте термоформування не підходить для товстостінних або складних деталей, оскільки матеріал при витягуванні може стоншуватися й втрачати форму.

Виробництво деталей із полімерних матеріалів за допомогою технології 3D-друку не потребує використання прес-форм для формування геометрії виробу. Завдяки цьому метод є особливо вигідним для дрібносерійного або індивідуального виробництва, адже усуває необхідність витратити ресурси на проектування та виготовлення дорогої оснастки.

Існує багато методів адитивного (пошарового) формування, проте найпоширенішими, як у настільних, так і в промислових 3D-принтерах є такі технології:

- Моделювання методом наплавлення (FDM – Fused Deposition Modeling)
- Лазерна стереолітографія (SLA – Stereolithography)
- Селективне лазерне спікання (SLS – Selective Laser Sintering)

Попри спільну ідею – створення об'єкта шляхом поступового нанесення матеріалу шар за шаром, ці методи відрізняються видом використовуваної сировини та способом її подачі.

FDM-друк (моделювання методом наплавлення) є найпоширенішим через простоту та доступність. У цій технології розплавлений полімер у вигляді нитки подається через нагріту екструзійну головку та шар за шаром наноситься на платформу (рис. 1.17). Матеріалом служить термопластик різної товщини, а також гнучкі, армовані чи металізовані полімери. Для створення складних або нависаючих елементів застосовуються допоміжні підтримки. Основними перевагами FDM є низька вартість, універсальність та можливість використання

великої кількості матеріалів, а основним недоліком – порівняно невисока точність та помітна шаруватість поверхні.

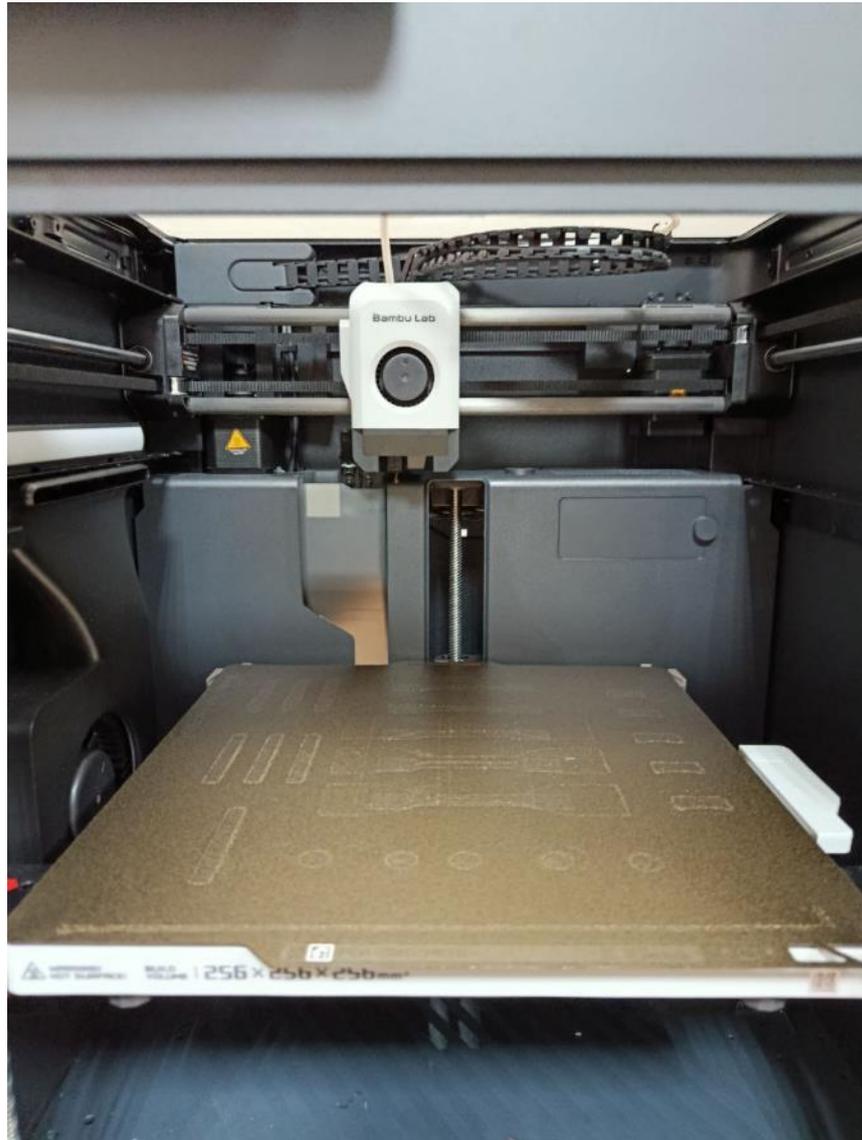


Рисунок 1.17 – Робоча зона 3D принтера Bambu Lab P1S

SLA-друк (лазерна стереолітографія) посідає друге місце за популярністю та вирізняється надзвичайно високою точністю і деталізацією. У цьому методі ємність заповнюється рідким фотополімером, який шар за шаром твердне під дією лазерного променя, що рухається за заданими контурами моделі. Завдяки високій роздільній здатності SLA активно застосовується в ювелірній справі, стоматології та для виготовлення макетів із дрібними деталями. Існує й різновид цієї технології – DLP-друк, де замість лазера використовується цифровий

проектор, що забезпечує швидше затвердіння полімеру та скорочує час побудови об'єкта.

SLS-друк (селективне лазерне спікання) – це професійна технологія, яка використовується в промисловому виробництві для створення повнофункціональних пластикових і металевих деталей. Формування відбувається з порошкових матеріалів, які під дією лазера локально розплавляються та спікаються між собою. Після завершення шару наноситься новий шар порошку, і процес повторюється до створення повного виробу. Головною перевагою SLS є відсутність потреби в опорних структурах, що дозволяє зменшити витрати матеріалу й виготовляти об'єкти складної форми. Недоліком є висока вартість обладнання та матеріалів, проте натомість досягається виняткова міцність і точність.

Отже, 3D-друк полімерів відкриває можливості для створення виробів надзвичайної складності без додаткової оснастки, забезпечуючи високу точність, повторюваність і економічну ефективність при малих обсягах виробництва.

Таким чином, кожна технологія має своє оптимальне застосування: лиття під тиском – для точних технічних деталей, екструзія – для профілів і труб, пресування – для міцних термореактивних виробів, вакуумне та термоформування для великих і простих панелей, ротаційне формування – для порожнистих конструкцій, а 3D друк для партій незначної кількості або індивідуальних виробів з полімерних матеріалів. Вибір технології залежить від типу полімеру, розмірів деталі, вимог до міцності, точності та економічної доцільності.

### **1.3 Обґрунтування теми дипломної роботи**

Виконаний огляд конструкцій сільськогосподарських машин для обробітку ґрунту, сівби та обприскування. Встановлено, що закордонні та

вітчизняні машинобудівні заводи поступово впроваджують елементи з композитів, насамперед у:

- обшивках кабін, захисних елементах, бакових системах;
- покриттях робочих органів;
- дослідних моделях легких агрегатів;
- елементах трибоспрямижень та деталі, що працюють в абразивному середовищі.

Застосування деталей з полімерних та ПКМ матеріалів забезпечує такі переваги:

- зниження маси машин на 20–40%,
- збільшення довговічності на 1,5–2 рази,
- економії пального до 10%,
- кращої стійкості до агресивних середовищ.

У майбутньому очікується розширення використання вуглецевих і базальтових композитів, що виробляються в Україні, для зниження собівартості та підвищення локалізації технологій.

Використання композитних матеріалів у сільськогосподарській техніці це важливий крок до підвищення енергоефективності, зниження витрат на обслуговування та подовження строку служби машин. З огляду на світові тенденції, можна прогнозувати, що протягом найближчих 10...15 років композити поступово витіснятимуть традиційні метали у більшості другорядних і навіть частині несучих елементів. При цьому, технології переробки вихідних ПКМ у готові вироби відрізняються, як по складності, так і собівартості деталей.

Таким чином, кожна технологія переробки має своє оптимальне застосування в залежності від типу матеріалу, що переробляється та кількості необхідних деталей. Вибір технології залежить від типу полімеру, розмірів деталі, вимог до міцності, точності та економічної доцільності. 3D-друк полімерів відкриває можливості для створення виробів надзвичайної складності без додаткової оснастки, забезпечуючи високу точність, повторюваність і економічну ефективність при малих обсягах виробництва. Проте в літературі

невідоме застосування матеріалів для 3D-друку в якості конструкційних матеріалів в сільськогосподарському машинобудуванні.

Саме тому, метою дипломної роботи є обґрунтування доцільності виготовлення деталей для трибоспряжень сільськогосподарської техніки за технологією 3D-друку.

Досягнути названу мету можна шляхом вирішення таких завдань:

1. Проаналізувати конструкції сільськогосподарських машин та стан використання композитних матеріалів неметалевого походження в них.
2. Навести обладнання, методики та програму досліджень.
3. Виконати аналіз результатів випробувань обраних матеріалів щодо міцнісних характеристик при дослідженні на розтяг-стик та терті в середовищі без мащення. Навести рекомендації щодо застосування досліджуваних матеріалів в конструкціях сільськогосподарської техніки.
4. Навести основні вимоги при роботі з FDM принтерами, розглянути вимоги при підготовці обладнання та під час його використання.
5. Виконати економічну оцінку використання рекомендованих матеріалів.

## 2. ПРОГРАМА РОБІТ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Програма виконання робіт та основні завдання наукових досліджень

Виготовлення деталей методом 3D-друку має низку істотних переваг, що зумовлюють його активне впровадження у сучасному машинобудуванні, медицині, авіаційній, автомобільній та інших галузях промисловості. Основна перевага цієї технології, у порівнянні із традиційними технологіями виготовлення деталей з ПКМ, полягає у принципово іншому підході до процесу виробництва – адитивному, тобто побудові об'єкта шляхом послідовного нашарування матеріалу. Це дозволяє формувати вироби будь-якої складності без потреби у використанні традиційного інструменту, оснащення чи прес-форм.

Однією з найважливіших переваг є гнучкість у проектуванні та виготовленні деталей. 3D-друк дає змогу реалізовувати складні геометричні форми, внутрішні порожнини, решітчасті структури та інтегровані вузли, які практично неможливо отримати традиційними методами лиття або фрезерування. Це відкриває широкі можливості для оптимізації конструкцій, зменшення маси деталей без втрати їх міцності та підвищення ефективності виробів. Завдяки цьому можна досягти кращих експлуатаційних характеристик – зниження навантаження на вузли, підвищення зносостійкості та довговічності.

Ще однією вагомою перевагою є економічність у використанні матеріалів. Оскільки матеріал наноситься лише у тих місцях, де він дійсно потрібен, рівень відходів зводиться до мінімуму. Це суттєво зменшує витрати, особливо при роботі з дорогими металами або полімерними композитами. На відміну від традиційних субтрактивних методів (де значна частина матеріалу видаляється), 3D-друк забезпечує раціональне використання сировини та сприяє екологічній стійкості виробництва.

Не менш важливим є скорочення виробничого циклу. За допомогою 3D-друку можна швидко виготовляти дослідні зразки, прототипи та кінцеві вироби без додаткового налаштування обладнання чи виготовлення оснастки. Це значно прискорює процес розробки нових продуктів, зменшує час виходу продукції на ринок та дозволяє оперативно вносити конструктивні зміни.

Крім того, знижується собівартість одиничного виробу у випадках дрібносерійного або індивідуального виробництва. Відсутність потреби у виготовленні форм, штампів або інструментів робить 3D-друк надзвичайно ефективним для малих партій, дослідних моделей або персоналізованих виробів. Саме тому ця технологія активно застосовується у виготовленні медичних імплантатів, ортопедичних протезів, ювелірних виробів, а також у сфері ремонтного виробництва.

Варто також відзначити екологічні переваги адитивного виробництва. Скорочення відходів, менше споживання енергії, можливість локального виробництва без транспортування компонентів сприяють зниженню вуглецевого сліду. Завдяки цифровій природі процесу 3D-друк підтримує концепцію «розумного» виробництва, коли виготовлення деталей може бути здійснене безпосередньо у місці споживання – за цифровою моделлю, переданою через мережу.

Таким чином, виготовлення деталей методом 3D-друку є перспективним напрямом сучасного виробництва, який поєднує в собі технічну гнучкість, економічну ефективність, екологічність та інноваційність. Ця технологія відкриває нові можливості для проектування, скорочує виробничі витрати та дозволяє створювати продукцію нового покоління з високим рівнем індивідуалізації та якості.

На сьогодні виробники пропонують широкий асортимент матеріалів, придатних для 3D-друку. Завдяки доступності сучасних технологій виготовлення готових виробів і відносно невисокій собівартості процесу, деталі, отримані методом адитивного виробництва, поступово займають своє місце у сфері несерійного виготовлення компонентів машин і обладнання. Крім того,

застосування 3D-друку суттєво скорочує загальний виробничий цикл – від моменту постановки завдання до отримання готової деталі.

Вибір і використання певних ПКМ у конструкціях сільськогосподарської техніки має ґрунтуватися на результатах наукових досліджень, які наразі недостатньо висвітлені у фаховій літературі. Особливо це стосується визначення доцільності використання матеріалів для 3D-друку як конструкційних елементів у трибоспряженнях, де вони зазнають тертя та навантаження під час роботи.

Програма досліджень характеристик матеріалів складається з таких етапів:

- проектування зразків для досліджень та підготовка (налаштування) файлу-завдання для 3D принтера;
- виготовлення зразків за технологією 3D друку;
- підготовка отриманих зразків та дослідження міцнісних характеристик матеріалів при розтягу-стиску;
- дослідження трибологічних властивостей;
- аналіз одержаних результатів досліджень та надання рекомендацій щодо застосування досліджуваних матеріалів в конструкції с.-г. машин.

Серед завдань досліджень є визначення можливості використання інженерних пластиків призначених для технології 3D друку, конструктивних в конструкціях сільськогосподарської техніки. Крім того, серед завдань роботи є обґрунтування оптимальної температури переробки обраних в дослідженнях матеріалів.

В якості матеріалів для досліджень обрано три матеріали вітчизняного виробника Monofilament: Nylon CCF, ABS/PC, coPET. Перші два матеріали виробник відносить до інженерних пластиків. Nylon CCF складається з матриці Nylon 6 та наповнювача – ультракоротких ВВ 10 мас. %.

## 2.2 Методика, програмне забезпечення та обладнання для проектування моделей, підготовки (налаштування) файлу-завдання та виготовлення зразків для досліджень на 3D принтері

Зразки для дослідження матеріалів на розтяг (рис. 2.1) виконували відповідно до вимог [12].

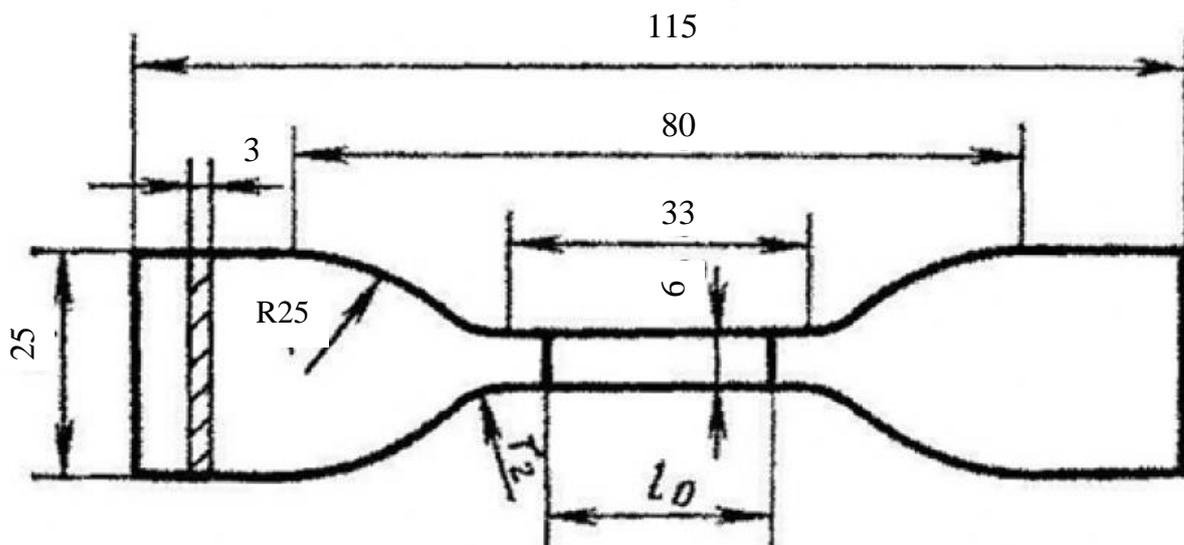


Рисунок 2.1 – Схема зразку для дослідження матеріалів на розтяг

Загальний вигляд ескізу та готового зразку створеному в програмному забезпеченні SOLIDWORKS наведено на рис. 2.2

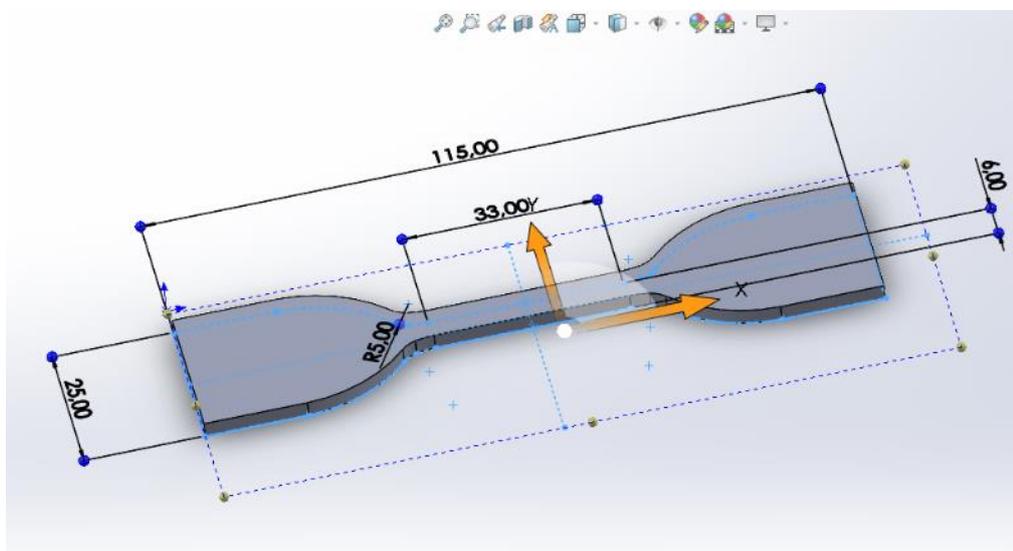


Рисунок 2.2 – 3D модель зразку для досліджень на розтяг

Зразки для досліджень матеріалів на стиск виготовляли у вигляді циліндрів згідно вимог [12], що мають такі розміри: висота 15 мм, при діаметрі 10 мм.

Зразки для дослідження властивостей та характеристик матеріалів при терті виготовляли у вигляді колодки робочим діаметром 0,05 м (50 мм). Загальний вигляд зразку для дослідження трибологічних характеристик наведено на рис. 2.3.

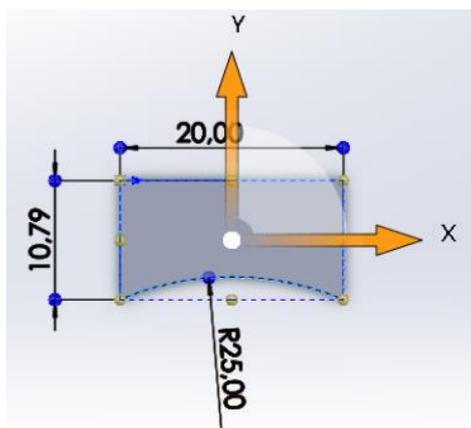


Рисунок 2.3 – Зразок типу «колодка» для дослідження триботехнічних характеристик та властивостей матеріалів

Після проектування зразків у CAD системі їх зберігають у форматі STL для подальшого підготовки до виготовлення за технологією 3D друку. Одним з таких є програмне забезпечення Bambu Studio. Вибір саме цього програмного забезпечення обґрунтовано використанням принтера виробника даної фірми, а саме модель Bambu Lab P1S.

У випадку початку роботи із новими матеріалом або партією матеріалу необхідно виконати визначення оптимальних режимів друку (виготовлення) деталей. Серед основних параметрів, які потребують оптимізації є температура та швидкість друку. Оптимальне значення цих параметрів зазвичай вказують виробники до кожного матеріалу. Проте, кожен окремо взятий принтер має свої особливості, похибки термісторів, датчиків та приводів. Тому, перед використанням нового матеріалу бажано виконувати оптимізацію хоча б температури екструзії. Виконати це можна за допомогою різного програмного забезпечення, наприклад OrcaSlicer. Дане програмне забезпечення дає

можливість створити спеціальну калібрувальну башту з різномісними елементами для визначення оптимальної температури екструзії певного матеріалу.

Для прикладу на рис. 2.4 наведено робоче середовище вказаного програмного забезпечення при підготовці моделі для матеріалу Nylon CCF.

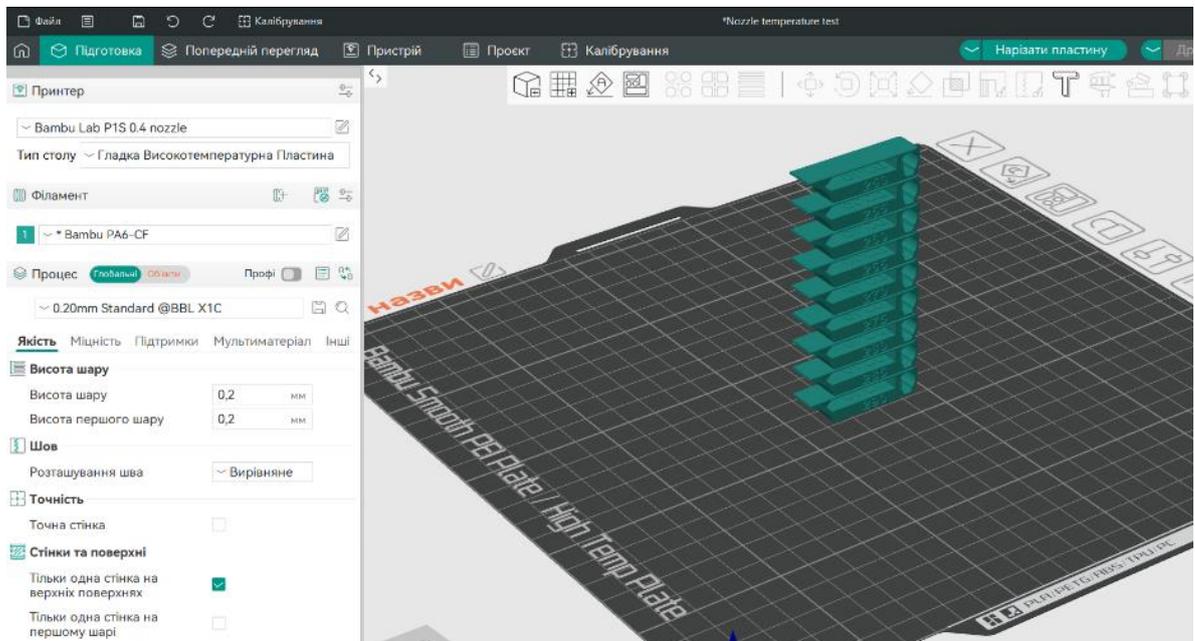


Рисунок 2.4 – Середовище програмного забезпечення OrcaSlicer

Загальний вигляд робочого середовища із завантаженими зразками для досліджень матеріалів на стиск, розтяг, ударну в'язкість та триботехнічних характеристик та властивостей представлено на рис. 2.5.

Порядок підготовки 3Д моделей експериментальних зразків у вказаному програмному забезпеченні такий:

1. Завантаження моделей на віртуальний стіл 3D принтера, налаштування їх оптимального розміщення та кількості. На цьому етапі необхідно обрати модель принтера, по чергово завантажити всі 3Д моделі зразків та розмістити їх на робочому столі принтера. За необхідності виконують клонування зразків, якщо їх потрібно більше ніж 1.

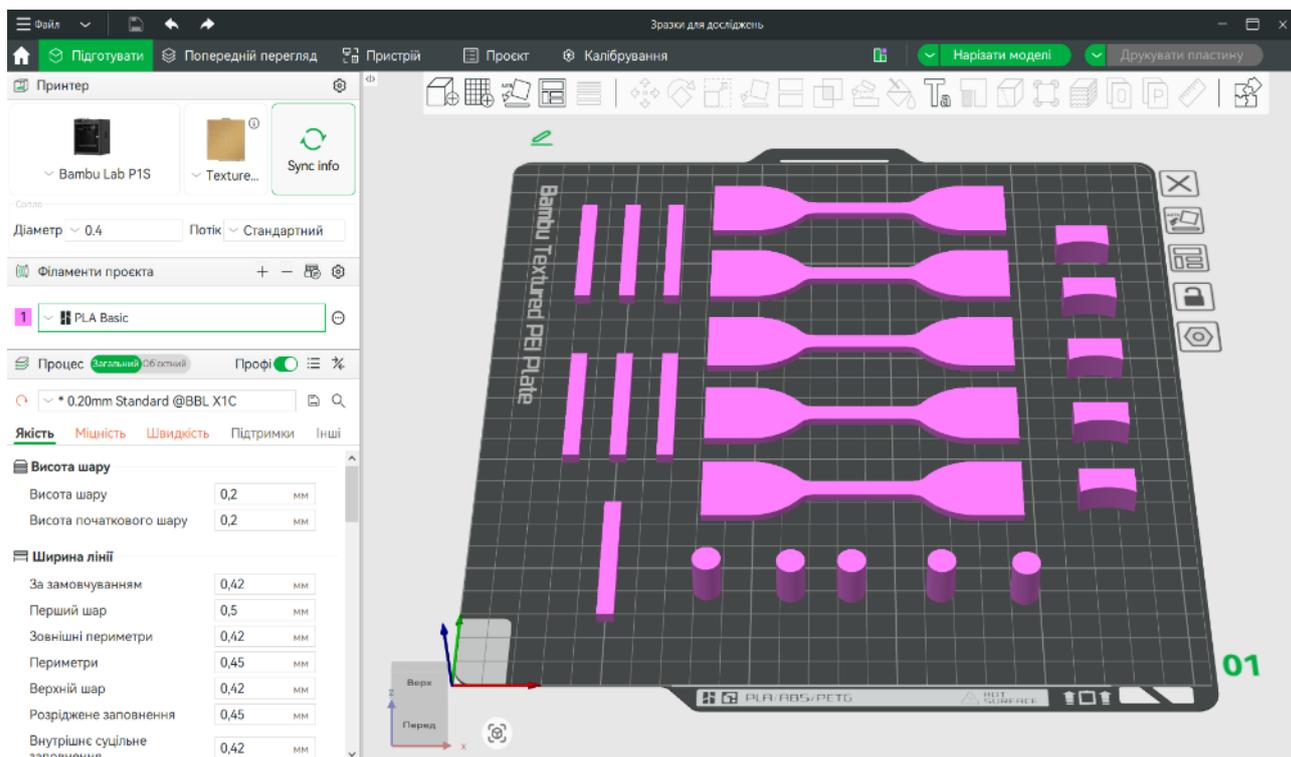


Рисунок 2.5 – Робоче середовище Vambu Studio із завантаженими моделями експериментальних зразків

2. Налаштування якості майбутніх зразків, а також їх міцності, швидкості руху друкуючої головки та додаткових елементів (підкладок, опор та ін.) для забезпечення якісного виготовлення зразків.

3. Виконати нарізку розміщених моделей на шари призначених для поступового нанесення (наплавлення) матеріалу та одержання готових виробів.

4. Збереження підготовленого файлу та відправка його на 3D принтер для виготовлення зразків.

Після цього необхідно перевірити початок роботи принтера та відповідність обраних режимів виготовлення до реальних режимів роботи.

Виготовлення зразків проводили на принтері Vambu Lab P1S з робочою областю для виготовлення деталей розміром 256x256x256 мм (рис. 2.6). Принтер має закритий корпус із скляних панелей. Верхня панель не зафіксована, а просто вкладається в направляючі. В передній частині розміщений дисплей із кнопками керування та скляні двері.



а



б

Рисунок 2.6 – 3D принтер Bambu Lab P1S: а – загальний вигляд; б – дисплей з елементами управління

Якщо під час роботи принтера спостерігається низька якість друку, то через панель керування можна змінити параметри роботи, такі як: температура столу та екструзії, швидкість друку та режими роботи вентиляторів.

Загальний вигляд зразків одразу по завершенню FDM 3D друку для матеріалу CoPET представлено на рисунку 2.7

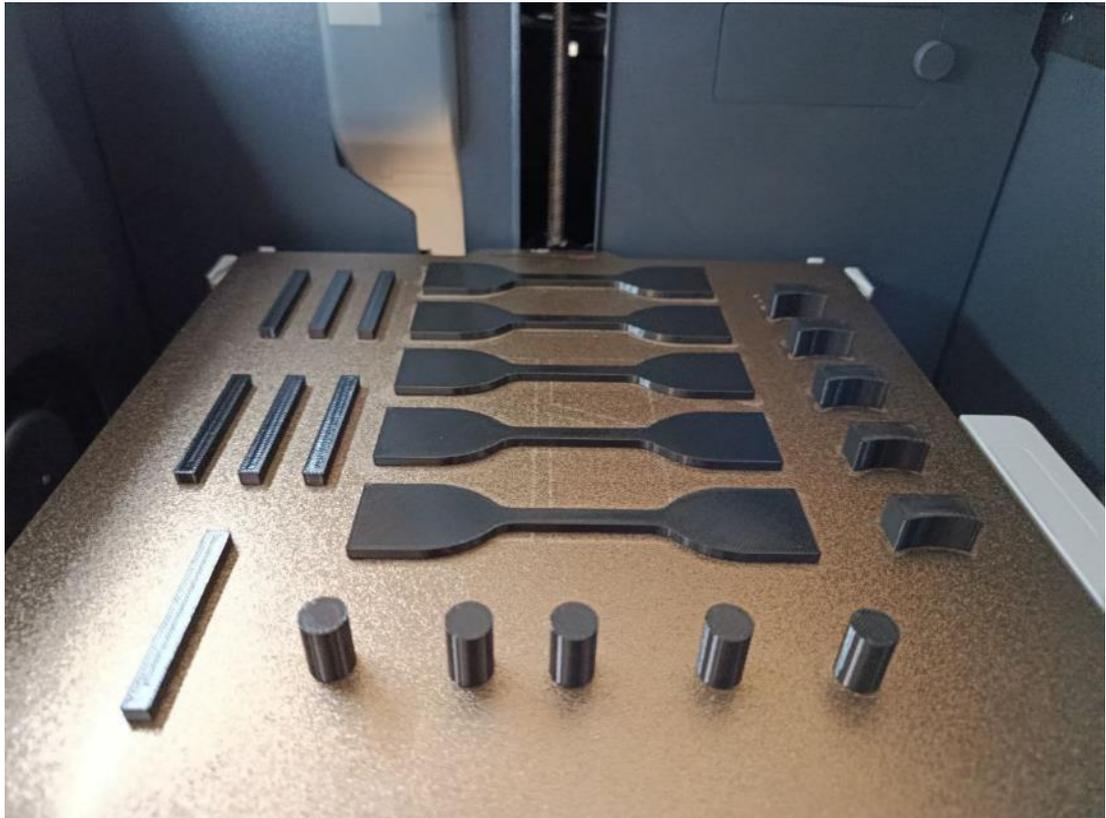


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд готових експериментальних зразків із матеріалу coPET

### **2.3 Підготовка отриманих зразків та дослідження міцнісних характеристик матеріалів при розтягу-стиску**

Зразки на розтяг перед випробуванням кондиціонують не менше 16 годин при температурі  $23 \pm 2$  °C і відносній вологості  $50 \pm 5$  %. Цей час включається в загальний період між виготовленням формованих зразків і проведенням випробувань. Перед початком випробувань на зразки наносять мітки згідно з вимогами [12]; мітки не повинні впливати на якість зразків чи спричиняти їх розрив у місцях нанесення. Товщину і ширину кожного зразка вимірюють у трьох точках – посередині та на відстані 5 мм від міток, після чого визначають середні арифметичні значення, за якими обчислюють початковий поперечний переріз. Якщо різниця між мінімальними та максимальними значеннями

товщини або ширини перевищує 0,2 мм, такі зразки до випробувань не допускаються. Під час закріплення зразків у затискувачах випробувальної машини їх вирівнюють за мітками так, щоб подовжні осі затискувачів і зразка збігалися з напрямом руху затискувача. Затискувачі затягують рівномірно – достатньо, щоб уникнути ковзання зразка під час випробування, але без пошкодження в місцях кріплення.

Випробовування матеріалів на розтяг та стиск виконували на спеціалізованій машині FP-100/1 (рис. 2.8) за умовами, які детально описані в роботах [11, 12].

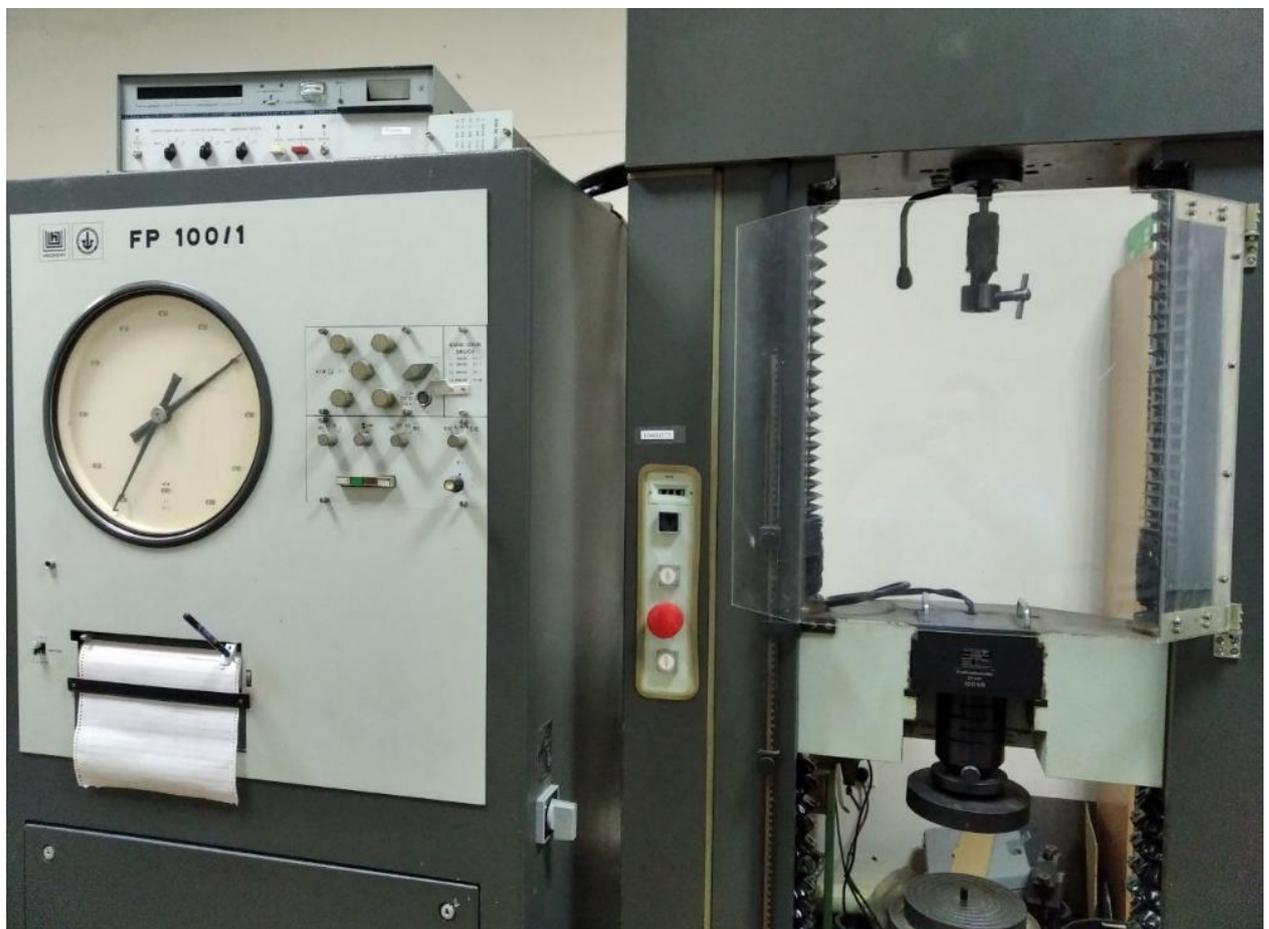


Рисунок 2.8 – Випробувальна машина FP-100/1

Випробування виконують при швидкості розходження затискувачів випробувальної машини, зазначеній у нормативно-технічній документації на матеріал, яка відповідає одній із наведених у [12]. Обирають найбільшу допустиму швидкість з [12] так, щоб тривалість від моменту прикладення

навантаження до руйнування зразка становила не менше однієї хвилини для матеріалів із границею текучості та не менше тридцяти секунд для тих, що її не мають. Під час випробування безперервно або в ключові моменти – при досягненні границі текучості, максимального навантаження та руйнування – фіксують навантаження і видовження зразка. На основі отриманої кривої «навантаження–видовження» визначають характеристики згідно з характером одержаних залежностей. Зразки, що зруйнувалися за межами робочої частини або містять дефекти, такі як пухирі, сторонні включення чи внутрішні тріщини, до результатів не включають.

Розміри зразку для випробування на стиск вимірюють з точністю не гірше 0,01 мм щонайменше у трьох точках, після чого за мінімальними отриманими значеннями обчислюють площу його поперечного перерізу. Зразок розміщують між опорними площадками таким чином, щоб його вертикальна вісь точно збігалася з напрямом прикладання навантаження. Випробувальну машину регулюють до моменту повного контакту між зразком і площадками, потім встановлюють задану швидкість їх зближення, запускають машину та фіксують необхідні показники або криву «навантаження–деформація» під час стискання.

Результати досліджень матеріалів розтяг та стик виконували для мінімум 5 зразків без врахування вибракуваних.

#### **2.4 Методика та устаткування для дослідження трибологічних властивостей матеріалів**

Трибологічні дослідження властивостей матеріалів виконували на машині тертя СМЦ-2 (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Машина СМЦ-2

Для визначення моменту тертя, і відповідно коефіцієнту тертя, взамін стандартного самописця КСП-2 використовували прецензійний мультиметр UNI-T UT8804E, який попередньо откалібровано для роботи з СМЦ-2.

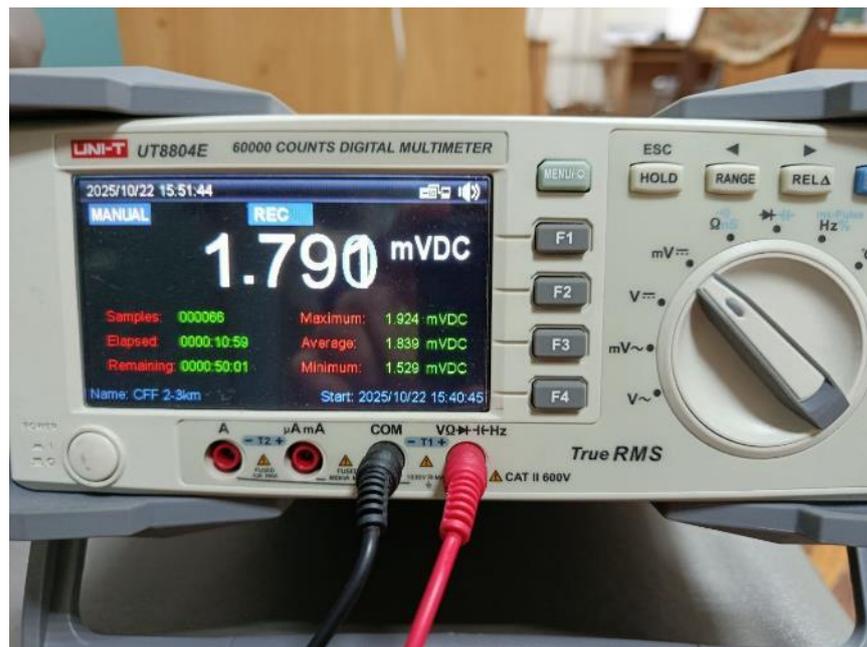


Рисунок 2.10 Прецензійний мультиметр UNI-T UT8804E

Перед проведення досліджень щодо визначення коефіцієнту тертя та величини зносу, обов'язково проводили припрацювання зразку (колодки) до контр тіла – сталевого диску з діаметром 50 мм. Кінцем припрацювання вважали момент при якому із загальної площі зразку – 2 см<sup>2</sup> мінімум 75 % площі мала безпосередній контакт з контр-тілом.

Режими випробування:

- швидкість руху (лінійна) – 0,785 мм/с;
- тиск – 0,5 МПа;
- шлях тертя: загальний – 3 км, з контрольними точками через 1 км.

Температуру в зоні тертя визначали за допомогою логера температури з термопарою із можливістю автоматичного запису кожні 5 секунд (рис. 2.11).

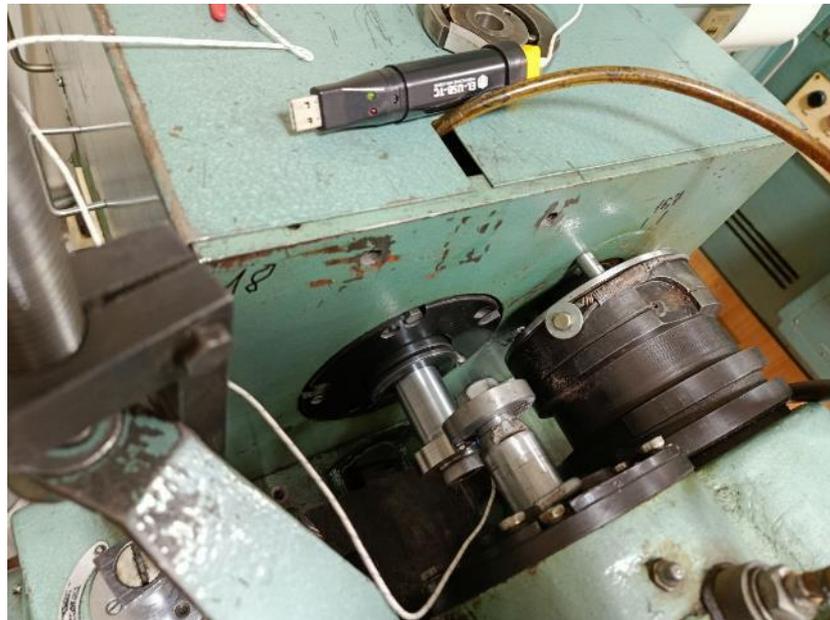


Рисунок 2.11 – Пристосування для фіксації температури в зоні тертя

Величину зносу зразків визначали на терезах ваговим методом – зважування до та після випробувань.

Відповідно до представлених в даному розділі методик, виконані дослідження характеристик обраних матеріалів, а їх результати та аналіз наведено в наступному розділі дипломної роботи.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Оптимізація температури екструзії (виготовлення) зразків за технологією FDM друку

Температура виготовлення деталей за допомогою технології FDM друку є одним із основних параметрів режимів роботи 3D принтера, що безпосередньо впливає на якість готової продукції. В роботі виконано роботи з оптимізації температури друку на основі виготовлення «температурних башт» для всіх трьох обраних матеріалів. На рис. 3.1 наведено тестові зразки для матеріалів ABS/PC та Nylon-CCF.



Рисунок 3.1 – Тестові зразки для оптимізації температури екструдера 3D принтера при використанні: а – ABS/PC; б – Nylon-CCF

Відповідно до отриманих тестових зразків (рис. 3.1), можна зробити висновок, що перший вказаний матеріал майже у всьому діапазоні обраної температури забезпечує монолітну деталь. Тільки для температур нижче 200 °С спостерігається незначне погіршення спаювання шарів та пропуски.

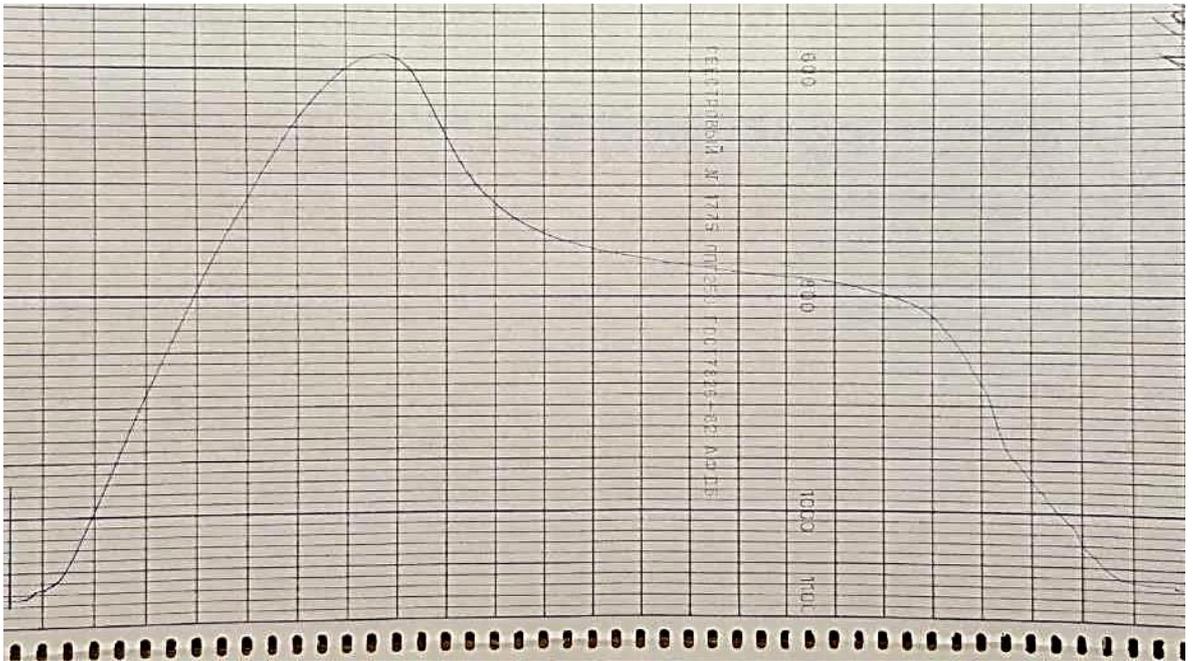
Для матеріалу Nylon-CCF виробник вказує діапазон оптимальної температури 260...270 °С. Одержана тестова модель з діапазоном переробки 250...290 °С з кроком в 5 °С, дуже добре дозволяє визначити оптимальну температуру виготовлення деталей цим матеріалом. Голубим кольором на рис. 3.2 позначені області, що мають дефекти виготовлення (екструзії). Це зокрема такі як, не спаювання шарів матеріалів між собою, провисання філаменту та так звана «павутинка», що є свідченням часткових залишків матеріалу на поверхні при переході екструдера з одної точки до іншої. За зовнішнім оглядом встановлено, що оптимальною температурою для даного матеріалу є 270...275 °С, виділено жовтим кольором, рис. 3.1. Крім того одну з таких башт зруйнували на частинки для визначення міцності. Тестові зразки з температурою 270 °С та 275 °С руками зруйнувати не змогли, в той час як всі інші руйнувалися з різним зусиллям. Зразки з температурою менше 260 °С – розшаровувалися та не мали монолітної структури. Таким чином оптимальною температурою переробки матеріалу Nylon-CCF є діапазон 270...275 °С, що незначно перевищує рекомендовану виробником температуру.

Дещо вища оптимальна температура екструдера, у порівнянні із рекомендованою виробником, може бути пов'язана із підвищеними швидкостями друку. Виробником рекомендовано для даного матеріалу діапазон швидкості друку в межах 30-60 мм/с, в той час, як у дослідження обрано трохи вищу швидкість друку – 80 мм/с.

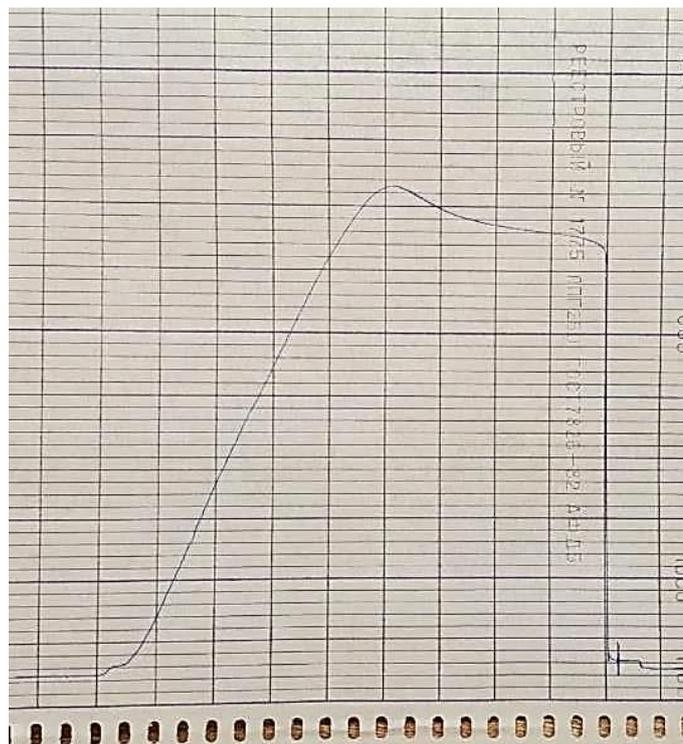
Крім температури екструзії та робочого столу, всі інші режими виготовленні зразків, для обраних матеріалів були однаковими та становили:

- висота шару – 0,2 мм;
- заповнення – 100 % (з прямолінійний малюнком);
- швидкість друку – 80 мм/с;





а



б

Рисунок 3.3 – Діаграми «навантаження-деформація» при розтягу для матеріалів: а – CoPET; б – ABS/PC

Наведені залежності (рис .3.3) мають схожу будову, а саме зону пружної деформації, що швидко переходить в зону текучої деформації, яка триває

незначну тривалість та потім спостерігається розтягування зразку з пластичною деформацією.

Загальні одержані результати дослідження обраних матеріалів на розтяг наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати дослідження зразків матеріалів на розтяг

| ABS/PC                  |       |       |                                  |                    |                    |                      |              |                    |                    |
|-------------------------|-------|-------|----------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------|--------------------|--------------------|
| № п/п                   | a, мм | b, мм | F <sub>0</sub> , мм <sup>2</sup> | P <sub>T</sub> , Н | P <sub>p</sub> , Н | σ <sub>T</sub> , МПа | σ, МПа       | ε <sub>T</sub> , % | ε <sub>p</sub> , % |
| 1                       | 5,60  | 2,75  | 15,40                            | 711,36             | 629,6              | 46,19                | 40,88        | 5,99               | 10,66              |
| 2                       | 5,60  | 2,70  | 15,12                            | 695                | 629,6              | 45,97                | 41,64        | 5,75               | 8,50               |
| 3                       | 5,60  | 2,70  | 15,12                            | 695                | 621,4              | 45,97                | 41,10        | 5,75               | 9,10               |
| 4                       | 5,60  | 2,70  | 15,12                            | 711,36             | 637,8              | 47,05                | 42,18        | 5,63               | 8,86               |
| 5                       | 5,60  | 2,75  | 15,40                            | 719,53             | 629,6              | 46,72                | 40,88        | 6,11               | 10,54              |
| <b>Середнє значення</b> |       |       |                                  |                    |                    | <b>46,38</b>         | <b>41,34</b> | <b>5,84</b>        | <b>9,53</b>        |
| Nylon-CCF               |       |       |                                  |                    |                    |                      |              |                    |                    |
| № п/п                   | a, мм | b, мм | F <sub>0</sub> , мм <sup>2</sup> | P <sub>T</sub> , Н | P <sub>p</sub> , Н | σ <sub>T</sub> , МПа | σ, МПа       | ε <sub>T</sub> , % | ε <sub>p</sub> , % |
| 1                       | 6,20  | 3,10  | 19,22                            | 1193,8             | 1267               | 62,11                | 65,94        | 6,23               | 11,37              |
| 2                       | 6,20  | 3,05  | 18,91                            | 1210,1             | 1259               | 63,99                | 66,59        | 6,35               | 11,61              |
| 3                       | 6,15  | 3,10  | 19,07                            | 1152,9             | 1243               | 60,47                | 65,19        | 5,63               | 10,06              |
| 4                       | 6,15  | 3,05  | 18,76                            | 1210,1             | 1267               | 64,51                | 67,57        | 6,35               | 11,73              |
| 5                       | 6,20  | 3,10  | 19,22                            | 1201,9             | 1259               | 62,54                | 65,51        | 6,23               | 11,49              |
| <b>Середнє значення</b> |       |       |                                  |                    |                    | <b>62,73</b>         | <b>66,16</b> | <b>6,15</b>        | <b>11,25</b>       |
| CoPET                   |       |       |                                  |                    |                    |                      |              |                    |                    |
| № п/п                   | a, мм | b, мм | F <sub>0</sub> , мм <sup>2</sup> | P <sub>T</sub> , Н | P <sub>p</sub> , Н | σ <sub>T</sub> , МПа | σ, МПа       | ε <sub>T</sub> , % | ε <sub>p</sub> , % |
| 1                       | 5,80  | 2,80  | 16,24                            | 883,06             | 531,5              | 54,38                | 32,73        | 9,10               | 24,07              |
| 2                       | 5,70  | 2,75  | 15,68                            | 899,42             | 482,4              | 57,38                | 30,78        | 8,62               | 23,71              |
| 3                       | 5,70  | 2,75  | 15,68                            | 915,77             | 506,9              | 58,42                | 32,34        | 8,74               | 23,95              |
| 4                       | 5,80  | 2,75  | 15,95                            | 866,71             | 490,6              | 54,34                | 30,76        | 8,86               | 23,71              |
| 5                       | 5,70  | 2,75  | 15,68                            | 883,06             | 539,6              | 56,34                | 34,43        | 8,98               | 24,19              |
| <b>Середнє значення</b> |       |       |                                  |                    |                    | <b>56,17</b>         | <b>32,21</b> | <b>8,86</b>        | <b>23,92</b>       |

Для зручності сприйняття та якісного проведення аналізу одержаних даних представимо наведені результати у вигляді гістограм (рис. 3.4 та 3.5).

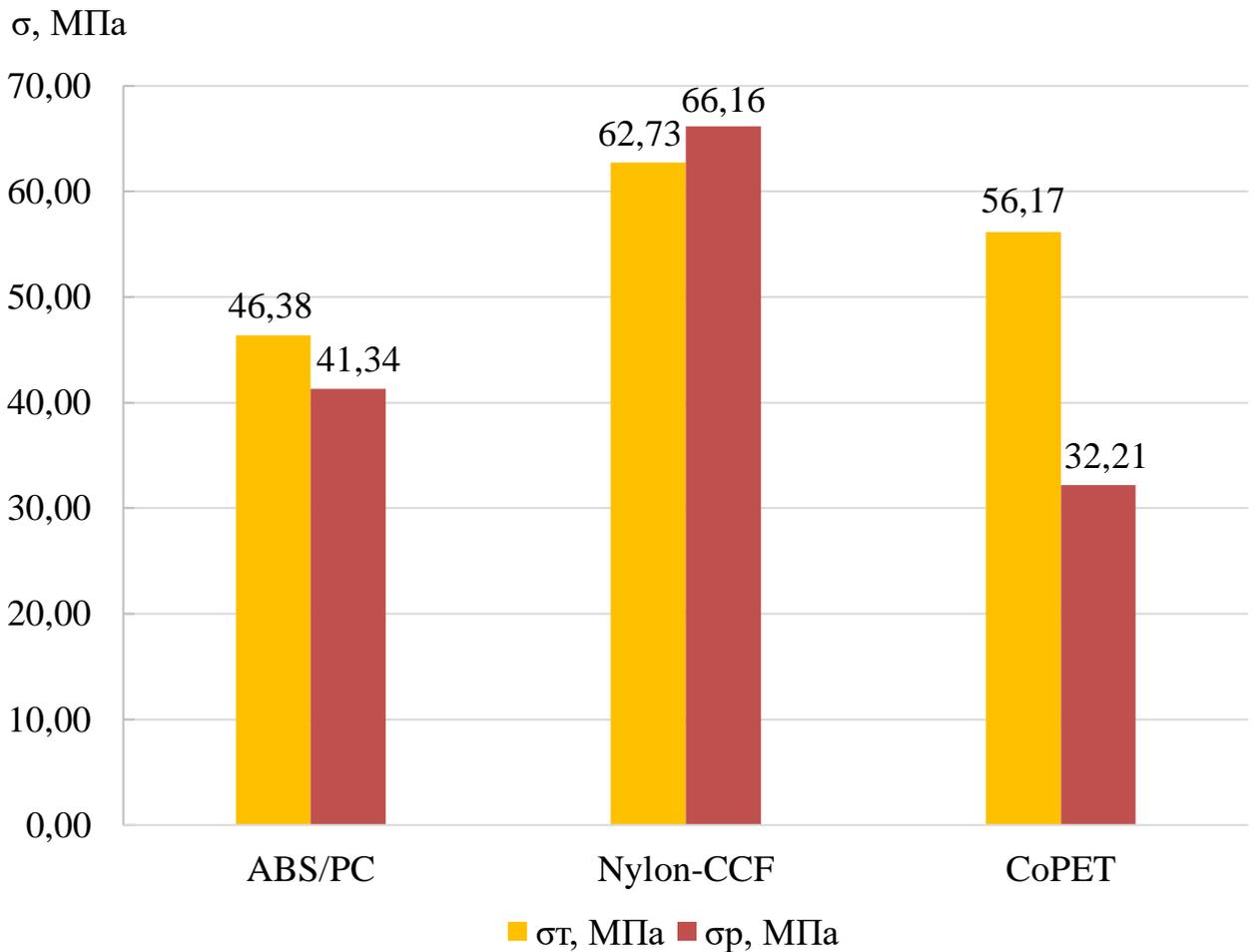


Рисунок 3.4 – Результати визначення величини границі текучості за розтягу  $\sigma_t$  (МПа) та міцності при розриві  $\sigma_r$  (МПа) досліджуваних матеріалів

Одержані результати, рис. 3.4 свідчать, що найбільше значення границі текучості серед досліджуваних матеріалів має матеріал Nylon CCF – 62,73 МПа. Матеріали ABS/PC та CoPET мають значно меншу границю текучості 46,38 МПа та 56,17 МПа відповідно. Найбільшу величину напруження при розриві зафіксовано також для матеріалу Nylon CCF – 66,16 МПа, для інших досліджуваних матеріалів це параметр значно менший, для ABS/PC та CoPET відповідно становить 41,34 МПа та 32,21 МПа. Таким чином, серед досліджуваних матеріалів найбільш стійким до розтягу є Nylon CCF, який при досягненні умовної границі текучості продовжує чинити опір прикладеному зусиллю та одразу не деформується. Тому, можна рекомендувати всі

досліджувані матеріали тільки для тих деталей, режими яких не мають навіть у граничному режимі роботи перевищення одержаних значення границь їх текучості – 35,21 МПа. У випадку значно більшого тиску на спряження рекомендовано використовувати композитний матеріал Nylon CCF.

В той же час матеріали ABS/PC та Nylon-CCF мають незначну різницю у величині досягнення границі текучості та границі руйнування зразків. Для комплексного аналізу матеріалів при розтягу на рис. 3.5 представлено результати відносної деформації зразків при досягненні границі текучості та при їх руйнуванні.

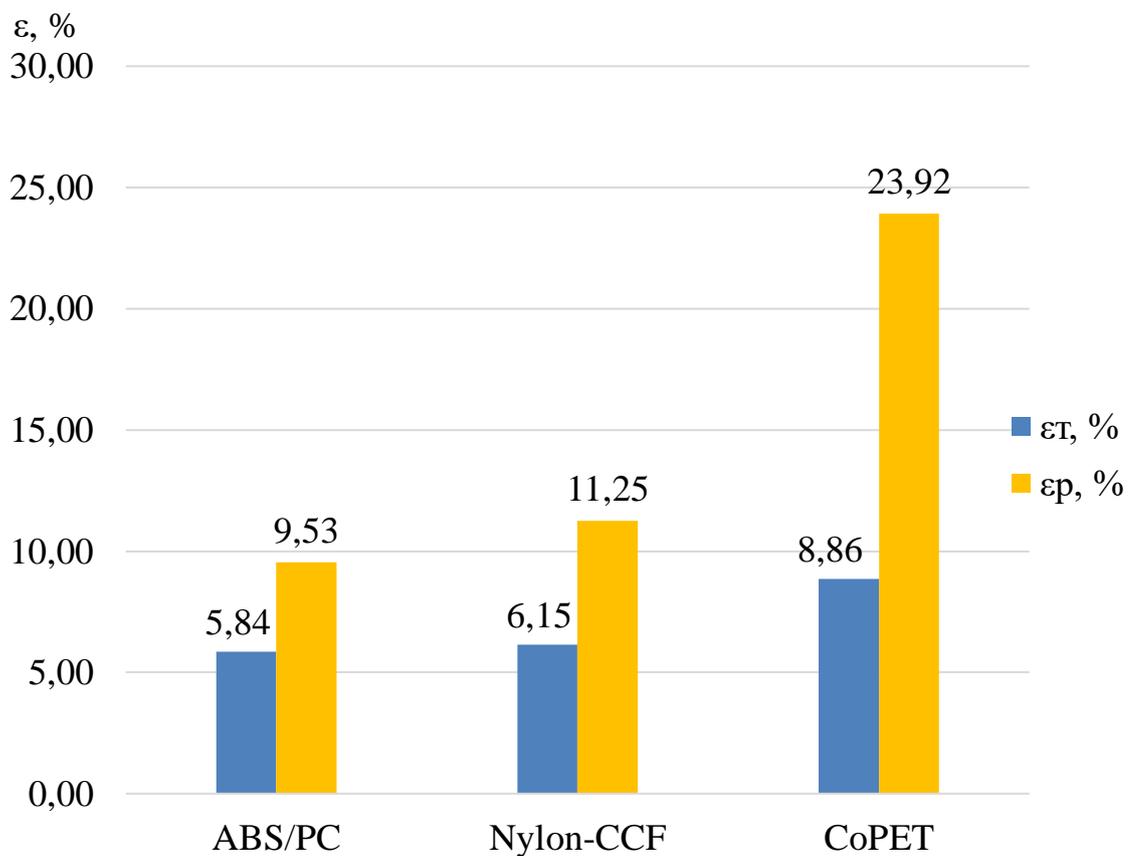


Рисунок 3.5 – Результати визначення величини відносного видовження при границі текучості  $\varepsilon_T$  (%) та при розриві  $\varepsilon_p$  (%)

Відповідно до отриманих результатів (рис. 3.5) можна зробити висновок, що матеріал ABS/PC має незначну величину відносного видовження при досягненні границі текучості та границі руйнування всього 5,84 % та 9,53 % відповідно. Тому такий матеріал можна назвати жорстким. Матеріал Nylon-CCF

також має схожі характеристики відповідно видовження при досягненні границі текучості та границі руйнування всього 6,15 % та 11,25 %. CoPET має найбільші значення досліджуваних величин – 8,86 % та 23,92 % відповідно.

Деталі машин крім навантажень, що пов'язані з їх розтягом, одночасно працюють і на стиск. Режим дослідження матеріалів на стиск: швидкість руху траверси – 0,207 мм/хв; швидкість руху паперу – 20 мм/хв; максимальне навантаження – 2 кН. Результати дослідження матеріалів на стиск наведено в таблиці 3.2 та рис. 3.6.

Таблиця 3.2 – Результати дослідження матеріалів на стиск

| № з/п | Марка матеріалу | Середнє значення границя текучості $\sigma$ , МПа | Модуль пружності E, МПа |
|-------|-----------------|---|-------------------------|
| 1     | CoPET           | 52,07   | 1447,47                 |
| 2     | Nylon-CCF       | 45,96   | 1102,35                 |
| 3     | ABS/PC          | 56,30   | 1499,36                 |

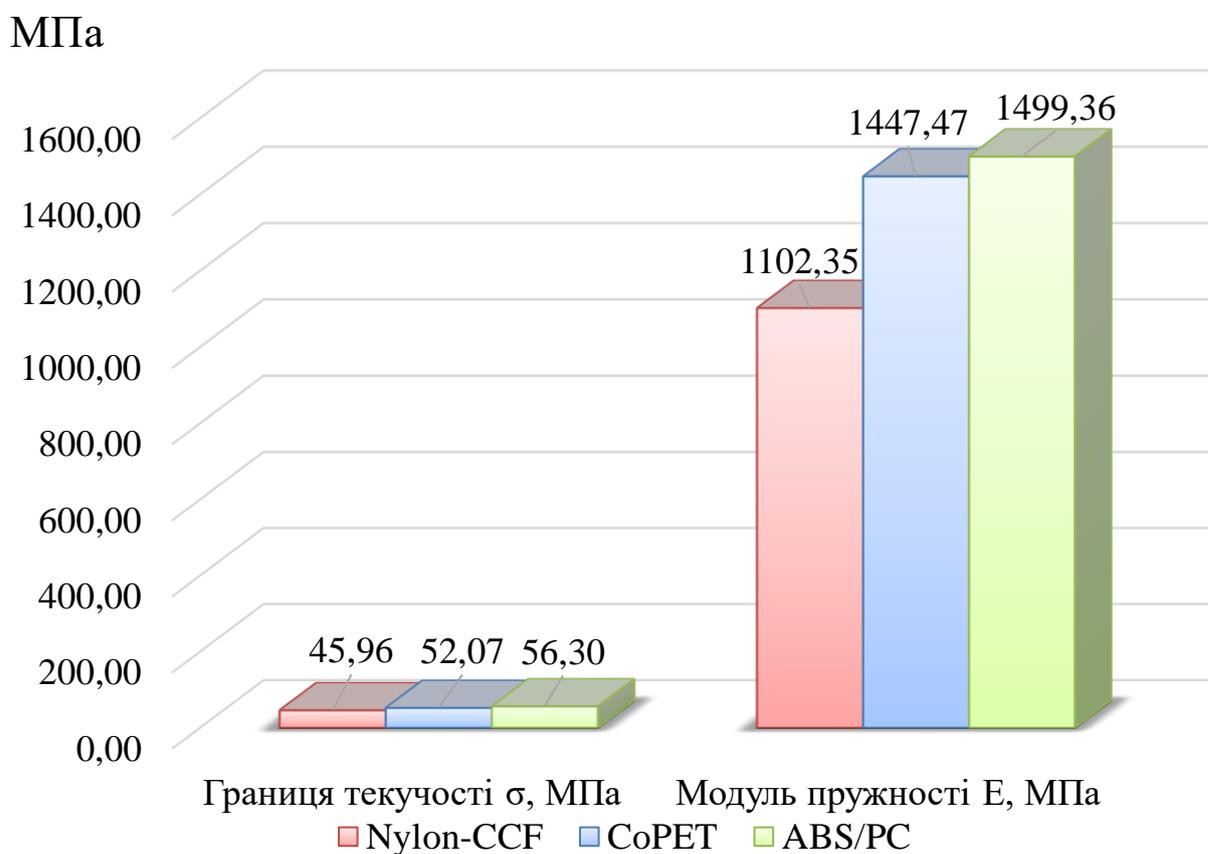


Рисунок 3.6 – Результати дослідження матеріалів на стиск

Одержані результати свідчать, що найбільше значення границі текучості при стиску серед досліджуваних матеріалів має ABS/PC – 56,3 МПа, дещо нижче значення має CoPET – 52,07 МПа. Для матеріалу Nylon-CCF зафіксовано найменше значення границі текучості при стиску – 45,96 МПа. Результати щодо визначення модуля пружності вказаних матеріалів мають аналогічну тенденцію, для матеріалів ABS/PC та CoPET він становить 1499,36 МПа та 1447,47 МПа.

### 3.3 Результати трибологічних досліджень

Загальний вигляд контр-тіла, досліджуваного зразку та встановленої термопари в процесі досліджень наведено на рис. 3.7.

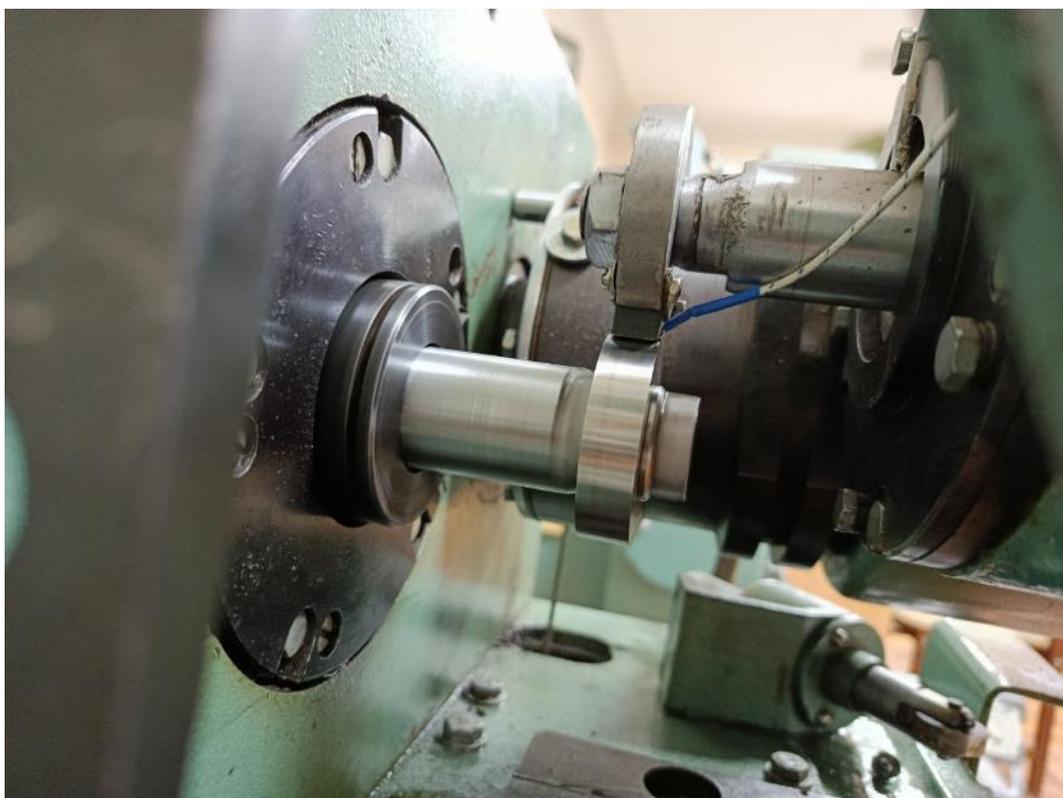
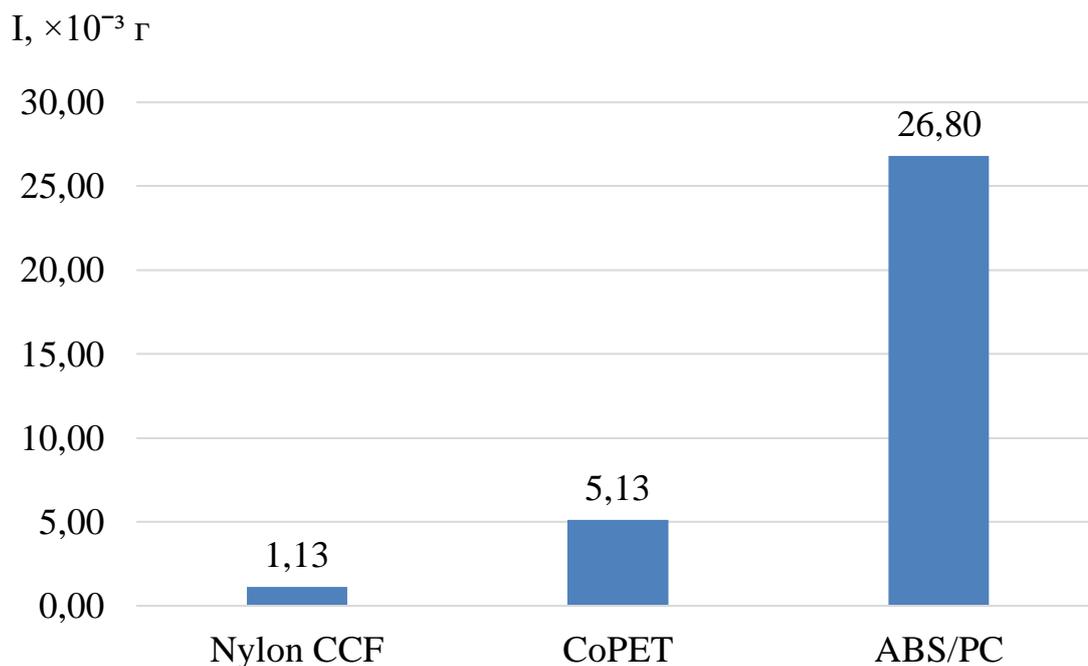


Рисунок 3.7 – Розміщення колодки з ПКМ, контр тіла зі сталі та термопари під час досліджень

Результати визначення величини зносу досліджуваних матеріалів представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати визначення величини зносу зразків

| Назва матеріалу | Величина зносу при пройденому шляху, г |        |        | I, $\times 10^{-3}$ г |
|-----------------|--|--------|--------|-----------------------|
|                 | 1 км                                   | 2 км   | 3 км   |                       |
| Nylon CCF       | 0,0012                                 | 0,0012 | 0,0010 | 1,13                  |
| CoPET           | 0,0056                                 | 0,0051 | 0,0047 | 5,13                  |
| ABS/PC          | 0,0294                                 | 0,0266 | 0,0244 | 26,80                 |

Рисунок 3.8 – Величина зносу досліджуваних зразків у розрахунку на шлях тертя 1000 м (режим тертя:  $p = 0,5$  МПа,  $v = 0,785$  м/с)

Одержані результати свідчать, що найменшу величину зносу (за масою) мають зразки виготовлені із Nylon CCF, матеріал CoPET має знос, що майже в 5 разів більший, ніж для Nylon CCF. Матеріал ABS/PC має значний знос, навіть при візуальному огляді (подряпини, сколи та ін.), тому його не рекомендовано застосовувати, як матеріал для деталей трибоспряджень.

Після тертя зразку із матеріалу Nylon CCF по сталевому диску (контр тілі) на поверхні останнього зафіксовано наявність ефекту переносу частинок (потемніння поверхні контакту) композитного матеріалу (рис. 3.9).



Рисунок 3.9 – Контр тіло зі Ст. 45 після тертя в спряженні з матеріалом Nylon-CCF (шлях тертя – 3 км)

Динаміка коефіцієнту тертя при дослідженні матеріалу Nylon-CCF на тертя та знос представлено на рис. 3.10.

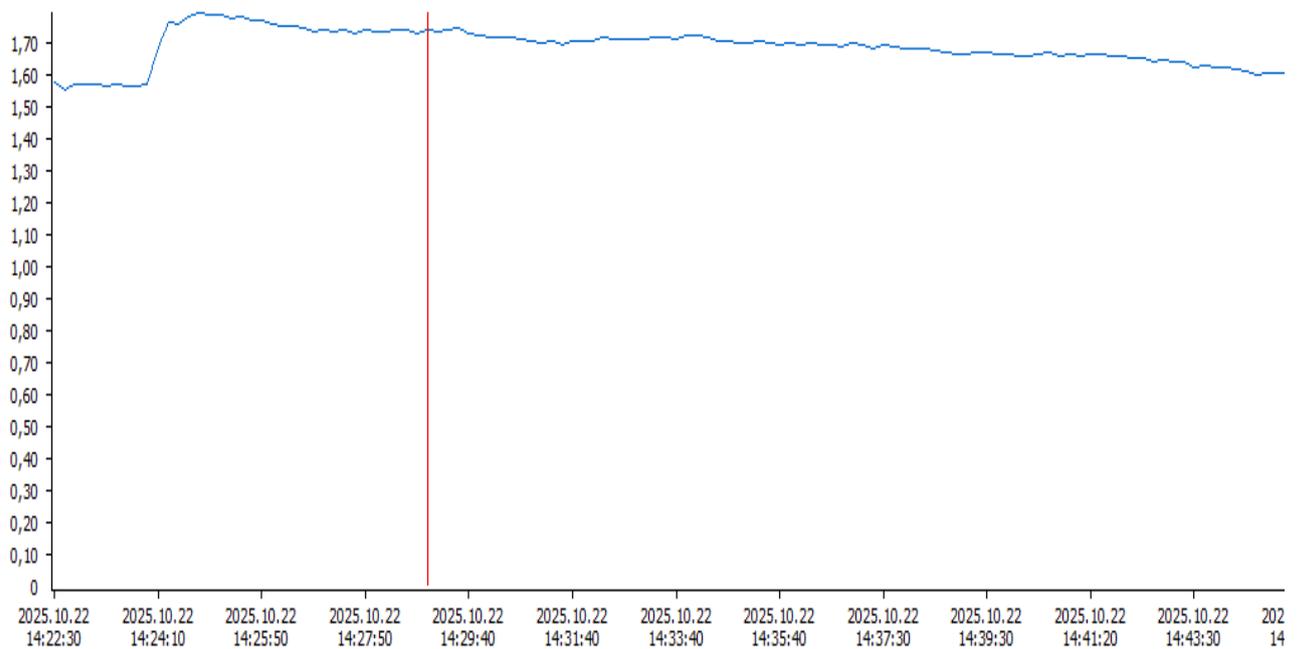


Рисунок 3.10 – Динаміка коефіцієнту тертя при терті матеріалу Nylon-CCF по диску зі Ст. 45 (загальний шлях тертя – 3000 м)

Найбільше значення коефіцієнту тертя для Nylon-CCF зафіксовано на початку процесу тертя та становило – 0,16. Найменше стабільне значення при сталому режимі тертя – 0,12. Для інших досліджуваних матеріалів залежності коефіцієнту тертя від тривалості експерименту мали аналогічний характер, а їх величина становила 0,22 та 0,34 відповідно для CoPET та ABS/PC.

Окрім величини зносу та коефіцієнту тертя, одним із важливих факторів забезпечення працездатності полімерів та композитів на їх основі є температура експлуатації деталей з таких матеріалів. Результати визначення температури, в зоні тертя, за допомогою логера температури та програмного забезпечення до нього для матеріалу Nylon-CCF наведено на рис. 3.10.

Одержані результати (рис. 3.11) дозволяють зробити висновок, що температура в зоні терті спряження зразку з матеріалу Nylon-CCF та диску зі сталі 45, на початку роботи дещо зростає протягом 7...8 хв. Після цього температура досягнувши 42 °C стабілізується та після 15 хв тертя починає поступово знижатися.

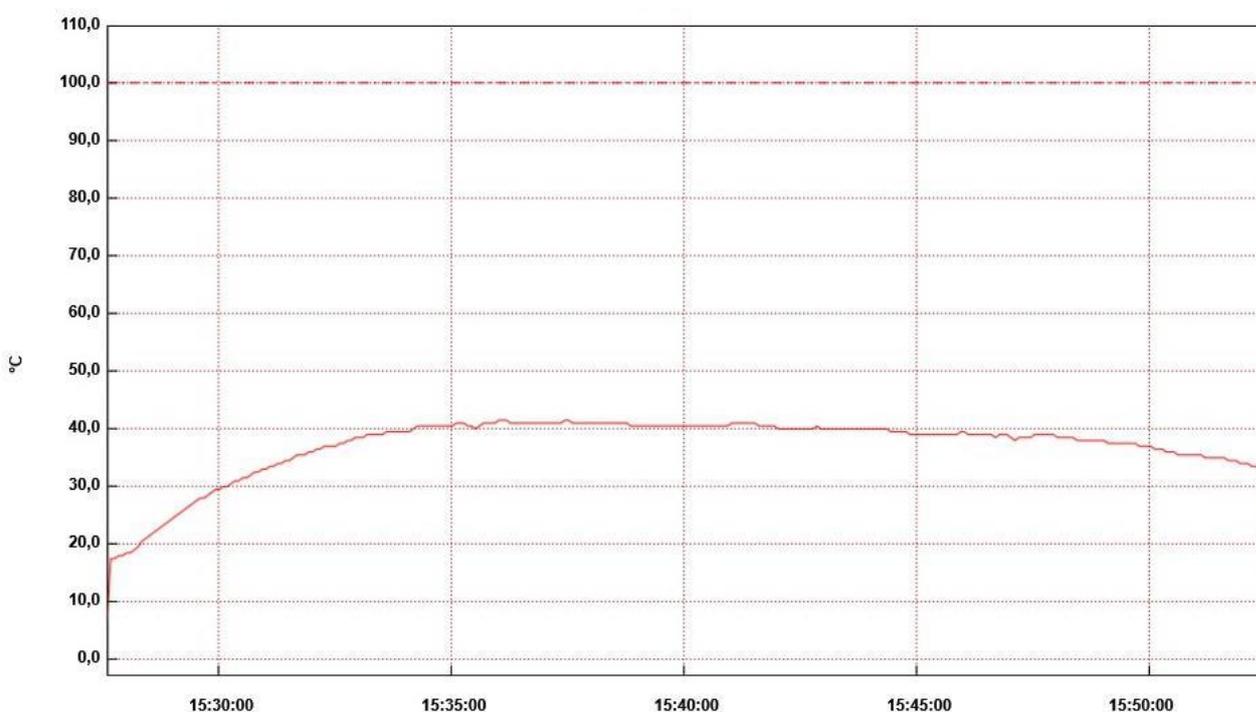


Рисунок 3.11 – Динаміка температури при терті зразку з матеріалу Nylon-CCF в спряженні з диском виготовленим зі Ст. 45

Мінімальна температура зафіксована в кінці дослідження – 33 °С. Для вказаного матеріалу рекомендована температура експлуатації вказана виробником не повинна перевищувати 120 °С. Тому, можна стверджувати, що матеріал забезпечує працездатність в обраному режимі тертя.

### **3.4 Рекомендації щодо використання досліджуваних матеріалів для виготовлення деталей с.-г. техніки**

Одержані результати дозволяють надати обґрунтовані рекомендації щодо застосування досліджуваних матеріалів в конструкціях сільськогосподарської техніки з врахуванням відомих режимів їх роботи, що наведені в роботах [6-7, 10-11, 13-14]:

1. Якщо питомий тиск, без обертального чи коливального руху, що діє на деталі не перевищує 30 МПа, можна використовувати будь який серед досліджуваних матеріалів – міцність буде забезпечена.

2. Для деталей сільськогосподарської техніки, що працюють за тиску до 40 МПа рекомендовано застосовувати матеріал ABS/PC, у випадку перевищення вказаної величини в межах до 60 МПа рекомендовано використовувати композитний матеріал Nylon-CCF.

3. Для деталей трибоспрямижень, що працюють за фактору  $pv$  до 0,4 МПа·м/с рекомендовано застосовувати матеріал Nylon-CCF, який має найменшу величину зносу (найбільший ресурс) та низьку температуру в зоні тертя за даних режимів роботи – до 42 °С.

4. Обов'язковою вимогою, щодо застосування досліджуваних матеріалів для виготовлення деталей за технологією FDM, є визначення оптимальної температури екструзії кожного з них для окремо взятого 3D принтера. Загальні рекомендації виробників не завжди дозволяють одержати деталі із оптимальними фізико-механічними характеристиками.

#### 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

*Загальні вимоги при роботі з 3D-принтером [15].*

Робота з 3D-принтером вимагає дотримання чітких правил безпеки, оскільки цей процес пов'язаний з нагріванням матеріалів до високих температур, роботою рухомих механізмів, використанням електричного струму та можливим виділенням шкідливих парів і мікрочастинок. Приміщення, де встановлено принтер, має бути сухим, добре освітленим і вентиляваним. Важливо забезпечити постійний приплив свіжого повітря або встановити витяжну систему, адже під час друку деякі види пластику (особливо ABS, PETG, нейлон) виділяють леткі органічні сполуки, що можуть негативно впливати на здоров'я.

Оператор 3D-принтера повинен пройти інструктаж із безпеки праці перед початком роботи. Усі електричні з'єднання повинні бути справними, ізольованими та заземленими. Забороняється працювати з пошкодженими кабелями або нестійкими розетками. Під час експлуатації принтера слід пам'ятати, що нагрівальний елемент екструдера і платформа можуть досягати температур понад 250 °С, тому доторкатися до них під час роботи категорично заборонено. Перед будь-яким обслуговуванням, очищенням або заміною деталей принтер потрібно повністю відключити від електромережі.

Пластики, які використовуються для друку, мають різні властивості. PLA вважається найменш шкідливим, оскільки виготовлений на основі кукурудзяного крохмалю, проте ABS і нейлон під час плавлення виділяють токсичні пари. Тому робота з такими матеріалами повинна проводитися у приміщеннях із хорошою вентиляцією або з використанням фільтраційних систем. Філаменти бажано зберігати у закритих контейнерах, подалі від вологи, тепла та прямих сонячних променів.

Під час друку не можна втручатися в роботу принтера: не торкатися рухомих частин, не намагатися зняти деталь із платформи, поки процес не завершено і поверхня не охолола. Довге волосся слід зібрати, а вільний одяг – зафіксувати, щоб уникнути зачеплення за рухомі елементи. Після завершення

друку деталь потрібно знімати тільки після охолодження робочої платформи, використовуючи спеціальні інструменти, наприклад, шпатель або скребок, аби не травмувати руки.

Для захисту від можливих ризиків слід використовувати індивідуальні засоби захисту. Під час очищення сопла, зняття моделей або роботи з хімічними розчинами необхідно надягати захисні окуляри. Рукавички (бажано нітрилові) потрібні при роботі з гарячими поверхнями або з рідкими фотополімерами у випадку використання SLA/Resin-принтерів. Якщо принтер працює з пластиком, що виділяє запах або пари, варто користуватися респіратором або хоча б медичною маскою.

Щодо пожежної безпеки, важливо пам'ятати, що більшість 3D-принтерів працюють тривалий час і можуть залишатися увімкненими на кілька годин або навіть днів. Не рекомендується залишати принтер без нагляду під час роботи. Поблизу слід мати вогнегасник (порошковий або CO<sub>2</sub>). Для додаткової безпеки бажано використовувати принтери з термозахистом і сертифікованими компонентами, які автоматично вимикають нагрів у разі перегріву або несправності датчиків.

Дотримання цих правил забезпечить не лише безпечну експлуатацію 3D-принтера, а й збереже здоров'я користувача та справність обладнання.

*Перед початком роботи з 3D-принтером* необхідно встановити його на рівну та стійку поверхню, подалі від легкозаймистих речовин, відкритого вогню й джерел води [16]. Перед увімкненням потрібно оглянути обладнання, переконатися в його справності та перевірити стан електропроводки. Якщо виявлено несправності, слід негайно повідомити керівника підрозділу й розпочинати роботу лише після усунення недоліків і отримання дозволу. Також необхідно впевнитися у наявності та надійності захисного заземлення, перевірити електричний шнур, вилку, вимикач і всі елементи керування принтером. Приміщення, де розташований 3D-принтер, потрібно добре провітрювати, підтримуючи допустимі параметри мікроклімату: у холодний

період температура повітря має становити 18...20°C, у теплий – 23...25°C, при відносній вологості 40...60%.

*Під час роботи* дозволяється вмикати й вимикати 3D-принтер лише за допомогою вимикачів – заборонено висмикувати вилку з розетки [16]. Не можна знімати захисні елементи, торкатися нагрітого екструдера або столика, а також допускати до принтера сторонніх осіб. Забороняється переміщувати обладнання під час друку, уживати їжу чи напої поблизу нього, а також втручатися в процес роботи, за винятком екстреної зупинки. Розбирання або ремонт принтера можуть здійснювати лише кваліфіковані спеціалісти. Необхідно стежити, щоб сторонні предмети не потрапляли на рухомі частини обладнання.

*Після завершення роботи* потрібно вимкнути принтер з електромережі, спочатку вимкнувши тумблер, а потім від'єднавши вилку від розетки [16]. Після охолодження столика його слід очистити вологою тканиною або промити водою й висушити, потім установити на місце. Робоче місце необхідно прибрати, видаливши обрізки пластику, браковані деталі й інструменти, після чого ретельно провітрити приміщення.

*При виникненні надзвичайної ситуації*, такої як пожежа, необхідно [16]:

- якомога швидше припинити роботу з обладнанням;
- відключити живлення обладнання;
- повідомити безпосередньому керівнику (завідувачу лабораторії, викладачу) про виникнення пожежі;
- повідомити про виникнення пожежі ДСНС;
- якщо необхідно прийняти участь в організації евакуації здобувачів та працівників та за можливості та безпечності виконати гасіння пожежі первинними засобами.

## 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Економічну оцінку ефективності застосування технології FDM друку деталей проведемо на прикладі порівняння вартості виготовлення певної деталі. Для цього необхідно навести складові витрат за умови виготовлення деталі литтям під тиском у прес-форму на ливарній машині промислового типу у порівнянні із витратами на виготовлення аналогічної деталі шляхом 3D друку.

Наведемо основні вихідні дані для розрахунку вартості виготовлення деталі з ПКМ ВПА-6-20 при литті під тиском та Nylon CCF для технології FDM друку в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Початкові (вихідні) дані для оцінки економічної ефективності роботи

| Показник                                 | FDM-друк | Лиття під тиском |
|--|----------|------------------|
| Маса деталі, г                           | 25       | 25               |
| Вартість матеріалу, грн/кг               | 2000     | 2500             |
| Вартість обладнання, грн                 | 30000    | 165000           |
| Ресурс обладнання, год                   | 5000     | 20000            |
| Амортизація обладнання, грн/год          | 6,00     | 8,25             |
| Електроенергія + обслуговування, грн/год | 20       | 150              |
| Продуктивність, шт/год                   | 3        | 60               |
| Пакування деталей, грн/шт.               | 2        | 1                |
| Вартість прес-форми, грн                 | -        | 10000            |

З врахування додаткових витрат на облой, літники (для лиття під тиском) можливі кайми та підкладки FDM-друку приймаємо ефективну масу деталі 27,5 грам.

Таким чином вартість матеріалу для виготовлення деталі вказаних розмірів буде становити для лиття під тиском та FDM-друку відповідно:

$$V_{\text{д. лиття}} = 2000 \cdot 0,0275 = 55 \text{ грн/шт.}$$

$$V_{\text{д. FDM}} = 2500 \cdot 0,0275 = 68,75 \text{ грн/шт}$$

Загальні витрати на амортизацію, електроенергію обслуговування (табл. 5.1) становить для лиття під тиском – 158,25 грн/год, для FDM-друку – 26 грн/год.

Враховуючи продуктивність обраних технологій маємо витрати на амортизацію, електроенергію та обслуговування, у розрахунку на одну деталь для лиття під тиском 2,63 грн/шт., для FDM-друку – 8,66 грн/шт.

Сумарні витрати на матеріал, амортизацію обладнання, електроенергію, додаткову обробку після виготовлення та пакування будуть складати для FDM-друку – 84,42 грн/шт., для лиття під тиском (без врахування прес-форми) – 63,34 грн/шт.

Амортизацію прес форми визначаємо як відношення її вартості – 10000 грн до кількості деталей, які можна виготовити використовуючи дану прес-форму. Якщо обрати кількість деталей, як  $N$ , то можна розрахувати точку беззбитковості. Вона розраховується шляхом порівняння вартості однієї деталі виготовленої за різними технологіями. Таким чином, ми визначимо кількість деталей при якій дані технології будуть мати однакову вартість її виготовлення.

Отже точка беззбитковості визначається з виразу:

$$T_{\text{без збит.}} = 63,63 \text{ грн/шт.} + 10000 \text{ грн} / N = 84,42 \text{ грн/шт.}$$

Виконавши перетворення отримаємо:

$$N \approx 482 \text{ деталі}$$

Отже при  $N \geq 482$  лиття стає дешевшим за FDM друк; при  $N \lesssim 481$  – доцільніше застосовувати технологію FDM друку.

Найважливіші фактори: продуктивність принтерів (шт/год), ціна філаменту, вартість форми, електроенергія та пост обробка. Наприклад, якщо підвищити продуктивність FDM (паралельні принтери або швидший процес), FDM вигідніший при більших тиражах. Якщо вартість філаменту знизиться або

час друку падатиме – точка беззбитковості зросте, лиття потребуватиме ще більшого тиражу, щоб окупитися.

### **Висновки до розділу.**

Виконані розрахунки підтвердили економічну ефективність використання матеріалів для виготовлення деталей сільськогосподарської за технологією FDM друку. Встановлено, що точка беззбитковості, в обраних умовах, при застосуванні лиття під тиском та технології 3D друку становить 482 одиниці деталей. Отже при  $N \geq 482$  лиття стає дешевшим за FDM друк; при  $N \leq 481$  – доцільніше застосовувати технологію FDM друку. При вказаній кількості деталей їх собівартість буде становити 84,42 грн/шт. Для підвищення продуктивності технологій 3D друку можна застосовувати або декілька паралельно працюючих принтери або купувати 3D принтери, що здатні забезпечити вищу швидкість друку.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконаний огляд конструкцій сільськогосподарських машин для обробітку ґрунту, сівби та обприскування. Встановлено, що закордонні та вітчизняні машинобудівні заводи поступово впроваджують елементи з композитів. Застосування деталей з полімерних та ПКМ матеріалів забезпечує такі переваги: зниження маси машин на 20–40%, збільшення довговічності на 1,5–2 рази, економію пального до 10%, кращої стійкості до агресивних середовищ. У майбутньому очікується розширення використання вуглецевих і базальтових композитів, що виробляються в Україні, для зниження собівартості та підвищення локалізації технологій. Використання композитних матеріалів у сільськогосподарській техніці це важливий крок до підвищення енергоефективності, зниження витрат на обслуговування та подовження строку служби машин. З огляду на світові тенденції, можна прогнозувати, що протягом найближчих 10...15 років композити поступово витіснятимуть традиційні метали у більшості другорядних і навіть частині несучих елементів. При цьому, встановлено, що технології переробки вихідних ПКМ у готові вироби суттєво відрізняються, як по складності, так і собівартості деталей.

1. Наведено особливості підготовки обладнання та застосування програмного забезпечення для виготовлення експериментальних зразків з обраних полімерних матеріалів. Розглянуто методика та обладнання для дослідження характеристик обраних матеріалів.

2. Встановлено, що найбільше значення границі текучості (умовної) серед досліджуваних матеріалів має матеріал Nylon CCF – 62,73 МПа. Матеріали ABS/PC та CoPET мають значно меншу границю текучості 46,38 МПа та 56,17 МПа відповідно. Найбільшу величину напруження при розриві зафіксовано також для матеріалу Nylon CCF – 66,16 МПа, для інших досліджуваних матеріалів це параметр значно менший, для ABS/PC та CoPET відповідно становить 41,34 МПа та 32,21 МПа. Таким чином, серед досліджуваних матеріалів найбільш стійким до розтягу є Nylon CCF, який при досягненні

умовної границі текучості продовжує чинити опір прикладеному зусиллю та одразу не деформується. Тому, можна рекомендувати всі досліджувані матеріали тільки для тих деталей, режими яких не мають навіть у граничному режимі роботи перевищення одержаних значення границь їх текучості – 35,21 МПа. У випадку значно більшого тиску на спряження рекомендовано використовувати композитний матеріал Nylon CCF. Одержані результати свідчать, що найбільше значення границі текучості при стиску серед досліджуваних матеріалів має ABS/PC – 56,3 МПа, дещо нижче значення має CoPET – 52,07 МПа. Для матеріалу Nylon-CCF зафіксовано найменше значення границі текучості при стиску – 45,96 МПа. Результати щодо визначення модуля пружності вказаних матеріалів мають аналогічну тенденцію, для матеріалів ABS/PC та CoPET він становить 1499,36 МПа та 1447,47 МПа.

Рекомендації щодо використання досліджуваних матеріалів:

- Якщо питомий тиск, без обертального чи коливального руху, що діє на деталі не перевищує 30 МПа, можна використовувати будь який серед досліджуваних матеріалів – міцність буде забезпечена.
- Для деталей сільськогосподарської техніки, що працюють за тиску до 40 МПа рекомендовано застосовувати матеріал ABS/PC, у випадку перевищення вказаної величини в межах до 60 МПа рекомендовано використовувати композитний матеріал Nylon-CCF.
- Для деталей трибоспрямижень, що працюють за фактору  $p \cdot v$  до 0,4 МПа·м/с рекомендовано застосовувати матеріал Nylon-CCF, який має найменшу величину зносу (найбільший ресурс) та низьку температуру в зоні тертя за даних режимів роботи – до 42 °С.

3. Наведено основні вимоги при роботі FDM принтерами, розглянути вимоги при підготовці обладнання, під час його використання та у випадку надзвичайної ситуації.

4. Виконані розрахунки підтвердили економічну ефективність використання матеріалів для виготовлення деталей сільськогосподарської за технологією FDM друку. Встановлено, що точка беззбитковості, в обраних

умовах, при застосуванні лиття під тиском та технології 3D друку становить 482 одиниці деталей. Отже при  $N \geq 482$  лиття стає дешевшим за FDM друк; при  $N \lesssim 481$  – доцільніше застосовувати технологію FDM друку. При вказаній кількості деталей їх собівартість буде становити 84,42 грн/шт. Для підвищення продуктивності технологій 3D друку можна застосовувати або декілька паралельно працюючих принтери або купувати 3D принтери, що здатні забезпечити вищу швидкість друку.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hatzenbichler Disko – дисковая борона.  
<https://iag.ag/ru/product/borony/hatzenbichler-disko-diskovaya-borona>
2. Луцильник дисковий ЛДД-2500.  
<https://asam.com.ua/products/luschilnik-diskovij-ldd-2500>
3. Плуг ПЛН-3-35 з композитними відвалами з високою стійкою.  
[https://dudkoua.com/ua/plug-pln-3-35-s-kompozitnymi-otvalami-c-vysokoi-stoikoi?srsltid=AfmBOoq\\_1hrpGrgE9aYe6u5XoxbA-sAVmBgSCiHHIrzO9kGCCzHmP](https://dudkoua.com/ua/plug-pln-3-35-s-kompozitnymi-otvalami-c-vysokoi-stoikoi?srsltid=AfmBOoq_1hrpGrgE9aYe6u5XoxbA-sAVmBgSCiHHIrzO9kGCCzHmP)
4. Відвал Текрон ПОН (Плуг виробництва Велес-Агро).  
<https://astartat.com.ua/ua/komplektuyushchie/plastikovye-otvaly/tekrone-pon-veles-agro>
5. Відвали для плугів. <https://iqcomposite.com/product-category/vidvaly-dlya-plugiv>
6. Деркач О.Д., Кабат О.С., Макаренко Д.О., Харченко Б.Г. Обґрунтування полімерних матеріалів для використання у конструкціях плугів. Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки». – Кропивницький. – 2020. Вип. 3 (34). – С. 102-107
7. Upgrading of machines for surface tillage (for cultivators) / O.D. Derkach, D.O. Makarenko, Yu.O. Litvintseva, V.D. Derkach // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. Дніпро: ИГТМ НАНУ. 2018. Вип. 138. С. 260-270.
8. Форсунка на обприскувач потрійна (трьох-позиційна) шлангова Польська Viardzki. <https://greenagro.in.ua/ua>.
9. Форсунка шлангова з відсікаючим пристроєм 100-08/P  
<https://greenagro.in.ua/ua/p1009535354-forsunka-opryskivatel-polskaya.html?source>
10. Деркач О.Д., Макаренко Д.О., Муранов Є.С., Лободенко А.В. Підвищення довговічності рухомих з'єднань посівних машин впровадженням прогресивних конструкційних матеріалів. Науковий вісник Таврійського

державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного [Електронний ресурс]. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2.

11. Макаренко Д. О. Підвищення довговічності паралелограмного механізму посівних комплексів зміною конструкції рухомих з'єднань: Дис.. канд. техн. наук: 05.05.11. Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький. 2018. 185 с.

12. Шидловський М.С., Бабенко А.Є., Боронко О.О., Заховайко О.П., Трубачев С.І. Нові матеріали: частина 2 – Експериментальні методи досліджень механічних властивостей конструкційних полімерів та пластмас. [Текст]: Навчальний посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» спеціалізації «Динаміка і міцність машин». К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 265 с.

13. Кобець А.С., Деркач О.Д., Чегвінцева О.П., Кабат О.С., Рула І.В., Дудін В.Ю., Макаренко Д.О., Бойко Ю.В. Застосування полімерних композитів в АПК. Монографія. Дніпро: Журфонд, 2022. 356 с.

14. Макарчук К.М. Обґрунтування складу конструкційних пластиків для рухомих деталей сільськогосподарської техніки. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ. Дніпро. 2024. 65 с.

15. 3D друк і безпека: ризики та заходи безпеки.  
<https://easy3dprint.com.ua/uk/3d-druk-i-bezpeka>

16. Інструкція з охорони праці при роботі на 3D принтері. ДНП «Державний університет «Київський авіаційний інститут». КАІ ІОП 1.21 (01)-01-2025. 10 с.

# ДОДАТКИ

Додаток А – Демонстраційний матеріал до дипломної роботи

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерно-технологічний факультет**  
Кафедра експлуатації машинно-тракторного парку

**Обґрунтування застосування матеріалів для 3D друку в  
конструкціях сільськогосподарської техніки**

Демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МГАІ-4-24

Кривьоншев Олексій Олександрович

**Керівник:** к.т.н., доцент

Макаренко Дмитро Олександрович

ДНІПРО 2025

## Продовження додатку А



Рис. 1 – Плуг ПЛН-3-35 з композитними відвалами виробництва ВО «ФОР Дудко» [3]



Рис. 2 – Плуг із відвалами з полімерних матеріалів виробництва каф. ЕМТП ДДАЕУ [6]



Рис. 3 – відвал із композитного матеріалу для плуга Lemken



Рис. 4 – Відвал із композитного матеріалу на корпусі плуга виробництва Велес-Агро [4]

## Продовження додатку А



Рис. 5 – Деякі деталі (елементи) конструкції посівних машин, які виготовляються з композитних матеріалів – неметалів: а – котушки дозуючих (висівних) апаратів; б – бункери для насіння; в – розподільні грибки для насіння та добрив



Рис. 6 – Форсунка штангова Viardzki та її елементи



Рис. 7 – Деталі з композитних матеріалів для трибоспряжень посівних та ґрунтообробних машин виготовлені в ДДАЕУ

Продовження додатку А

**Метою дипломної роботи** є обґрунтування доцільності виготовлення деталей для трибоспряжень сільськогосподарської техніки за технологією 3D-друку.

**Для досягнення поставленої мети в роботі виконували такі завдання:**

1. Проаналізувати конструкції сільськогосподарських машин та стан використання композитних матеріалів неметалевого походження в них.
2. Навести обладнання, методики та програму досліджень.
3. Виконати аналіз результатів випробувань обраних матеріалів щодо міцнісних характеристик при дослідженні на розтяг-стик та терті в середовищі без мащення. Навести рекомендації щодо застосування досліджуваних матеріалів в конструкціях сільськогосподарської техніки.
4. Навести основні вимоги при роботі з FDM принтерами, розглянути вимоги при підготовці обладнання та під час його використання.
5. Виконати економічну оцінку використання рекомендованих матеріалів

Продовження додатку А

**Обладнання для підготовки вихідних матеріалів, виготовлення експериментальних зразків та визначення деяких їх параметрів**



Рис. 8 – Термошафа СНОЛ 58/350



Рис. 9 – 3D принтер Bambu Lab P1S



Рис. 10 – Прецизійний мультиметр UNI-T UT8804E



Рис. 11 – Логер температури EL-USB-TC

Продовження додатку А

### Обладнання для проведення досліджень



Рис. 12 – Випробувальна машина FP-100



Рис. 13 – Машина для випробування матеріалів на тертя та знос СМЦ-2



Рис. 14 – Аналітичні терези METRINCO AB224

Продовження додатку А

### Результати досліджень



Рис. 15 – Тестові зразки для оптимізації температури екструдера 3D принтера при використанні: а – ABS/PC; б – Nylon-CCF

## Результати досліджень

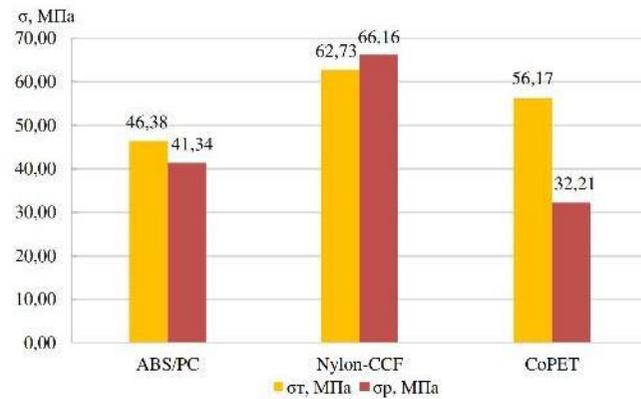


Рис. 16 – Результати визначення величини границі текучості за розтягу  $\sigma_T$  (МПа) та міцності при розриві  $\sigma$  (МПа)

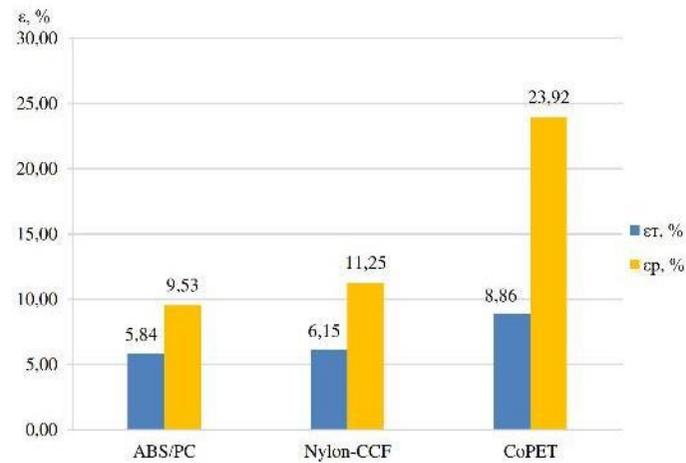


Рис. 17 – Результати визначення величини відносного видовження при границі текучості  $\epsilon_T$  (%) та при розриві  $\epsilon_p$  (%)

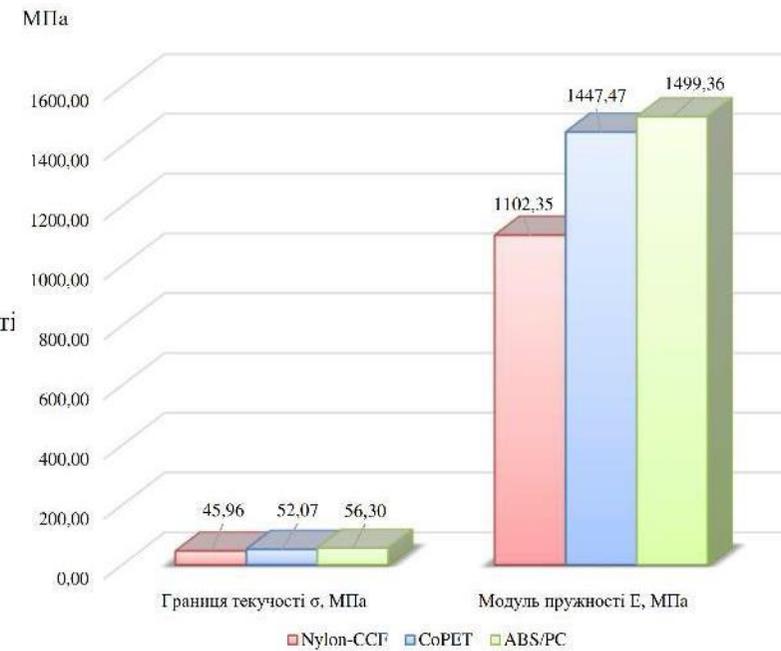


Рис. 18 – Результати дослідження матеріалів на стиск

Продовження додатку А

## Результати досліджень

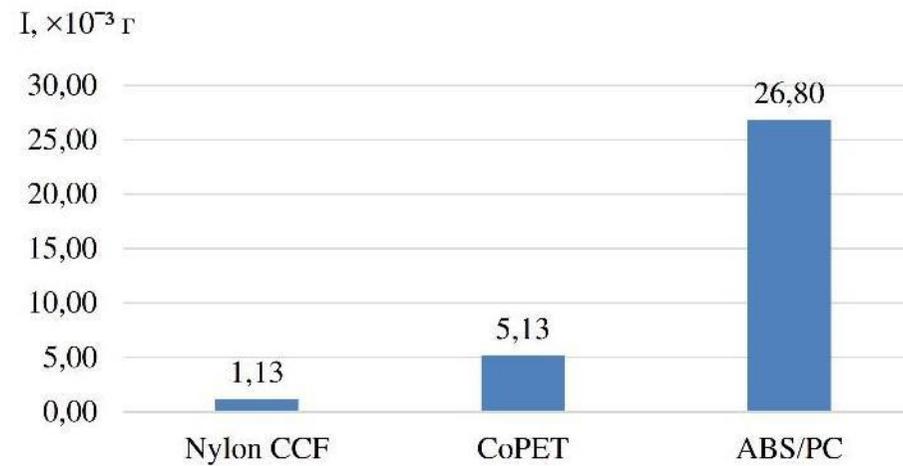


Рис. 19 – Величина зносу досліджуваних зразків у розрахунку на шлях тертя 1000 м (режим тертя:  $p = 0,5$  МПа,  $v = 0,785$  м/с, фактор  $pv \approx 0,4$ )

Табл. 1 – Режими роботи деяких трибоспряжень (за науковими роботами співробітників та здобувачів кафедри ЕМТП ДДАЕУ)

| Назва с.-г. машини                          | Навантаження (максимальне), що діє на трибоспряження механізмів копіювання, Н | Максимальна лінійна швидкість ковзання, м/с | Фактор $pv$ , МПа·м/с |
|---|---|---|-----------------------|
| Посівний комплекс Turboserп II 19-48        | 2400  | 0,107                                       | 0,32                  |
| Сівалка Gaspardo MT-8                       | 2087  | 0,095                                       | 0,16                  |
| Культиватор КСП-8МП                         | 910   | 0,087                                       | 0,10                  |
| Культиватор John Deere 2110                 | 700   | 0,102                                       | 0,11                  |
| Вічка шнека жатки комбайна КЗС-9 «Славутич» | 460   | 0,64  | 0,16                  |

Продовження додатку А

### Техніко-економічні показники роботи

| Показник                                 | FDM-друк | Лиття під тиском |
|--|----------|------------------|
| Маса деталі, г                           | 25       | 25               |
| Вартість матеріалу, грн/кг               | 2000     | 2500             |
| Вартість обладнання, грн                 | 30000    | 165000           |
| Ресурс обладнання, год                   | 5000     | 20000            |
| Амортизація обладнання, грн/год          | 6,00     | 8,25             |
| Електроенергія + обслуговування, грн/год | 20       | 150              |
| Продуктивність, шт/год                   | 3        | 60               |
| Пакування деталей, грн/шт.               | 2        | 1                |
| Вартість прес-форми, грн                 | -        | 10000            |
| Точка безбитковості, деталей             | 482      |                  |

## Висновки та рекомендації

- Виконаний огляд конструкції сільськогосподарських машин для обробітку ґрунту, сівби та обирискування. Встановлено, що закордонні та вітчизняні машинобудівні заводи поступово впроваджують елементи з композитів. Застосування деталей з полімерних та ПКМ матеріалів забезпечує такі переваги: зниження маси машин на 20–40%, збільшення довговічності на 1,5–2 рази, економію пального до 10%, кращої стійкості до агресивних середовищ. У майбутньому очікується розширення використання вуглецевих і базальтових композитів, що виробляються в Україні, для зниження собівартості та підвищення локалізації технологій. Використання композитних матеріалів у сільськогосподарській техніці це важливий крок до підвищення енергоефективності, зниження витрат на обслуговування та подовження строку служби машин. З огляду на світові тенденції, можна прогнозувати, що протягом найближчих 10...15 років композити поступово витіснятимуть традиційні метали у більшості другорядних і навіть частині несучих елементів. При цьому, встановлено, що технології переробки вихідних ПКМ у готові вироби суттєво відрізняються, як по складності, так і собівартості деталей.
- Наведено особливості підготовки обладнання та застосування програмного забезпечення для виготовлення експериментальних зразків з обраних полімерних матеріалів. Розглянуто методика та обладнання для дослідження характеристик обраних матеріалів.
- Встановлено, що найбільше значення границі текучості (умовної) серед досліджуваних матеріалів має матеріал Nylon CCF – 62,73 МПа. Матеріали ABS/PC та CoPET мають значно меншу границю текучості 46,38 МПа та 56,17 МПа відповідно. Найбільшу величину напруження при розриві зафіксовано також для матеріалу Nylon CCF – 66,16 МПа, для інших досліджуваних матеріалів це параметр значно менший, для ABS/PC та CoPET відповідно становить 41,34 МПа та 32,21 МПа. Таким чином, серед досліджуваних матеріалів найбільш стійким до розтягу є Nylon CCF, який при досягненні умовної границі текучості продовжує чинити опір прикладеному зусиллю та одразу не деформується. Тому, можна рекомендувати всі досліджувані матеріали тільки для тих деталей, режими яких не мають навіть у граничному режимі роботи перевищення одержаних значення границь їх текучості – 35,21 МПа. У випадку значно більшого тиску на спряження рекомендовано використовувати композитний матеріал Nylon CCF. Одержані результати свідчать, що найбільше значення границі текучості при стиску серед досліджуваних матеріалів має ABS/PC – 56,3 МПа, дещо нижче значення має CoPET – 52,07 МПа. Для матеріалу Nylon-CCF зафіксовано найменше значення границі текучості при стиску – 45,96 МПа. Результати щодо визначення модуля пружності вказаних матеріалів мають аналогічну тенденцію, для матеріалів ABS/PC та CoPET він становить 1499,36 МПа та 1447,47 МПа.
- Рекомендації щодо використання досліджуваних матеріалів:
  - Якщо питомий тиск, без обертального чи коливального руху, що діє на деталі не перевищує 30 МПа, можна використовувати будь який серед досліджуваних матеріалів – міцність буде забезпечена.
  - Для деталей сільськогосподарської техніки, що працюють за тиску до 40 МПа рекомендовано застосовувати матеріал ABS/PC, у випадку перевищення вказаної величини в межах до 60 МПа рекомендовано використовувати композитний матеріал Nylon-CCF.
  - Для деталей трибоспряжень, що працюють за фактору  $p_v$  до 0,4 МПа·м/с рекомендовано застосовувати матеріал Nylon-CCF, який має найменшу величину зносу (найбільший ресурс) та низьку температуру в зоні тертя за даних режимів роботи – до 42 °С.
- Наведено основні вимоги при роботі FDM принтерами, розглянути вимоги при підготовці обладнання, під час його використання та у випадку надзвичайної ситуації.
- Виконані розрахунки підтвердили економічну ефективність використання матеріалів для виготовлення деталей сільськогосподарської за технологією FDM друку. Встановлено, що точка беззбитковості, в обраних умовах, при застосуванні лиття під тиском та технології 3D друку становить 482 одиниці деталей. Отже при  $N \geq 482$  лиття стає дешевшим за FDM друк; при  $N \leq 481$  – доцільніше застосовувати технологію FDM друку. При вказаній кількості деталей їх собівартість буде становити 84,42 грн/шт. Для підвищення продуктивності технологій 3D друку можна застосовувати або декілька паралельно працюючих принтери або купувати 3D принтери, що здатні забезпечити вищу швидкість друку.