

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до дипломної роботи

освітнього ступеня "Магістр"

на тему:

**ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ ПОЛІМЕРНИХ
ДЕТАЛЕЙ**

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-1-24
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

_____ Сливка Дмитро Миколайович

Керівник: _____ Толстенко Олександр Васильович

Рецензент: _____

Дніпро 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра: Інженерингу технічних систем

Освітній ступінь: "Магістр"

Спеціальність: 208 "Агроінженерія"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

К.Т.Н. ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Дудіп В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціал)

„___” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сливка Дмитро Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Відновлення працездатності технічних засобів із застосуванням технологій 3D-друку полімерних деталей

керівник роботи к.т.н. доц., Толстенко О.В.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 24.10.2025 року
№ 3182

2. Строк подання студентом роботи до 1.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Види і методи 3D друку. Властивості пластиків для друку, характеристики принтерів для 3D друку. Показники стану охорони праці. Техніко-економічні показники роботи базового господарства

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз стану питання ремонту сільськогосподарської техніки з використанням полімерних деталей. 2. Теоретичне обґрунтування способу виготовлення запасних частин за допомогою 3D-друку з вакуумним просочуванням. 3. Програма та методики проведення експериментальних досліджень. 4. Безпека життєдіяльності та охорона праці при виконанні робіт із застосуванням 3D-принтера. 5. Оцінка економічної ефективності типового технологічного процесу виготовлення запасних частин за допомогою 3D-друку для сільськогосподарської техніки. Загальні висновки. Список літератури. Додатки

Листів, приміток		46ДР.092 000. 000 ВР							
		№ п/п	Формат	Позначення	Найменування	Кіл. аркушів	№ аркуша	Примітка	
Сторінок №		1			Текстові документи				
		2							
		3	A4	46ДР.092 0000. 000ПЗ	Пояснювальна записка	82			
		4							
		5			Демонстраційні матеріали				
Підп. і дата					Слайди у форматі Microsoft PowerPoint	13			
Взам. інв. №		46ДР.092 000. 000 ВР							
Підп. і дата		Ізм.	Лист	№ док-м	Підп.	Дата			
		Розроб.		Сливки ДМ					
Інв. № папки		Прив.		Толстенко ОВ					
		І.контр.					Лист	Листів 1	
		ІІконтр.		Івльв В.В			М2А1-1-24		
		Члв.		Діядн В.Ю.					
						Копировав			
						Формат А4			

РЕФЕРАТ

У дипломній роботі розглянуто проблему оперативного відновлення працездатності технічних засобів сільськогосподарського виробництва шляхом виготовлення полімерних запасних частин за допомогою технологій 3D-друку. Проаналізовано недоліки традиційних методів виготовлення полімерних деталей, зокрема високу вартість оснащення, тривалі строки постачання та нерентабельність виготовлення одиничних виробів. Розглянуто практичні випадки виходу з ладу полімерних елементів техніки та доведено доцільність їх відтворення із застосуванням адитивних технологій.

Запропоновано технологічний підхід до виготовлення зміцнених полімерних деталей на основі 3D-друку з подальшим вакуумним просоченням композиційними матеріалами. Сформовано методику розрахунку максимально можливої товщини деталі, визначено технологічні параметри друку та фактори, що впливають на механічні властивості одержуваних виробів. Проведено експериментальні дослідження просочуваності 3D-друкованих каркасів і встановлено закономірності впливу геометрії друку та складу компаундів на міцнісні характеристики.

Отримані результати доводять ефективність застосування запропонованої технології для реновації техніки та забезпечення швидкої, економічно вигідної заміни полімерних деталей.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ РЕМОНТУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛІМЕРНИХ ДЕТАЛЕЙ.....	10
1.1. Аналіз відмов полімерних деталей сільськогосподарської техніки	10
1.2. Традиційні способи виготовлення запасних частин з полімерних і композиційних матеріалів.....	16
1.2.1. Лиття під тиском	17
1.2.2. Екструзія	19
1.2.3. Пресування.....	20
1.2.4. Вакуум- і пневмоформування	21
1.2.5. Вільне лиття.....	22
1.3. Аналіз випадків застосування 3Д-друку для виготовлення запасних частин різних машин	24
1.4. Висновки за розділом 1. Мета і завдання дослідження.....	28
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАПАСНИХ ЧАСТИН ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-ДРУКУ З ВАКУУМНИМ ПРОСОЧУВАННЯМ	31
2.1 Обґрунтування вибору матеріалів і технологічних параметрів виготовлення 3D-друкованих каркасів	31
2.1.1 Огляд матеріалів, що застосовуються при 3D-друку за технологією FDM.....	31
2.1.2 Аналіз технологічних факторів 3D-друку за технологією FDM.....	33
2.2 Аналіз моделі розрахунку механічних властивостей композиційних матеріалів.....	39

2.3 Висновки за розділом.....	40
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	42
3.1 Розробка програми та методики досліджень просочуваності 3D-друкованих каркасів залежно від геометрії каркаса.....	42
3.2 Програма досліджень механічних властивостей композитів.....	45
3.3 Методики випробувань	46
3.3.1 Визначення пористості з використанням методу гідростатичного зважування.....	46
3.3.2 Методика випробувань на розтяг	47
3.3.3 Методика фрактографічного дослідження.....	49
3.4 Результати дослідження механічних властивостей композитів з каркасами різної геометрії	50
3.4.1 Результати випробувань на розтяг	50
3.4.2 Висновки за результатами дослідження механічних властивостей композитів залежно від геометрії каркаса	54
3.5 Результати дослідження залежності механічних властивостей композитів від складу просочувального компаунда та режиму затвердіння	55
3.5.1 Результати випробувань на розтягнення.....	55
3.6 Результати фактографічного дослідження композитів	59
3.7. Висновки за розділом.....	61
РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ВИКОНАННІ РОБІТ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ 3D-ПРИНТЕРА	63
4.1 Загальні вимоги безпеки та охорони праці на підприємствах	63
4.2. Вимоги безпеки при проведенні друку на 3D-принтері.....	64
4.3. Шкідливі та небезпечні фактори при роботі з 3D-принтером	65
4.4. Висновки.....	68

РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТИПОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАПАСНИХ ЧАСТИН ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-ДРУКУ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ...	70
5.1. Розрахунок для випадку заміни пальця мотовила зернозбирального комбайна John Deere.....	70
5.2. Висновки за розділом	74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	75
ЛІТЕРАТУРА	77
ДОДАТКИ	81

ВСТУП

У конструкціях сучасних сільськогосподарських машин все більше застосування знаходять деталі, виготовлені з полімерних матеріалів. Одночасно з поширенням полімерних деталей виникає проблема їх швидкої заміни в разі виходу з ладу. Як показує практика, часто для виробників і дилерів техніки виявляється нерентабельним виготовлення і продаж запасних частин з полімерів. Замість них пропонується придбати цілий вузол, який на порядок дорожчий за зламану полімерну деталь. Проблемою є також і великі терміни поставки окремих деталей або вузлів в силу специфіки роботи існуючих ланцюжків поставок запасних частин. Таким чином, терміни ремонту значно збільшуються, що згубно позначається на прибутковості підприємств агропромислового комплексу в силу крайньої обмеженості часу виконання більшості агротехнічних робіт.

Альтернативою закупівлі запасних полімерних деталей є їх самостійне виготовлення з використанням адитивних технологій [1, 2]. Адитивне виробництво не вимагає використання спеціального обладнання, його легко переналаштувати, і при цьому весь цикл виготовлення нової деталі замість тієї, що вийшла з ладу, займе один-два робочих дні. Однак на сьогоднішній день технології 3D-друку не знайшли широкого застосування для виготовлення деталей машин, що працюють під навантаженнями і експлуатуються в реальних конструкціях, і основною нішею їх застосування залишається прототипування. Сферу використання адитивних технологій можливо розширити застосуванням нових технологічних підходів до 3D-друку, що передбачають використання нових технологічних схем отримання деталей з використанням ВD-друку, що дозволяють зміцнити надруковану з полімерів деталь і використовувати згодом в експлуатованій техніці.

Систематизація та критичний аналіз матеріалів за тематикою дослідження проведені на основі вивчення праць Ізмайлова А.Ю., Лобачевського Я.П., Черноіванова В.І., Федоренка В.Ф., Дорохова А.С., Соловійова С.А., Голубєва

І.Г., Лялякіна В.П., Денисова В.А., Котіна А.В., Сівцова В.М., Малишевої Г.В., Нелюба В.А., Бородуліна А.С. та інших дослідників.

Аналіз показав, що застосування 3D-друку для виготовлення запасних частин сільськогосподарської техніки є перспективним напрямком, що дозволяє значно скоротити витрати на ремонт. Також за результатами аналізу було виявлено, що застосування при ремонті полімерних композиційних матеріалів дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики ремонтованих деталей і вузлів. Однак єдиного підходу, що дозволяє застосовувати при ремонті 3D-друк і композиційні матеріали, запропоновано не було.

Об'єкт досліджень - технологічний процес виготовлення запасних частин з полімерних композиційних матеріалів за допомогою 3D-друку з вакуумним просоченням для сільськогосподарської техніки.

Предмет досліджень - закономірності впливу параметрів 3D-друку і просочення, а також складу вихідних компонентів на механічні властивості запасних частин, що виготовляються за допомогою 3D-друку з вакуумним просоченням.

Апробація роботи. Сливка Д.М. (2025). Застосування технологій 3D-друку для виготовлення деталей транспортної та сільськогосподарської техніки. *Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу»* (21 листопада 2025 року), ДДАЕУ, Дніпро, (с. 56–59).

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ РЕМОНТУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛІМЕРНИХ ДЕТАЛЕЙ

1.1. Аналіз відмов полімерних деталей сільськогосподарської техніки

У конструкціях сучасної сільськогосподарської техніки все більше застосування знаходять деталі, виготовлені з полімерних матеріалів [1-11]. У порівнянні з металами полімери мають ряд переваг, таких як висока хімічна стійкість, низька щільність у поєднанні з досить високою для багатьох застосувань міцністю, простота переробки у вироби та доступність [12-18]. У багатьох випадках застосування полімерів є єдино можливим з точки зору умов роботи деталі або особливостей конструкції. Одночасно з поширенням полімерних деталей в конструкціях машин виникає проблема їх швидкої заміни в разі виходу з ладу.

У поточній роботі аналіз випадків відмов полімерних деталей сільськогосподарської техніки проводиться на основі даних, отриманих від підприємства ТОВ Доброулянівка Кіровоградської області за 2024 рік. Також була зібрана зведена інформація щодо полімерних деталей сільськогосподарської техніки, що виходять з ладу на різних підприємствах, від постачальників запасних частин сільськогосподарської техніки.

ТОВ «Доброулянівка» спеціалізується на вирощуванні зернових культур. Загальна площа ріллі становить 11750 га. Основний ухил підприємство має на вирощуванні кукурудзи. Частина оброблюваних площ має зрошувальну систему, обладнану водоочисними фільтрами і водомірами турбінного типу (рис. 1.1). Полімерні деталі, що виходили з ладу на даному підприємстві в 2024 році, представлені на рис. 1.2, а їх характеристики та особливості умов роботи в таблиці 1.1. Всі зазначені деталі окремо не продаються і доводиться замінювати весь вузол. Новий картридж очищення і водомірами коштують 5600 і 6000 грн. відповідно. Новий розпилювач коштує 150 грн./од., при цьому кількість розпилювачів, що використовуються господарством, дуже висока (на одній

штанзі може розташовуватися до 20 розпилювачів). Сумарні витрати на заміну всіх розпилювачів складають велику статтю витрат.



Рисунок 1.1 - Частина зрошувальної системи ТОВ Доброулянівка



а - деталь промислового водоочисного фільтра мембранного типу; б - корпус турбінного водоміра; в - крильчатка турбінного водоміра; г - черв'ячна пара турбінного водоміра; д - корпус розпилювачів самохідних обприскувачів

Рисунок 1.2 – Деталі виготовлені з полімерного матеріалу

Таблиця 1.1 - Відомості про відмови полімерних деталей в ТОВ Доброулянівка у 2024 році

№ за п/п	Найменування	Габаритні розміри, мм	Умови роботи деталей	Матеріал	Інформація щодо вартості та умов придбання
1	Деталь промислового водоочисного фільтра мембранного типу	120 x 180	Очищення води від зважених частинок розміром понад 80 мкм	Поліетилен або нейлон	Деталь окремо не продається, картридж в зборі з даною деталлю 5600 грн.
2	Корпус турбінного водоміра	100 x 110 x 110	Контакт з гарячою проточною водою, інтенсивний знос, гідроудари	АБС, зміцнений короткими волокнами	Деталі окремо не продаються, новий лічильник 6000 грн.
3	Крильчатка турбінного водоміра	80 x 80	Контакт з гарячою проточною водою, інтенсивний знос	Ударостійкий полістирол або поліпропілен	
4	Черв'ячна пара турбінного водоміра	40 x 50; 12 x 12	Контакт з гарячою проточною водою, інтенсивний знос	Нейлон	
5	Корпус розпилювачів самохідних обприскувачів	15 x 10	Малі статичні навантаження, поломки відбуваються в результаті чищення	Поліпропілен	Деталь окремо не продається, розпилювач в зборі 150 грн.

З ладу вийшла шестерня в результаті зносу (рисунок 1.4а). Окремо дана деталь не продається, новий сервопривід коштує 17000 грн. Також з ладу

виходили сальники гідроциліндрів трактора К-700 (малюнок 1.4б), придбати які окремо не вдалося. У таблиці 1.2 представлені характеристики та особливості умов роботи зазначених деталей.

ТОВ МВК Катеринославський є одним з виробників молока в Дніпропетровській області з поголів'ям худоби понад 4500 голів. Також підприємство займається вирощуванням і переробкою зернових культур. Загальна площа ріллі становить близько 10000 га. У сівозміну включені кукурудза, льон, ріпак. Минулого року підприємство зіткнулося з виходом з ладу сервоприводу на зернотоці під час сушіння зерна (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 - Сервопривід зернотока



а –



б -

шестерня сервоприводу зернотока; сальник гідроциліндра трактора К-700

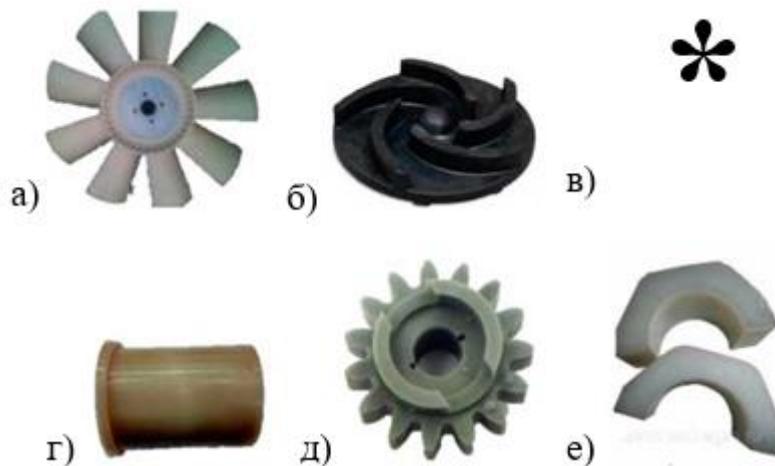
Рисунок 1.4 - Полімерні деталі, що виходили з ладу через знос або поломку

Таблиця 1.2 - Відомості про відмови полімерних деталей

№ за п/п	Найменування	Габаритні розміри, мм	Умови роботи деталей	Матеріал	Інформація щодо вартості та умов придбання
1	Шестерня сервоприводу	50 x 5	Згинальні циклічні	Поліетилен або нейлон	Деталь окремо не

	зернотока		навантаження, знос		продається, сервопривід з даною деталлю в зборі 17 000 грн.
2	Сальник гідроциліндра трактора К-700	80 x 10	Робота в контакті з маслом під тиском 16 МПа в умовах тертя	Гума маслостійка або поліуретан	Деталь окремо не продається, новий гідроциліндр 8000 грн.

У таблиці 1.3 представлена зведена інформація по різних підприємствах, що включає в себе інформацію по поставках необхідних запчастин на підприємства сільськогосподарської спрямованості за даними дилерів. Описані в таблиці деталі представлені на рис. 1.5.



а - вентилятор охолодження двигуна трактора МТЗ; б - робоче колесо відцентрового насоса; в - опора пальців шнека жатки John Deere; г - втулка поводка ексцентрика мотовила; д - шестерня приводу магнето пускового двигуна ПД-10 трактора МТЗ; е - напівпідшипник променя мотовила

Рисунок 1.5. Полімерні деталі, що вийшли з ладу через знос або поломку в 2024 році за даними дилерів запасних частин

Таблиця 1.3 - Відомості про відмови полімерних деталей за 2024 рік за даними дилерів запасних частин

№ за п/п	Найменування	Габаритні розміри, мм	Умови роботи деталей	Матеріал	Інформація щодо вартості та умов придбання
1	Вентилятор охолодження двигуна трактора МТЗ	500x120	Динамічні навантаження	Поліпропілен	350 грн., постачання тільки оптом
2	Робоче колесо відцентрового насоса	250 x 50	Контакт з робочими рідинами, абразивний знос	Поліуретан	400 грн./од., партія від 10 од., термін постачання від 14 днів
3	Опора пальців шнека жатки John Deere	150 x 50 x 70	Робота в умовах інтенсивного зносу	Поліамід	330 грн., термін постачання 12-18 днів
4	Втулка повідця ексцентрика мотовила	30 x 60	Робота в умовах інтенсивного зносу	Поліамід	35 грн., постачання тільки оптом
5	Шестерня приводу магнето пускового двигуна ПД-10 трактора МТЗ	60 x 30	Згинальні циклічні навантаження, знос	Поліамід	76 грн., постачання тільки оптом
6	Напівпідшипник променя мотовила Кейс	100 x 40 x 10	Робота в умовах інтенсивного зносу	Поліамід	25 грн., постачання тільки оптом

Представлені в таблиці 1.3 деталі можуть бути придбані окремо на відміну від розглянутих раніше прикладів, однак з огляду на їхню низьку вартість і рідкісні відмови дилерам виявляється нерентабельно поставляти їх в одиничному екземплярі. У разі виходу даних деталей з ладу сільгоспвиробнику часто доводиться переплачувати за партію деталей або відмовлятися від покупки на користь придбання нового вузла, оскільки його вартість виявляється

порівнянню з вартістю придбання запчастин. Нерідкі також випадки, коли поставку запасних деталей доводиться чекати довгий час, оскільки дилеру зберігати дані деталі на складі також нерентабельно, і сільгоспвиробник змушений робити вибір між втратами від простою техніки і втратами від придбання нового вузла. Найчастіше сільгосппідприємства роблять вибір на користь другого варіанту, оскільки період виконання тих чи інших агротехнічних операцій обмежений у часі і втрати від простою техніки будуть незрівнянно більшими.

Таким чином, номенклатура полімерних деталей сільськогосподарських машин, що виходять з ладу, досить різноманітна, і випадки їх відмов становлять до 5% від загальної кількості відмов деталей сільськогосподарських машин [19]. Заміна даних деталей в ряді випадків неможлива через їх відсутність у продажу, а в ряді випадків виявляється нерентабельною через тривалі терміни поставки або велику мінімальну партію замовлення. У зв'язку з цим сільгоспвиробники зазнають збитків, переплачуючи за цілий вузол замість заміни однієї деталі, а також через тривалий простій техніки в процесі ремонту і пов'язані з ними втрати сільськогосподарської продукції.

1.2. Традиційні способи виготовлення запасних частин з полімерних і композиційних матеріалів

Вироби з полімерів, що входять до конструкції сільськогосподарської техніки, мають різні форми і розміри. Різноманітність форм деталей, а також полімерів, що використовуються для їх виготовлення, визначає широкий спектр технологій виготовлення даних деталей. Вибір того чи іншого методу виготовлення також багато в чому залежить від обсягу партії вироблених виробів. Наприклад, якщо для виробництва дрібних деталей з термопластів масовими тиражами найбільш продуктивним і рентабельним є лиття під тиском, то для великих масивних виробів - гаряче пресування або контактне формування (таблиця 1.4) [5].

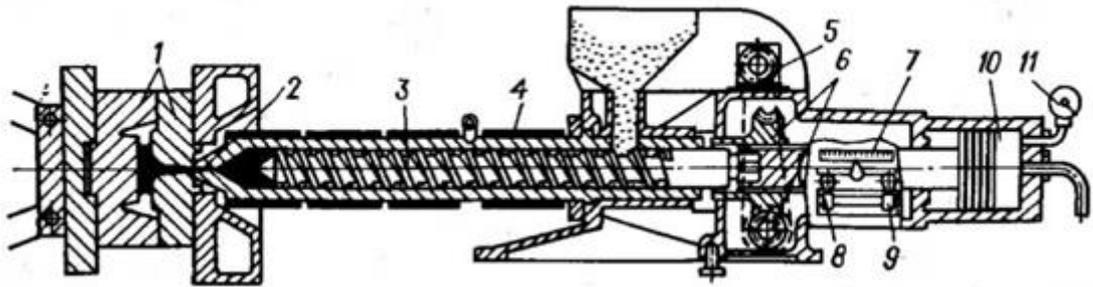
Таблиця 1.4 - Залежність економічно ефективного обсягу виробництва виробів з пластмас від способу переробки

Спосіб переробки	Обсяг виробництва, шт.
Механічна обробка	1-100
Термоформування	100-1000
Вільне лиття	500-1000
Ротаційне формування	500-1000
Пресування	1000-2000
Екструзія	1000-3000
Екструзія з роздуванням	3000-10000
Лиття під тиском	10000-100000

Для виробництва одного і того ж полімерного виробу часто можна застосувати різні способи виробництва, і вибір оптимального методу проводиться на основі всебічної техніко-економічної оцінки. Економічна оцінка доцільності вибору того чи іншого методу виробництва полімерних виробів багато в чому базується на оцінці вартості виготовлення оснащення для даного методу, оскільки вартість оснащення закладається у вартість кожного виробу, випущеного з її допомогою. Таким чином, якщо метод виробництва вимагає дорогого оснащення, то він є рентабельним лише в тому випадку, якщо випускається партія полімерних виробів є досить великою.

1.2.1. Лиття під тиском

Одним з найбільш високопродуктивних процесів виготовлення виробів з полімерів є лиття під тиском. У процесі лиття під тиском (рис. 1.6) гранули полімеру пластифікуються при обертанні черв'яка в нагрівальному (інжекційному) циліндрі ливарної машини [5]. Машини, на яких проводять лиття під тиском, називаються термопластавтоматами (рис. 1.7).



1 - форма; 2 - сопло; 3 - черв'як; 4 - електронагрівач; 5 - гідродвигун; 6 - черв'ячний редуктор; 7 - шкала регулювання вприскування; 8,9 - кінцеві вимикачі ходу черв'яка; 10 - гідроциліндр; 11 – манометр

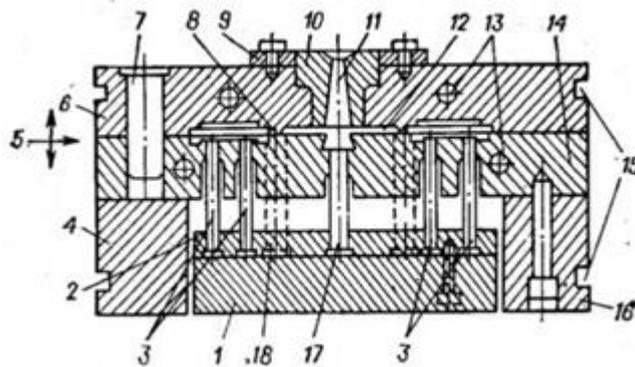
Рисунок 1.6 - Схема машини для лиття під тиском [5]



Рисунок 1.7 - Зовнішній вигляд ливарної машини (термопластавтомат)

Виріб у разі використання ливарних машин формується в спеціальних прес-формах (рис. 1.8). Їх конструкція досить складна, оскільки вони містять складні ливарні канали, іноді з підігрівом, а також канали охолодження. До того ж у процесі лиття використовуються досить великі тиски, в результаті чого для виготовлення форм придатні тільки метали, найчастіше сталі. Всі перераховані вище фактори обумовлюють високу вартість і трудомісткість виготовлення даних прес-форм, в результаті чого їх вартість починається від 250 тис. грн. Висока вартість форм призводить до того, що використання лиття під тиском рентабельно лише в разі серійного масового виробництва.

Перевагою даної технології є можливість виготовляти вироби будь-якої геометричної форми, а також у широкому діапазоні мас від часток грама до декількох кілограмів.



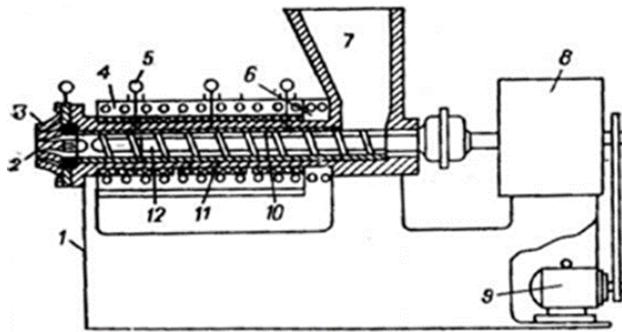
1,2-нижня і верхня з'єднувальні планки системи штовхання; 3-виштовхувачі; 4,16-підкладки; 5-площина роз'єму; 6-матриця форми; 7-направляюча колонка; 8-впуск; 9-направляюче кільце; 10-литникова втулка; 11-ливарний канал; 12-розвідний канал; 13-канал для охолодження; 14-пуансон; 15-пази для кріплення; 17-центральный виштовхувач (виштовхувач ливника); 18-штифт для зворотної посадки виштовхувача

Рисунок 1.8 - Ливарна форма звичайного типу

1.2.2. Екструзія

Екструзією називається безперервне видавлювання матеріалу через форму, що має канал певного перетину [5]. Схема пристрою екструдера представлена на рис. 1.9.

При екструзії гранули полімеру надходять в нагрівальний циліндр, всередині якого знаходиться робочий орган - черв'як. Нагрівальний циліндр і черв'як умовно поділяють на три зони: 1) завантажувальна, в якій відбувається ущільнення гранул, що надійшли; 2) зона стиснення, в якій матеріал поступово розплавляється і пластифікується за рахунок тепла, що підводиться від розташованих зовні циліндра нагрівачів і тепла внутрішнього тертя в матеріалі; 3) дозуюча, в якій весь гвинтовий канал черв'яка виявляється заповнений розплавом полімеру [5].



1 - станина; 2 - дорн; 3 - мундштук; 4 - система обігріву; 5 - термопара; 6 – система охолодження; 7 - завантажувальний бункер; 8 - редуктор; 9 - електродвигун; 10 – внутрішня гільза циліндра; 11 - нагрівальний циліндр; 12 - черв'як

Рисунок 1.9 - Спрощена схема одночерв'ячного екструдера

Екструзію широко використовують для виготовлення виробів простого незмінного перетину, наприклад, труб, листів, плівок тощо.

1.2.3. Пресування

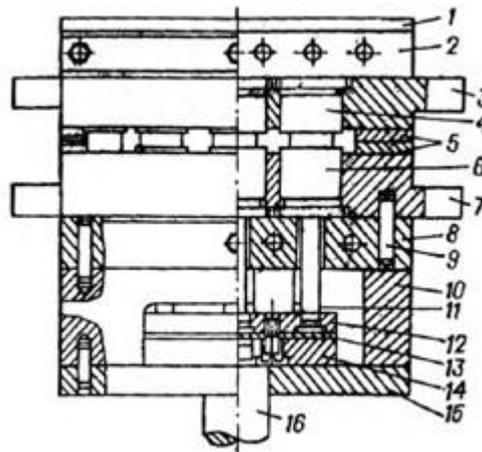
Суть технології пресування полягає в тому, що пресований матеріал у вигляді листа завантажується в прес-форму і під дією тепла і тиску приймає її конфігурацію (рисунок 1.10). Пресування зазвичай застосовується для переробки реактопластів, оскільки для термопластів більш рентабельними є методи екструзії, лиття під тиском, вакуумного та пневмоформування. Однак у деяких випадках, наприклад при отриманні масивних великогабаритних виробів, і термопласти переробляють пресуванням [5].



1 - попередньо нагріта заготовка; 2 - готовий виріб

Рисунок 1.10 - Схема створення деталей з полімерних матеріалів методом пресування до (а) і після (б) змикання форм

Конструкції прес-форм в даному випадку мають схожі ознаки з формами, що використовуються при литті під тиском (рис. 1.11). Дані форми виготовляють зі сталей, що витримують вплив високих температур і навантажень.



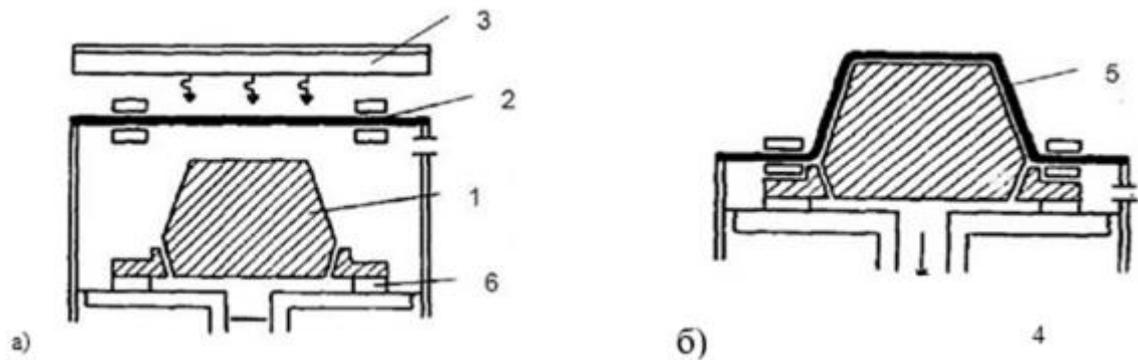
1 - верхня підкладка; 2 - верхня плита обігріву; 3 - обойма пуансонів; 4 - пуансон; 5 - опорні планки; 6 - матриця; 7 - обойма матриць; 8 - опорна плита (нижня плита обігріву); 9 - контрольний штифт; 10 - нижня підкладка; 11 - виштовхувач; 12 - верхня сполучна планка виштовхувачів; 13 - проміжна прокладка; 14 - нижня сполучна планка виштовхувачів; 15 - нижня плита; 16 – шпindelь

Рисунок 1.11 - Багатогніздова прес-форма

Пресування використовується при виробництві відносно тонкостінних виробів, площею не більше 2,5...3 м², з не дуже високими вимогами до якості зовнішньої поверхні [5].

1.2.4. Вакуум- і пневмоформування

На відміну від попереднього методу, при вакуум- і пневмоформуванні використовуються невеликі тиски в межах 1 атм. і спрощене оснащення (рис. 1.12). У цьому випадку заготовка у вигляді полімерного листа формується за рахунок створення вакууму в порожнині між заготовкою і формою (вакуумне формування) або тиску на заготовку стисненого повітря (пневмоформування) [5].



1 - пуансон; 2 - лист полімеру; 3 - нагрівач; 4 - повітровідвід; 5 - готова деталь;
 6 - притискна рама

Рисунок 1.12 - Схема початку (а) і закінчення (б) процесу створення деталей з термопластичних полімерів методом вакуумформування [20]

Вакуумне та пневмоформування застосовується тільки для виробів з однаковою товщиною по всьому перетину, таких як кришки, корпуси тощо. Даний метод, у порівнянні з попередніми, більш широко застосовується при дрібносерійному виробництві, оскільки використовуване технологічне оснащення набагато простіше і дешевше. Її часто виготовляють пошарово з деревоволокнистих плит з подальшим склеюванням.

1.2.5. Вільне лиття

Вільне лиття є способом виробництва виробів з полімерних матеріалів, при якому рідка композиція заливається самопливом або під дуже невеликим тиском у форму і твердне в ній без тиску [5]. На даний момент для виробництва виробів методом вільного лиття широке поширення отримали вакуумно-ливарні машини, в яких процес дозування, перемішування компонентів і заливки суміші у форму здійснюється у вакуумі для поліпшення якості готових виробів (рис. 1.13).

Основним обмеженням застосування даного методу формування деталей є номенклатура використовуваних матеріалів. В якості сировини при вільному литті можуть використовуватися матеріали, які в початковому стані мають

відносно низьку в'язкість, тобто різні термореактивні полімери, наприклад, пластизолі та олігомерні композиції.



Рисунок 1.13 - Автоматична вакуумно-ливарна машина FVC-2A

Пластизолі являють собою концентровані дисперсії полімерів в органічних рідинах. Промислове застосування знайшли пластизолі на основі полівінілхлориду. Затвердіння пластизолів відбувається при підвищеній до 80-100 °С температурі внаслідок желатинізації. При желатинізації матеріал завдяки сплавленню первинних структур полімеру набуває однорідності і міцності [5].

Олігомерні композиції складаються з двох компонентів: основи (власне олігомеру) і спеціальних добавок (затверджувача). Затвердіння даних матеріалів відбувається після змішування основи і затверджувача в результаті хімічних реакцій і може протікати як при кімнатній, так і при підвищеній температурі. Широко застосовуються в промисловості такі олігомери, як епоксидні, поліефірні, кремнійорганічні, фенолформальдегідні смоли, олігоефіракрилати, олігоефіруретани, рідкі каучуки та ін. [5].

Оскільки в процесі виробництва виробів методом вільного лиття не використовується високий тиск, оснащення може виготовлятися з недорогих легкооброблюваних матеріалів. В останні роки широкого поширення набуло виготовлення ливарних форм для даного методу з силіконів із застосуванням майстер-моделей, виготовлених за допомогою технологій 3D-друку. Такий підхід значно здешевлює і прискорює виробництво, у зв'язку з чим виявляється рентабельним при дрібній серії виробів.

1.3. Аналіз випадків застосування 3D-друку для виготовлення запасних частин різних машин

Тенденція розвитку технологій адитивного виробництва з кожним роком набирає обертів і набуває все більшого поширення в різних галузях промисловості [19, 20]. Зокрема, великі перспективи застосування адитивних технологій лежать в області їх використання при виробництві та технічному обслуговуванні сільськогосподарської техніки [19 - 22], для відновлення працездатності механізмів методом заміни зношених деталей на нові, виготовлені методами 3D-друку [22]. Найбільшого поширення на даний момент набула адитивна технологія FDM-друку.

За кордоном використання 3D-друку для виготовлення запасних частин машин набуло досить широкого поширення. BuyAnyPart, англійський постачальник запасних частин, оголосив у 2018 р. про створення сервісу із заміни деталей сільськогосподарської техніки та обладнання, вироблених методами 3D-друку [23]. CNH Industrial, світовий лідер з виробництва та продажу сільськогосподарського та будівельного обладнання, вантажних автомобілів та автобусів, також пропонує послуги з 3D-друку деталей, що підлягають заміні, відзначаючи, що застосування даної технології дозволяє значно економити час і матеріали в умовах термінового виготовлення невеликих партій деталей.

Робота нідерландських вчених [24] присвячена методам оптимізації стратегій технічного обслуговування та ремонту за рахунок застосування адитивних технологій. Авторами представлено стандартний метод і метод, орієнтований на потреби кінцевого користувача. Робиться висновок про доцільність застосування адитивних технологій у процесі технічного обслуговування та ремонту, оскільки їх застосування дозволяє значно економити час за рахунок відсутності необхідності очікування тривалої доставки деталей від постачальника, а також завдяки можливості оптимізації конструкції деталі, що замінюється – шляхом з'єднання декількох замінюючих деталей в одну, що в кінцевому підсумку призводить до виключення непотрібних етапів складання.

Застосування пропонованих стратегій проілюстровано на прикладі ремонту верстата для виробництва відкидних дисків. Одним з головних завдань було відновлення працездатності пневматичного циліндра, що використовується для складування готових дисків в накопичувач. Необхідно було замінити зношене коромисло механізму (рис. 1.14). 3D -файли пневматичного циліндра і коромисла, що є стандартними деталями, були отримані з веб-сайту постачальника. Коромисло було роздруковано з PLA пластику на 3D-принтері Ultimaker з товщиною сопла 2,85 мм, температурою екструзії 210°C, зі швидкістю друку 50 мм/с; товщина шару становила 20 мкм.

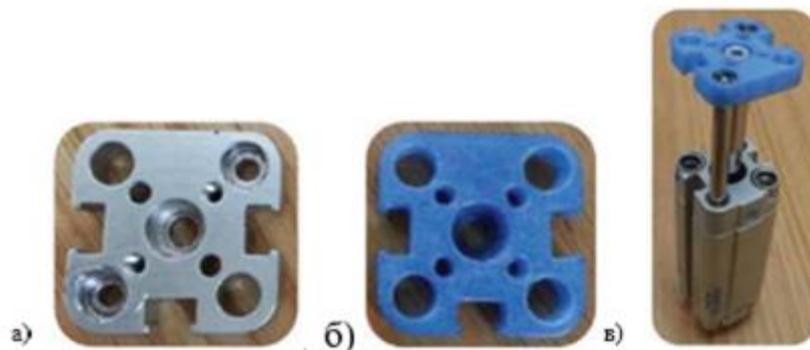
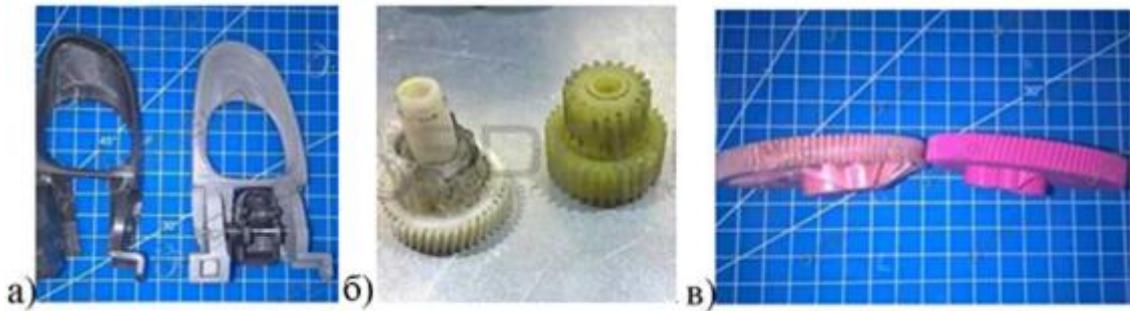


Рисунок 1.14 - Заміна коромисла пневматичного циліндра верстата для виробництва відкидних дисків

Компанії, що здійснюють 3D -друк, також пропонують послуги з виготовлення запасних частин. Найбільшого поширення подібні послуги набули в галузі технічного обслуговування автомобілів. Так одна з компаній [24] здійснила заміну ручки дверей автомобіля «KIA» Shuma, попередньо відновивши її геометрію та посиливши міцність конструкції на етапі моделювання (рис. 1.15а). Найчастіше компанія стикається із завданнями заміни зношених зубчастих коліс різних механізмів автомобілів: шестерні модуля стоянкового гальма автомобіля «LAND ROVER» (рис. 1.15б), зубчастого колеса двірника автомобіля «Mazda» (рис. 1.15в) та ін.



а - ручка дверей автомобіля KIA Shuma; б - шестерня модуля стоянкового гальма автомобіля LAND ROVER; в - зубчасте колесо склоочисника автомобіля Mazda»

Рисунок 1.15 - Приклади виготовлення методом FDM-друку деталей автомобілів замість зношених

У роботі [24] автором описується відновлення вал-шестерні зубчасто-ремінної передачі садового тримера методом, заснованим на механічній обробці з постановкою додаткової ремонтної деталі (ДРД). Основною ідеєю застосування FDM-технології при ремонті методом ДРД є створення електронної моделі пошкодженої ділянки деталі, її друк і подальший монтаж на механічно оброблену поверхню [24]. У даному випадку ДРД був зубчастий вінець, надрукований на FDM 3D-принтері Magnum Creative 2 Pro з ABS пластику зі швидкістю друку 45 мм/с, товщиною шару 0,05 мм і при температурі екструдера 235°C. Пошкоджена деталь і відновлена вал-шестерня наведені на рис. 1.16.



а - пошкоджена поверхня зубців; б - вал-шестерня, відновлена з застосуванням ДРД

Рисунок 1.16 - Відновлення вал-шестерні зубчасто-ремінної передачі садового тримера

На підставі проведеного огляду можна зробити висновок, що застосування технології 3D-друку методом FDM на даний момент знайшло досить широке застосування в практиці ремонту машин і обладнання. Однак можна також зробити висновок, що за кордоном впровадження даної технології в процеси ремонту отримало набагато більший розвиток, ніж на даний момент в Україні: кілька великих іноземних компаній, що спеціалізуються на виробництві та обслуговуванні техніки, вже впровадили практику 3D-друку в свої виробничі процеси, тоді як в Україні це явище носить розрізнений характер і залишається прерогативою невеликих приватних компаній.

Номенклатура деталей, можливих для виготовлення методом FDM-технології, досить широка і охоплює майже все розмаїття полімерних деталей, що використовуються в конструкції різних машин і обладнання. Використання даної технології дозволяє значно скоротити час і вартість ремонтних робіт, а також частково позбутися залежності від сервісних служб і термінів поставки запасних частин.

Серед факторів, що стримують поширення адитивних технологій у виробництві та ремонті техніки, можна виділити високі вимоги до деталей за міцністю або іншими функціональними характеристиками, які не завжди здатні забезпечити деталі, надруковані на 3D-принтері. В силу технологічних особливостей даної технології, деталі, виготовлені методом 3D-друку, демонструють гірші міцнісні властивості, ніж деталі з аналогічних матеріалів, вироблені за допомогою традиційних технологій. Даний факт пов'язаний з шаровим укладанням пластику в процесі друку, що призводить до поганої адгезії між шарами і в результаті до вираженої анізотропії властивостей деталі, при якій максимальна міцність спостерігається уздовж шару пластику, а поперек, в напрямку укладання, в рази менше. Крім того, часто для 3D-друку не представляється можливим використовувати пластики з високими механічними властивостями, які знайшли широке застосування в практиці виготовлення полімерних деталей, з огляду на те, що на перше місце при виборі матеріалу друку лежать його технологічні властивості і можливість переробки даним методом.

1.4. Висновки за розділом 1. Мета і завдання дослідження

Проведений аналіз показав, що деталі машин, виконані з полімерів і композиційних матеріалів на їх основі, знаходять в даний момент все більше застосування в конструкціях машин, в тому числі в конструкціях сільськогосподарської техніки та обладнання. Одночасно з поширенням полімерних деталей виникає проблема їх швидкої заміни в разі виходу з ладу. Як показує практика, часто для виробників і дилерів техніки виявляється нерентабельним виготовлення і продаж запасних частин з полімерів. Замість них пропонується придбати цілий вузол, який на порядки дорожчий за зламану полімерну деталь. Проблемою є також і великі терміни поставки окремих деталей або вузлів в силу специфіки роботи існуючих ланцюжків поставок запасних частин. Таким чином, терміни ремонту значно збільшуються, що особливо згубно позначається на прибутковості підприємств агропромислового комплексу в силу крайньої обмеженості часу виконання більшості агротехнічних робіт.

Альтернативою закупівлі запасних полімерних частин є їх самостійне виготовлення. Однак традиційні методи виробництва полімерних деталей передбачають використання досить складного обладнання та дорогого оснащення, у зв'язку з чим не відрізняються великою гнучкістю і виправдовують себе з економічної точки зору тільки в разі серійного виробництва обраної полімерної деталі в досить великому обсязі. За таких умов виготовлення полімерних запасних частин силами традиційного виробництва буде досить ускладненим і економічно недоцільним.

В останні роки все більшого застосування для ремонту техніки в різних галузях знаходять адитивні технології. За допомогою 3D-друку відновлюють шестерні різної конструкції, пластикові компоненти механізмів, корпуси, заглушки, важелі та інше. Широке поширення технологій 3D-друку обумовлено можливістю оперативного створення деталей будь-якої складності, а також скороченням фінансових витрат на виробництво полімерних деталей в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва в порівнянні з традиційними

методами. Серед факторів, що стримують поширення адитивних технологій в ремонтній галузі, можна виділити високі вимоги до деталей за міцністю або іншими функціональними характеристиками, які не завжди здатні забезпечити деталі, надруковані на 3D-принтері. Однак сферу використання адитивних технологій можливо розширити застосуванням нових технологічних підходів до 3D-друку, що передбачають використання нових композиційних матеріалів і нових технологічних схем отримання деталей з використанням 3D-друку.

Перспективним методом підвищення міцності 3D-друкованих виробів є метод постобробки, що полягає у вакуумному просочуванні деталей у полімерних компаундах. Така обробка дозволить склеїти шари пластику між собою, зменшуючи тим самим анізотропію міцності та підвищуючи конструкційну міцність. Отримані деталі можна буде використовувати в якості запасних частин для сільськогосподарської техніки, оскільки їх міцнісні характеристики будуть вищими за аналоги, виготовлені 3D-друком без зміцнювальної обробки, а час виготовлення при цьому невеликий, що дозволить проводити ремонт в найкоротші терміни і з мінімальними витратами.

Однак закономірності формування властивостей і технологія виготовлення таких деталей не вивчені і потребують розробки.

Таким чином, **метою** даної роботи є зниження витрат на реновацію технічних засобів за рахунок застосування 3D-друку з вакуумним просоченням для запасних частин з полімерних композиційних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступний перелік наукових і технічних завдань:

1. Розробити спосіб виготовлення полімерних запасних частин для сільськогосподарської техніки з використанням 3D-друку на основі аналізу існуючих підходів.
2. Розробити методику експериментальної оцінки просочуваності 3D-друкованих каркасів полімерними компаундами у вакуумі.
3. Провести експериментальні дослідження впливу геометричних параметрів 3D-друкованих каркасів на їх просочуваність полімерними компаундами та механічні властивості отриманих композиційних матеріалів.

4. Провести експериментальні дослідження впливу складу просочувального компаунда та режиму затвердіння на механічні властивості композиційних матеріалів на основі 3D-друкованих каркасів.

5. Розробити типовий технологічний процес виготовлення запасних частин для сільськогосподарської техніки з полімерних композиційних матеріалів із застосуванням 3D-друку та вакуумного просочення і оцінити його економічну ефективність.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАПАСНИХ ЧАСТИН ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-ДРУКУ З ВАКУУМНИМ ПРОСОЧУВАННЯМ

2.1 Обґрунтування вибору матеріалів і технологічних параметрів виготовлення 3D-друкованих каркасів

2.1.1 Огляд матеріалів, що застосовуються при 3D-друку за технологією FDM

У загальному випадку для 3D-друку методом пошарового наплавлення підходить будь-який термопластичний полімер, тобто такий полімер, який при нагріванні не руйнується, а переходить у в'язко-текучий стан, а при охолодженні повертається у вихідний стан без втрати властивостей. Однак на практиці далеко не будь-який матеріал виявляється технологічним і придатним для виконання 3D-друку. Найбільш поширені матеріали для FDM-друку та їх властивості представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Властивості матеріалів для FDM-друку [25]

	Технологічні властивості				Експлуатаційні властивості		
	Темп. екструзії, °C	Темп. столу, °C	Міжшаро ва адгезія	Усадка, %	Темп. експлуатації, °C	Межа міцності, МПа	Відносне подовжен ня, %
PLA	190-230	20-60	добра	нет	-20.. +40	25	3,8
ABS	210-245	90-120	середня	до 0,8	-40.. +80	35	6
PETG	215-245	20-80	дуже висока	ні	-40.. +70	36	50
SBS	220-240	70-90	низька	0,2	-80.. +65	34	250
Flex	220-240	90-110	добра	0,35-0,8	-100..+100	18	600
Nylon	235-260	100-120	висока	1	-Э0...+120	70	300
PC	270-310	90-110	висока	3	-40...+120	57	4,8

PLA (полілактид) є біорозкладним пластиком на основі молочної кислоти, що виробляється з натуральних продуктів, таких як цукровий очерет, кукурудза, картопляний крохмаль, целюлоза. Даний матеріал є одним з найпоширеніших при FDM-друку, оскільки не має усадки і не вимагає використання підігрівального столу і термостатированої камери.

ABS (акрилонітрилбутадієнстирол) є ударостійким пластиком, також досить поширеним у FDM-друку. Він має досить високу міцність, але при цьому простий у друку, що робить його актуальним для технічних застосувань. Даний матеріал є одним з найдешевших, що також обумовлює популярність його використання. Недоліками даного матеріалу є його погана стійкість до впливу ультрафіолету, а також висока усадка і необхідність використання при друку термостатированої камери.

PETG (поліетилентерефталат-гліколь) є ударостійким пластиком, що також має високу міжшарову адгезію. Також великою перевагою даного матеріалу є відсутність усадки і стійкість до ультрафіолету. На відміну від ABS, для друку даним пластиком не потрібна закрита камера, що також забезпечило його високу популярність на ринку. До недоліків даного матеріалу можна віднести відносно високу температуру друку і високу плинність матеріалу, через що можливі дефекти друку при неправильному налаштуванні параметрів друку.

SBS (стирол-бутадієн-стирол) має малу усадку, високу міцність і хорошу адгезію до столу. До недоліків даного матеріалу відноситься слабка міжшарова адгезія і відносно висока температура друку.

Flex (поліуретан) є м'яким гумоподібним матеріалом, що використовується в тих випадках, коли необхідна гнучкість і еластичність готових виробів. Має масло- і бензостійкість, широкий температурний діапазон застосування. До недоліків застосування відноситься складність друку; часто для використання даного матеріалу потрібне застосування екструдера спеціальної конструкції.

Nylon (нейлон – синтетичний матеріал із сімейства поліамідів) є матеріалом, що має високу стійкість до стирання, у зв'язку з чим основною сферою застосування є виготовлення тертьових вузлів кінематичних пар

(зубчасті колеса, втулки тощо). Однак при цьому має дуже високу усадку, необхідність закритої камери для друку і неможливість друку великих виробів.

PC (полікарбонат) є одним з найміцніших матеріалів для 3D-друку серед стандартних. Він стійкий до фізичного та теплового впливу, витримує високі температури до 110°C. Однак у 3D-друці його застосовують рідко через високу температуру друку, високу усадку, а також гігроскопічність.

За результатами порівняльного аналізу матеріалів, що використовуються для FDM-друку, доцільним для виготовлення каркасів запасних частин є вибір в якості матеріалу 3D-друку пластиків PLA і ABS, що відрізняються високою технологічністю друку, хорошими механічними характеристиками і відносно низькою ціною.

2.1.2 Аналіз технологічних факторів 3D-друку за технологією FDM

Параметри друку, пов'язані з технологічними властивостями матеріалу. До параметрів даної групи можна віднести температуру екструдера, температуру столу та/або камери і режим охолодження. Дані параметри пов'язані тільки з поведінкою конкретного виду пластику в процесі друку і залежать від його фізичних властивостей, таких як температура переходу в в'язко-текучий стан, швидкість затвердіння, рівень адгезії та ін. Вибір цих параметрів багато в чому пов'язаний з конструктивними особливостями принтера, що використовується для друку: наявністю або відсутністю термостатированої камери, розташуванням і потужністю нагрівачів, охолоджуючих вентиляторів. У зв'язку з цим виробники принтерів і матеріалів часто надають стандартний набір параметрів друку для кожного пластику, що гарантують найкращий результат, проте на практиці не завжди при стандартних параметрах вдається досягти найкращого рівня властивостей деталі, що друкується. У будь-якому використовуваному слайсері завжди є можливість користувацького налаштування перерахованих параметрів, комплекс яких в кінцевому підсумку буде впливати на структуру матеріалу і властивості деталі.

Найважливіший параметр у цій групі – це температура, до якої розігрівається матеріал у процесі друку. Цей параметр задається температурою

екструдера (сопла). Обрана температура повинна бути вищою за температурний інтервал переходу полімеру у в'язко-текучий стан, але нижчою за температуру, при якій матеріал починає деградувати і втрачати свої властивості. Зазвичай температура друку задається на 5-10 °C вище верхнього інтервалу температур переходу полімеру у в'язко-текучий стан, але іноді її доводиться підвищувати для досягнення кращої адгезії між шарами і зниження в'язкості екструдованого полімеру. На малюнку 2.1 показана залежність сили адгезії шарів пластику при 3D-друку в залежності від температури екструдера (235, 250 і 260 оC) [25]. Видно, що сила адгезії має явну тенденцію до збільшення.

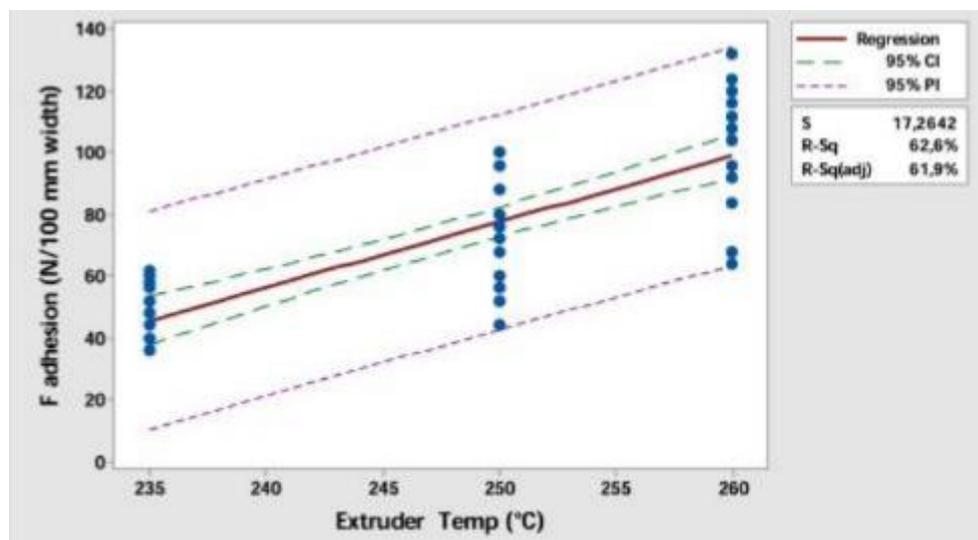


Рисунок 2.1 – Залежність сили адгезії шарів пластику при 3D-друку від температури екструдера

Наступний за важливістю параметр – це температура столу і/або камери принтера в залежності від його конструктивних особливостей. Температура в камері в процесі друку буде впливати на швидкість охолодження пластику, що в кінцевому підсумку позначиться на усадці деталі, рівні міжшарової адгезії, а також структурі матеріалу, що особливо важливо для кристалічних полімерів. Дана температура повинна бути нижчою за температуру розм'якшення матеріалу, інакше деталь не буде тримати форму і почне *пливти*, але при цьому вона повинна бути досить високою, щоб нижні шари не встигали охолоджуватися в процесі друку. Якщо нижній шар пластику, над яким йде побудова, матиме низьку температуру, це призведе до поганої адгезії між даним

шаром і верхнім шаром друку, що в кінцевому підсумку призведе до розшарування деталі. У зв'язку з цим даний параметр прагнуть максимізувати і задають на 5-10 °С нижче температури розм'якшення матеріалу.

Геометричні параметри друку. До параметрів даної групи відносяться висота шару, ширина ліній, кількість зовнішніх периметрів, вид і відсоток внутрішнього заповнення. На відміну від попередніх параметрів, для яких існує оптимальне співвідношення для досягнення кращої якості друку, їх можна регулювати в широкому діапазоні, що буде призводити до формування різних властивостей надрукованої деталі.

Завдання висоти і ширини шару друку безпосередньо залежать від обраного для друку діаметра сопла, відповідно для вибору цих параметрів попередньо слід визначитися з його значенням. Діаметр обраного сопла не може перевищувати діаметр філаменту, що використовується для друку. Стандартний найбільш застосовний діаметр філаменту для 3D-друку становить 1,75 мм, розміри застосовуваних сопел коливаються в діапазоні від 0,1 до 1,2 мм. При великих діаметрах сопла спостерігається низька точність і якість друку, що виражається в поганому заповненні обсягу деталі матеріалом і появою порожнин, а також у високій шорсткості поверхні. Отже, діаметр сопла прагнуть мінімізувати, однак, чим менше використовується сопло, тим менше продуктивність друку і більше час, необхідний для виготовлення деталі. На основі практичного досвіду 3D-друку вдалося встановити, що оптимальне співвідношення між якістю і швидкістю друку можна досягти при використанні сопел діаметром 0,3 або 0,4 мм.

Висоту шару при друку рекомендують вибирати приблизно в 2-4 рази менше обраного діаметра сопла [80], відповідно при діаметрі сопла 0,4 мм рекомендований діапазон становить від 0,1 до 0,2 мм. Обрана висота шару в кінцевому підсумку впливає на якість деталі (рис. 2.2), а також впливає на міцнісні властивості (рис. 2.3): чим менше висота обраного шару, тим міцнішою виявляється надрукована деталь [26]. Таким чином, висоту шару друку прагнуть мінімізувати в тому випадку, якщо вирішальним фактором при заданні друку не

є продуктивність, оскільки при меншій висоті шару швидкість побудови деталі значно зменшується.

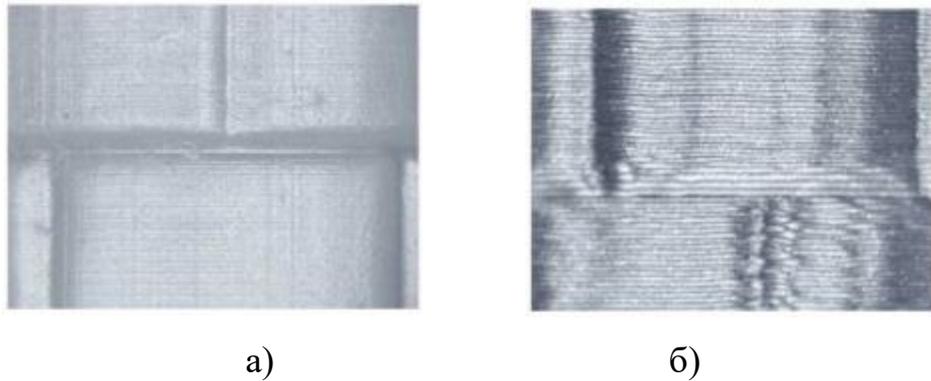


Рисунок 2.2 – Поверхня деталі, виготовленої за допомогою 3D-друку з різною заданою висотою шару

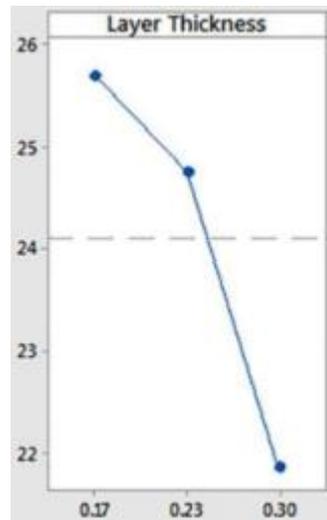


Рисунок 2.3 – Залежності міцності 3D-друкованих зразків при випробуваннях на розтягнення від висоти шару друку

Наступний важливий параметр – ширина лінії при друку. Вибір ширини лінії менше діаметра сопла недоцільний, оскільки в цьому випадку велика ймовірність утворення непродрукованих областей. Зазвичай ширину шару варіюють в діапазоні величин від одного до двох діаметрів сопла, оскільки більшу кількість матеріалу через перетин сопла продавлювати не вдається. Показано, що при збільшенні ширини лінії від одного діаметра сопла (100 %) до двох діаметрів (200 %) міцність зразків зростає більш ніж удвічі, так само як і

продуктивність друку (рис. 2.4) [26], тому даний параметр доцільно максимізувати.

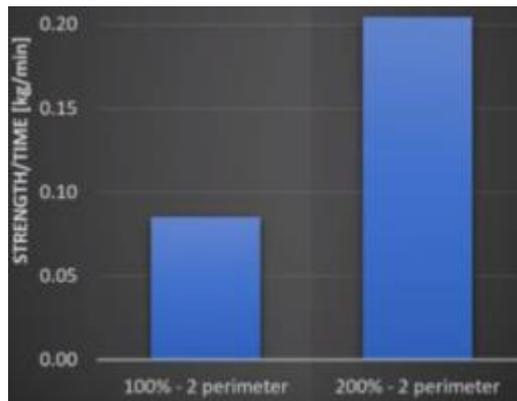


Рисунок 2.4 – Питома міцність 3D-друкованих зразків залежно від обраної ширини лінії під час друку

Збільшення кількості зовнішніх периметрів призводить до підвищення міцності надрукованої деталі, проте в цьому випадку залежність не така сильна [26]. Зразки з товщиною стінки в чотири периметри при випробуваннях показали незначне підвищення міцності в порівнянні зі зразками зі стінкою з двох периметрів (рис. 2.5). Отже, збільшувати товщину стінки деталі при друку нецільспрямовано і зазвичай при друку обмежуються виставленням стінки в один або два периметри.

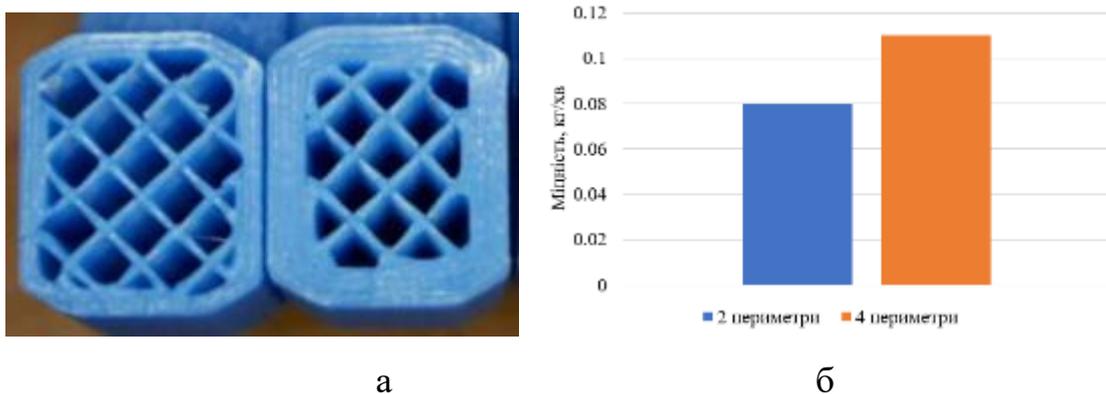


Рисунок 2.5 – Зразки з товщиною стінки в два і чотири периметри (а) і питома міцність даних зразків (б)

Внутрішнє заповнення – це структура деталі всередині надрукованого контуру. Заповнення може бути виконано в різному вигляді; основні види показані на рис. 2.6. Вид заповнення має істотний вплив на міцнісні властивості надрукованої деталі [26]. Порівняння міцнісних властивостей зразків з представленими на даному рисунку видами заповнень показано в таблиці 2.2. Як видно з таблиці, найбільшій міцності зразків в абсолютному значенні вдається досягти при використанні лінійного заповнення, тоді як максимальну питому міцність демонструють зразки з шестикутним заповненням.

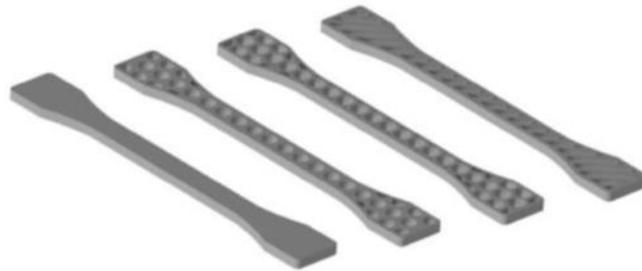


Рисунок 2.6 – Основні види заповнення, що застосовуються при 3D-друку, зліва направо: суцільне, кругле, шестикутне, лінійне

Таблиця 2.2 – Міцність 3D-друкованих зразків з різними видами заповнення (за рис. 2.6)

Вид заповнення	Межа міцності, МПа	Вага, г	Питома міцність, МПа/г
Суцільне	47,82	1,176	40,66
Кругле	34,30	0,760	45,13
Шестикутне	42,25	0,582	72,59
Лінійне	51,01	0,760	67,12

Кожен із зазначених видів заповнення може бути виконаний з різним відсотком у межах від 0 (у цьому випадку деталь буде порожнистою, надрукованими будуть тільки зовнішні стінки) до 100 (деталь повністю заповнена матеріалом – аналог лиття). Як показують дослідження, із зростанням відсотка заповнення міцність зразків збільшується за законом, близьким до лінійного (рис. 2.7) [26].

На рисунку показано залежність міцності зразків із заповненням у вигляді сітки від відсотка заповнення для двох різних матеріалів друку. Як видно з графіка, збільшення відсотка внутрішнього заповнення від 20 до 100 призводить до збільшення міцності приблизно втричі.

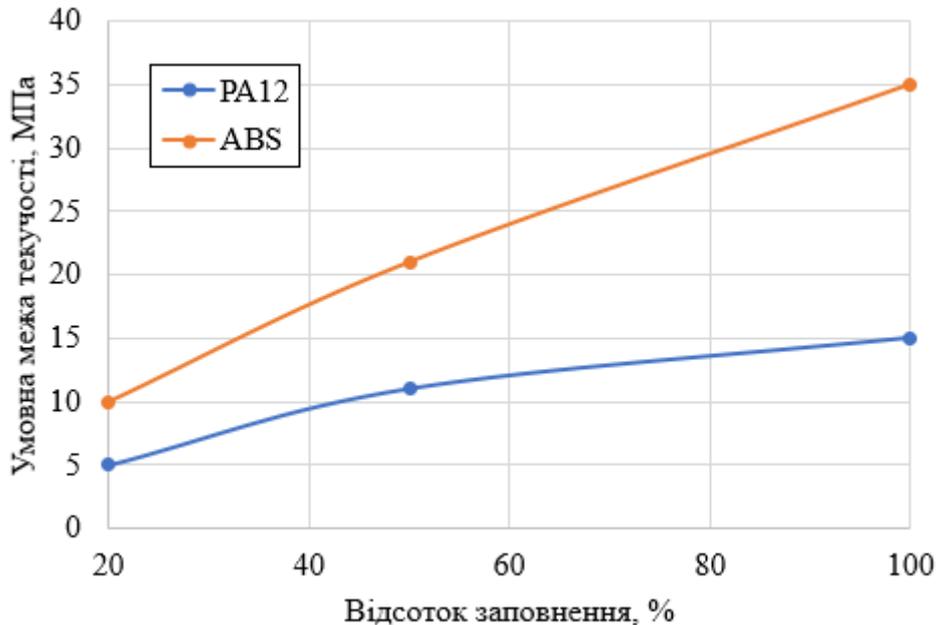


Рисунок 2.7 – Залежність умовної межі плинності 3D-друкованих зразків із пластиків акрилонітрилбутадієнстирол (ABS) і поліамід-12 (PA12) від відсотка заповнення

2.2 Аналіз моделі розрахунку механічних властивостей композиційних матеріалів

Композити являють собою гетерогенні середовища з чітко вираженими фазами (компонентами). У зв'язку з цим теоретично існує можливість визначити характеристики композитів за відомими властивостями компонентів [3].

Середні за елементарним об'ємом V напруги і деформації розраховуються наступним чином [3]:

$$\overline{\sigma_{ij}} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij}(x_1, x_2, x_3) dV, \quad (2.1)$$

$$\overline{\varepsilon_{ij}} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij}(x_1, x_2, x_3) dV. \quad (2.2)$$

де σ_{ij} - тензор напруги;

ε_{ij} - тензор деформацій.

Для представленого обсягу V закон Гука буде виражатися як

$$\overline{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} \times \varepsilon_{kl}, \quad (2.3)$$

де C_{ijkl} - тензор ефективних (еквівалентних) модулів пружності.

Для визначення середніх $\overline{\sigma}_{ij}$ і $\overline{\varepsilon}_{ij}$ за формулами (2.1) і (2.2) потрібно знати розподіл полів напружень і деформацій в обсязі V . На практиці використовують формули для ефективних характеристик, що отримуються на основі рівняння адитивності або правила сумішей. При припущенні, що деформації по всьому об'єму V односпрямованого композиту є постійними, з (2.1) випливає, що і ефективний модуль є постійним [3]. Тоді модуль пружності композиційного матеріалу може бути обчислений з наступного співвідношення:

$$E_{KM} = E_M V_M K_M + E_N V_N K_N, \quad (2.4)$$

де E_M і E_N - модулі пружності матриці і наповнювача відповідно;

V_M і V_N - об'ємні частки матриці і наповнювача;

K_M - коефіцієнт умов роботи матриці, що враховує її пористість, особливості навантаження та ін.;

K_N - коефіцієнт умов роботи наповнювача, що враховує його орієнтацію, дисперсію міцності та ін.

Правило сумішей, розглянуте вище, застосовується також для визначення межі міцності при розтягуванні композиційного матеріалу. Відповідно до цього правила

$$\sigma_{KM} = \sigma_M V_M K_M + \sigma_N V_N K_N, \quad (2.5)$$

де σ_M і σ_N - межа міцності матриці і наповнювача відповідно.

2.3 Висновки за розділом

1. На основі аналізу матеріалів, що використовуються для виготовлення деталей за технологією FDM-друку, були обрані матеріали для виготовлення запасних частин за допомогою 3D-друку з вакуумним просоченням для ремонту

сільськогосподарської техніки – пластики PLA і ABS через низькі значення температури друку до 250 °C і усадки до 0,8 %, а також високих значень межі міцності до 35 МПа і відносного подовження до 6 %.

2. В результаті проведеного аналізу технологічних факторів 3D-друку за технологією пошарового наплавлення розплавлених полімерів було виявлено три групи технологічно важливих факторів: параметри, пов'язані з технологічними властивостями матеріалу (температура екструдера, температура столу і/або камери і режим охолодження); геометричні параметри (висота шару, ширина ліній, кількість зовнішніх периметрів, вид і відсоток внутрішнього заповнення); швидкість друку. Було виявлено, що на механічні властивості надрукованих деталей найбільший вплив мають такі параметри, як вид і відсоток внутрішнього заповнення.

3. На основі розглянутих рівнянь і залежностей була розроблена методика розрахунку максимально можливої товщини 3D-друкованого каркаса при вакуумному просочуванні полімерними компаундами. Розрахунок для випадку просочення каркаса із заповненням 33 % компаундом на основі епоксидної смоли ЕД-20 показав, що максимально можлива товщина деталі, яку можливо просочити в таких умовах, склала 622 мм.

4. Аналіз моделі розрахунку механічних властивостей композиційних матеріалів показав, що властивості отриманого при просочуванні 3D-друкованих каркасів композиту можна теоретично розрахувати через закон адитивності.

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Розробка програми та методики досліджень просочуваності 3D-друкованих каркасів залежно від геометрії каркаса

На першому етапі експериментальних досліджень вирішено оцінити якість просочуваності 3D-друкованих каркасів полімерними компаундами за різних умов просочення. Як було встановлено в попередньому розділі, на процес просочення полімерних каркасів компаундом впливає проникність каркаса і градієнт тисків, виражений у часі витримки зразків у компаунді в умовах розрідження. Для проведення експериментальних досліджень вирішено варіювати час просочення наступним чином: 10, 20 і 30 хв.

Проникність каркаса буде змінюватися залежно від товщини стінки і відсотка внутрішнього заповнення. Проникність можна охарактеризувати кількістю пор у зразку, що залишилися після просочення. Просочуваність вирішено оцінювати як величину, обернено пропорційну кількості виявлених пор. Для визначення залежності проникності каркасів від факторів їх геометрії використовується D-оптимальний план експерименту. У цьому випадку рівняння регресії для двофакторного експерименту матиме такий вигляд:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (3.1)$$

де x_1 - кодоване значення товщини стінки каркаса;

x_2 - кодоване значення відсотка заповнення каркаса;

y - просочуваність (величина, обернено пропорційна кількості пор у зразку);

b_n - експериментальні коефіцієнти рівняння регресії.

Рівні та фактичні значення факторів варіювання запланованого експерименту представлені в таблиці 3.1. Для кожного варіанту варіювання факторів планується виготовити по три зразки для підвищення достовірності

результатів. На рис. 3.1 показано переріз 3D-моделей зразків з різною геометрією.

Таблиця 3.1 - Фактори варіювання експерименту з оцінки просочення полімерних каркасів компаундами

Фактори		Рівні варіювання		
Натуральний вигляд	Кодований вигляд	-1	0	+1
Товщина стінки кількість нитей	*1	0	1	2
Заповнення, %	*2	20	33	50

Варіанти зразків з однією зовнішньою стінкою:

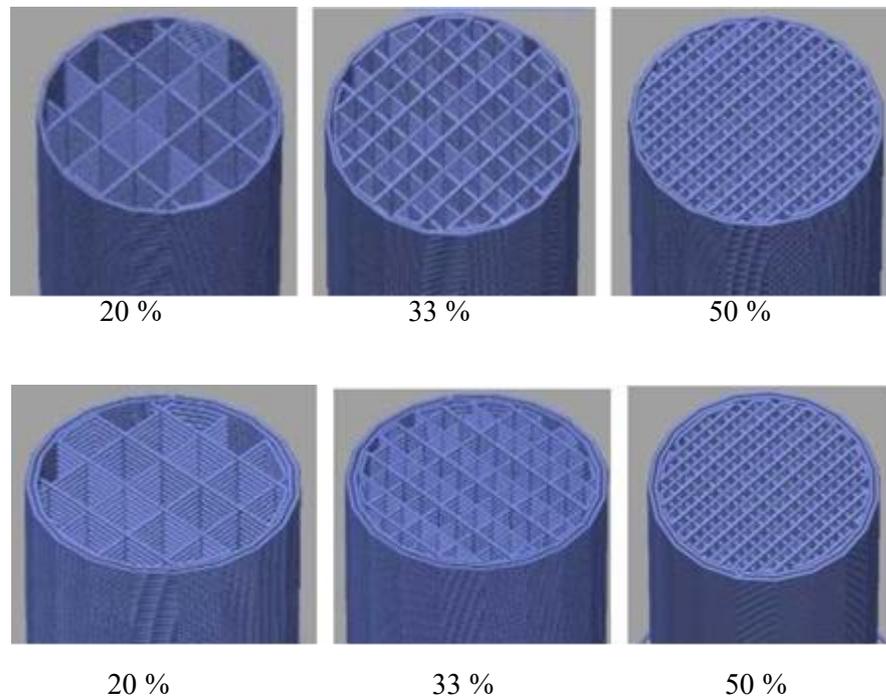


Рисунок 3.1 - Перерізи 3D-моделей просочених зразків

Зразки для просочення будуть представляти собою циліндри діаметром 15 мм і висотою 40 мм. Для дослідження кількості пор у зразках вирішено застосовувати руйнівний метод перерізів. Його суть полягає в тому, щоб розрізати деталь або досліджуваний зразок у декількох перерізах і візуально визначити наявність пор в отриманих перерізах у якісному або кількісному

вираженні. Важливими аспектами методу є обране місце розташування перерізів і спосіб підрахунку пор.

При дослідженні просочення каркасів різної геометрії компаундами циліндричні зразки друкувалися на принтері Creality K1 max (рис. 3.2) та розрізалися на ручному відрізному верстаті у декількох перерізах відповідно до схеми, представленої на рис. 3.3.



Рисунок 3.2 – 3D принтер Creality K1 max

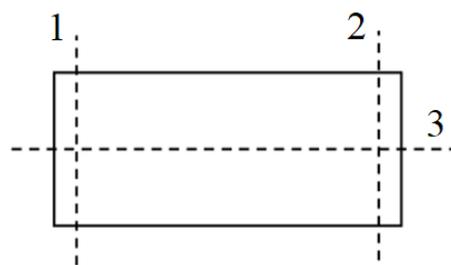


Рисунок 3.3 - Схема розрізу просочених зразків

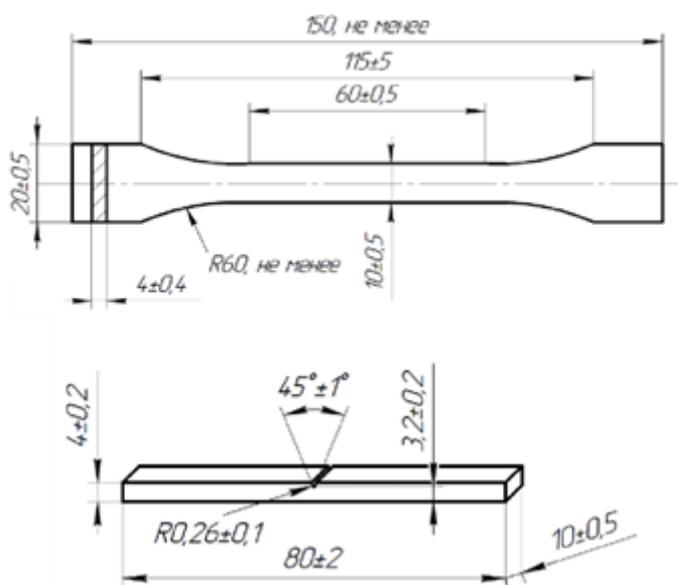
В отриманих перерізах проводився підрахунок кількості пор в штуках в межах всієї партії зразків (по три зразки з кожним набором факторів варіювання). Просочення оцінювалася як величина, обернена до частоти появи пор. Крім чисельного значення просочення, отриману величину можна також оцінити якісно. Для цього розроблена наступна методика оцінки: 0-0,5 - незадовільне

просочення; 0,6-0,7 – задовільне просочення; 0,8-0,9 - добре просочення; >0,9 - відмінне просочення.

3.2 Програма досліджень механічних властивостей композитів

На другому етапі експериментальних досліджень будуть оцінюватися механічні властивості композиту (межа міцності та ударна в'язкість). Зразки будуть представляти собою стандартні зразки для випробувань на розтягнення за ДСТУ 11262-2017 Пластмаси. Метод випробування на розтягнення та випробувань на ударну в'язкість за ДСТУ 4647-2015 Пластмаси. Метод визначення ударної в'язкості за Шарпі (рис. 3.4).

Схема розрізу просочених зразків



а - випробування на розтягнення (тип 2); б - випробування на ударну в'язкість (тип 2, надріз В)

Рисунок 3.4 - Зразки для дослідження механічних властивостей композиційного матеріалу

3.3 Методики випробувань

3.3.1 Визначення пористості з використанням методу гідростатичного зважування

Метод гідростатичного зважування призначений для визначення щільності матеріалів. Пористість в цьому випадку можна оцінити шляхом порівняння теоретичної ідеальної щільності зразків з реальною, отриманою методом гідростатичного зважування. Даний метод відноситься до неруйнівних методів дослідження, тому може бути використаний для визначення рівня пористості зразків, призначених для подальших руйнівних випробувань на міцність.

Теоретична щільність зразків визначається наступним чином:

$$\rho_{\text{теор}} = \rho_{\text{PLA}} \cdot V_{\text{PLA}} + \rho_{\text{ЕД-20}} \cdot V_{\text{ЕД-20}} \quad (3.2)$$

де $\rho_{3D} = 1,24 \text{ г/см}^3$ - щільність матеріалу друкованого каркаса;

$\rho_{\text{ЕД-20}} = 1,21 \text{ г/см}^3$ - щільність застиглої смоли;

$V_{\text{PLA}}, V_{\text{ЕД-20}}$ - об'ємні частки складових частин матеріалу, $V_{\text{PLA}} + V_{\text{ЕД-20}} = 1$.

Обсяг витраченого для друку пластику V_{3D} для кожного випадку заповнення визначали за допомогою слайсера для 3D-друку Polygon X. Обсяг епоксидної смоли для кожного випадку заповнення розраховувався як різниця між обсягом пластику, необхідного для друку зразка із заповненням 100%, і обсягом пластику, витраченого на друк каркаса певного заповнення.

Реальна щільність зразків оцінювалася згідно з ДСТУ 15139-99 Пластмаси. Методи визначення щільності (розділ 3, Метод гідростатичного зважування). Суть методу полягає в порівнянні маси зразка, виміряної на повітрі, з масою зразка, виміряною при зануренні в робочу рідину відомої щільності. У даній роботі застосовувалася дистильована вода. Маса визначалася з дискретністю вимірювань $0,0001 \text{ г}$ за допомогою ваг A&D GR-200. Щільність зразка обчислюється наступним чином:

$$\rho_{розр} = \frac{m_n}{m_p} \rho_{рід} \quad (3.3)$$

де m_n - маса зразка на повітрі;

m_p - маса зразка в робочій рідині;

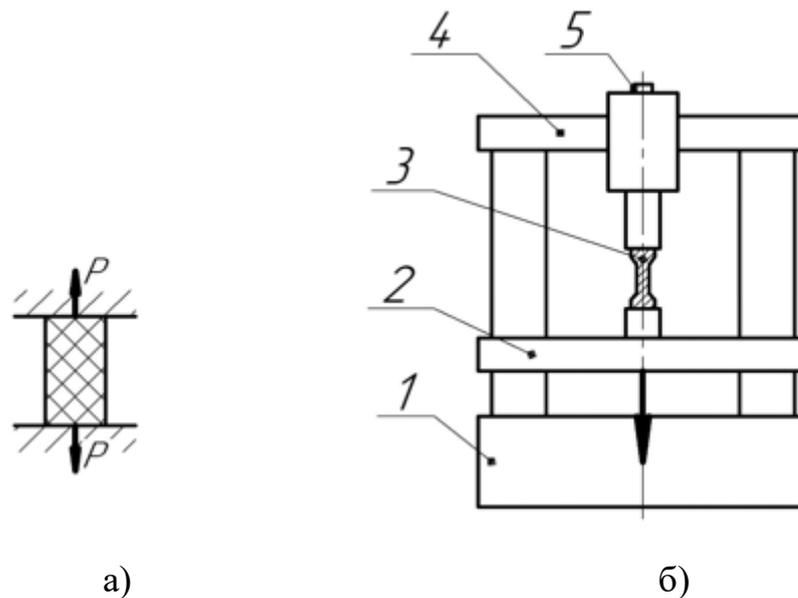
$\rho_{рід} = 1 \text{ г/см}^3$ - щільність робочої рідини (дистильованої води).

Пористість зразків розраховується за такою формулою:

$$\Pi = \frac{(\rho_{теор} - \rho_{розр})}{\rho_{теор}} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

3.3.2 Методика випробувань на розтяг

Випробування матеріалів на одноосьове статичне розтягнення є одним з найпоширеніших видів механічних випробувань (рис. 3.5).



а - схема прикладання навантаження; б - схема випробувальної машини

Рисунок 3.5 - Випробування матеріалів на одноосьове статичне розтягнення

Спеціальний пристрій, так званий діаграмний апарат, в процесі навантаження зразка викреслює в певному масштабі криву в координатах напруження-деформація, яка називається діаграмою розтягування, вигляд якої залежить від властивостей матеріалу (рис. 3.6).

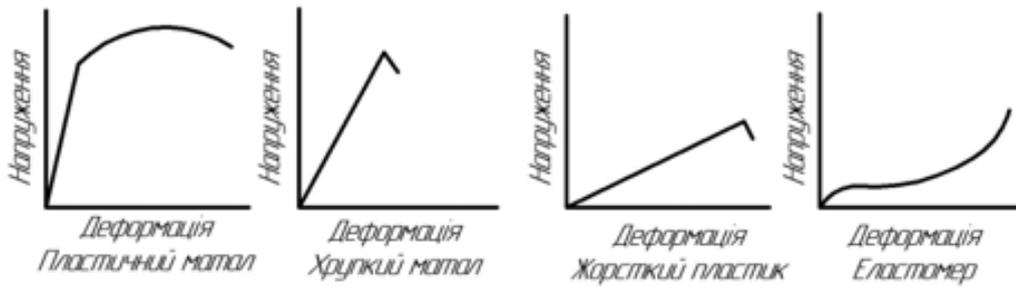


Рисунок 3.6 - Вигляд кривих напруження-деформація для матеріалів різного типу

Аналізуючи дані, отримані з діаграми розтягування (рис. 3.7), для матеріалів визначають такі основні характеристики міцності: межа плинності σ_T - напруження, при якому зразок деформується без помітного збільшення розтягуючого навантаження (тільки для пластичних матеріалів); межа міцності або тимчасовий опір σ_B напруження при максимальному навантаженні, що передуює руйнуванню зразка.

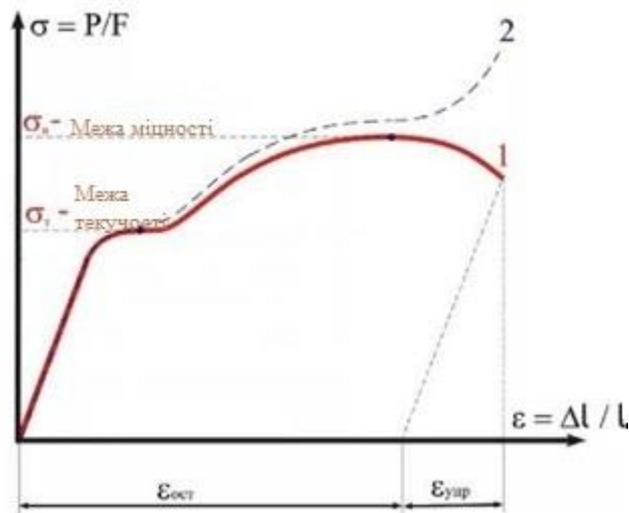


Рисунок 3.7 - Діаграма розтягування пластичного матеріалу та основні характеристики міцності, що знімаються з неї

Випробування полімерних матеріалів на одноосьове розтягнення проводяться згідно з ДСТУ 11262-2017 Пластмаси. Метод випробування на розтягнення. Стандарт описує умови навантаження та зразки, що застосовуються. Були обрані зразки типу 2, описані раніше в підрозділі 3.1. Випробування проводилися на електромеханічній розривній машині TIME

WDW-50E з механічними клиновими захватами (рис. 3.8) у лабораторії механіки еластомерних матеріалів. Управління машиною, запис і обробка результатів здійснювалися за допомогою комп'ютера з використанням спеціального програмного забезпечення.

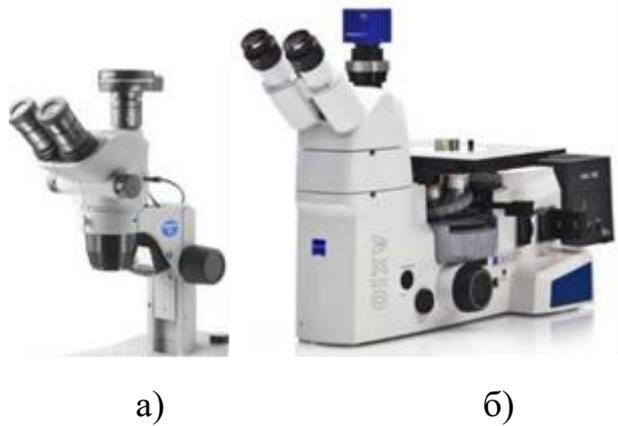


Рисунок 3.8 - Розривна машина TIME WDW-50E

Швидкість навантаження зразків вибиралася відповідно до вимог таким чином, щоб випробування тривало не менше 1 хвилини і становило для зразків типу *вздовж* 2 мм/сек, для зразків типу *поперек* 1 мм/сек.

3.3.3 Методика фрактографічного дослідження

Фрактографічне дослідження являє собою дослідження зломів поверхонь руйнування матеріалів і дозволяє визначити характер і причину руйнування, а також виявити різні дефекти в матеріалі при їх наявності. Світлова фрактографія зломів передбачає використання світлових мікроскопів із збільшенням від 50 до 1000. У даній роботі використовувався бінокулярний мікроскоп Olympus SZ61 TR з камерою та інвертований мікроскоп ZEISS Axio Vert.A1 (рис. 3.9). Для отримання якісного зображення необхідно стійко зафіксувати зразок, для чого його ставлять на підкладку з фіксуючою масою (пластилін), після чого вибирається збільшення.



а - бінокулярний мікроскоп Olympus SZ61 TR; б - інвертований мікроскоп ZEISS Axio Vert.A1

Рисунок 3.9 - Світлові мікроскопи для вивчення зломів

При дослідженні зразків композитів за отриманим зображенням зламу можна буде зробити оцінку рівня змочення між складовими композиту. Відсутність змочення між каркасом і смолою буде виражатися в розшаруванні матеріалу, а також у наявності відмінностей у ступені деформації компонентів. Якщо дані дефекти не спостерігаються, то взаємозв'язок складових композиту міцний.

3.4 Результати дослідження механічних властивостей композитів з каркасами різної геометрії

3.4.1 Результати випробувань на розтяг

В результаті проведеного ряду випробувань було встановлено, що всі зразки полімерного композиту руйнуються за крихким механізмом, що видно з діаграми розтягування, на якій відсутня площа текучості (рис. 3.10). Для випробуваних зразків фіксувався показник межі міцності σ_b , що відповідає напрузі при максимальному навантаженні, що передуює руйнуванню зразка. Результати випробувань представлені в таблицях 3.2 і 3.3. З метою оцінки приросту рівня міцності композиту були також виготовлені і випробувані непросочені зразки з параметрами підготовки, аналогічними просоченим

зразкам. На рис. 3.11 і 3.12 представлені графіки залежності міцності випробуваних зразків від відсотка заповнення.

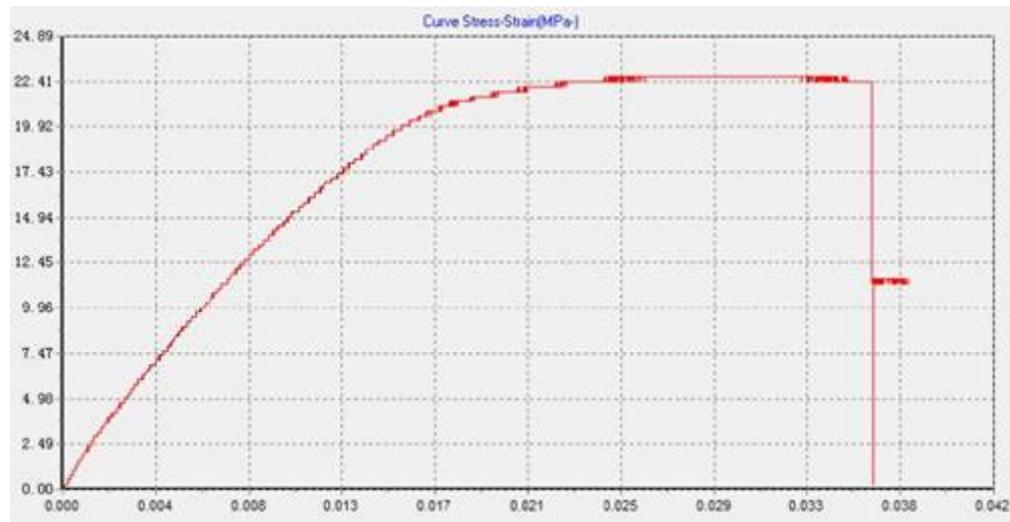


Рисунок 3.10 - Типовий вигляд кривої діаграми розтягування зразків досліджуваного полімерного композиту

Таблиця 3.2 - Результати випробувань зразків вздовж на розтягнення

	Відсоток заповнення		
	20%	33%	50%
№ зразка	Непросочені зразки		
1	4,0	10,0	15,0
2	7,0	11,0	12,0
3	-	9,0	10,0
середнє	5,5	10,0	12,3
№ зразка	Просочені зразки		
1	10,0	11,0	15,0
2	10,0	11,0	15,0
3	11,0	11,0	14,0
середнє	10,3	11,0	14,7

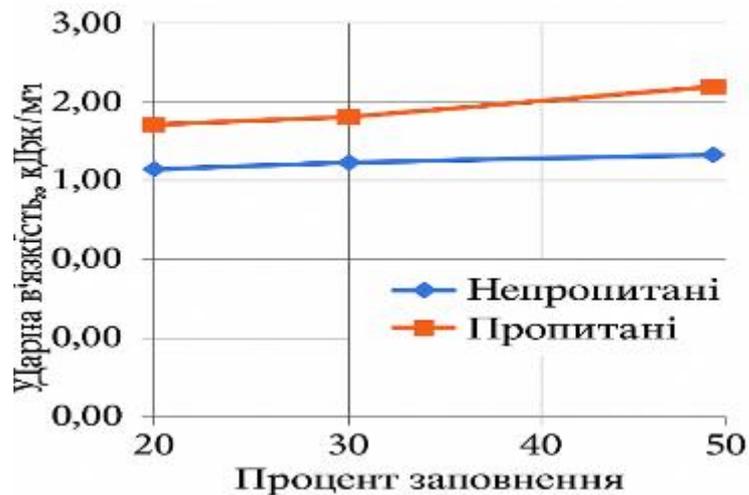


Рисунок 3.11 - Залежність міцності зразків типу вздовж від відсотка заповнення для просочених і непросочених зразків

Таблиця 3.3 - Результати випробувань зразків типу поперек на розтяг

	Відсоток заповнення		
	20%	33%	50%
№ зразка	Непросочені зразки		
1	1,0	3,0	5,0
2	1,0	3,0	6,0
3	1,0	3,0	7,0
середнє	1,0	3,0	6,0
№ зразка	Просочені зразки		
1	8,5	13,0	7,5
2	7,0	10,0	-
3	8,0	12,0	10,0
середнє	7,8	11,7	8,8

За представленими графіками можна простежити, що міцність просочених зразків у всіх випадках перевершує міцність непросочених. Зразки типу вздовж в результаті виконання просочення зміцніли не так значно, як зразки типу поперек: приріст міцності перших в середньому залишає близько 40 %, тоді як других коливається в межах від 600 % до 45 %, що в середньому становить близько 340 %.

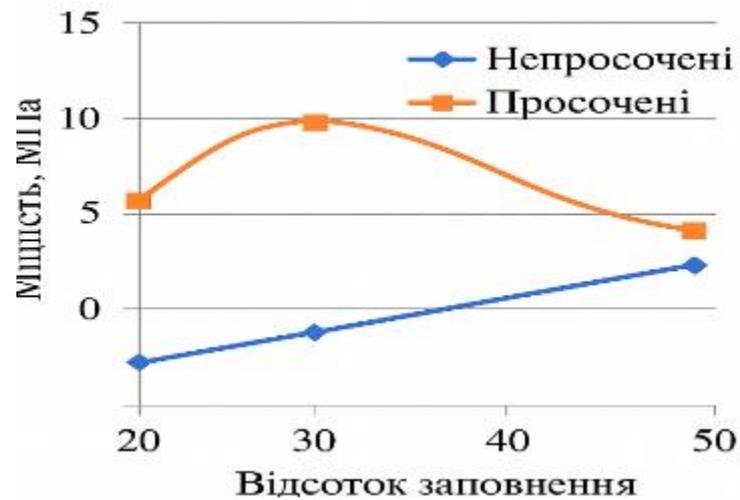


Рисунок 3.12 - Залежність міцності зразків типу *поперек* від відсотка заповнення для просочених і непросочених зразків

За результатами випробувань додатково було розраховано коефіцієнт анізотропії як відношення значення міцності зразка типу *вздовж* до значення міцності зразка типу *поперек* при аналогічному відсотку заповнення (таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 - Зведена таблиця випробувань зразків на міцність і розрахований коефіцієнт анізотропії

Заповнення, %	Непросочені зразки			Просочені зразки		
	Зразки типу вздовж, σ_v МПа	Зразки типу поперек, σ_v МПа	Коефіцієнт анізотропії	Зразки типу вздовж, σ_v МПа	Зразки типу поперек, σ_v МПа	Коефіцієнт анізотропії
20	5,50	1,00	5,50	10,33	7,83	1,32
33	10,00	3,00	3,33	11,00	11,76	0,94
50	12,33	6,00	2,06	14,76	8,75	1,69

Після просочення міцність зростає для будь-якої геометрії зразків, а анізотропія міцнісних властивостей помітно знижується: якщо до виконання просочення різниця у властивостях у напрямку вздовж і поперек доходила до 5,5 разів, то після просочення коефіцієнт анізотропії близький до одиниці, що свідчить про рівномірність міцнісних властивостей у різних напрямках.

3.4.2 Висновки за результатами дослідження механічних властивостей композитів залежно від геометрії каркаса

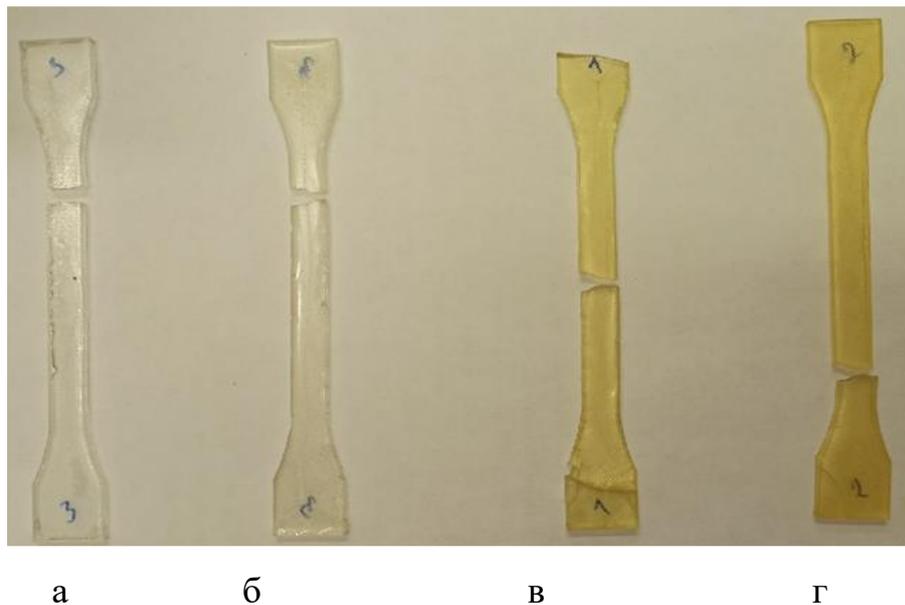
В результаті проведених експериментів встановлено, що вакуумне просочення в компаунді 3D-друкованих полімерних конструкцій, виготовлених за технологією FDM, позитивно впливає на їх механічні властивості. Для всіх варіантів розглянутої геометрії зразків (заповнення пластиком при 3D-друку 20, 33, 50 % і напрямком укладання шарів пластику в процесі друку вздовж або поперек осі зразка) значення межі міцності і ударної в'язкості для просочених зразків зростає в порівнянні з непросоченими. Також просочення позитивно впливає на анізотропію міцнісних властивостей конструкції: якщо до виконання просочення різниця в рівні властивостей становила від 2 до 5,5 разів залежно від відсотка заповнення, то після просочення властивості в напрямку вздовж і поперек майже однакові при будь-якому відсотку заповнення.

Оскільки реальна конструкція, виготовлена методом пошарового 3D-друку, буде нести в умовах експлуатації неодноосні та неодноспрямовані навантаження, в різних частинах конструкції одночасно будуть мати місце як умови навантаження, що відповідають змодельованим у зразках типу *вздовж*, так і умови навантаження, що відповідають зразкам типу *поперек*. Таким чином, вибір найбільш оптимального відсотка заповнення для виготовлення конструкцій повинен вестися з урахуванням показників міцності обох видів зразків. За результатами отриманих випробувань можна рекомендувати як найбільш оптимальне з точки зору підвищення міцнісних властивостей у напрямку типу *вздовж* і збереження високих міцнісних властивостей для напрямку типу *поперек* співвідношення між основою і просочувальним складом 33:77 %.

3.5 Результати дослідження залежності механічних властивостей композитів від складу просочувального компаунда та режиму затвердіння

3.5.1 Результати випробувань на розтягнення

Зразки з чистої епоксидної смоли з різними затверджувачами і режимами затвердіння після проведення випробувань представлені на рис. 3.13. Затвердіння при підвищеній температурі призводить до потемніння смоли; також можна помітити, що зразки з затверджувачем ТЕТА більш прозорі, ніж зразки з затверджувачем ПЕПА; останні мають жовтуватий відтінок, що повторює колір самого затверджувача. Вигляд зламу крихкий. Крихкий характер руйнування підтверджується також виглядом діаграми розтягування, на якій відсутня площа текучості (рис. 3.14). На рис. 3.15 представлені усереднені за результатами випробування партії з трьох зразків значення міцності чистої епоксидної смоли з різними затверджувачами і режимами затвердіння.



а - затверджувач ТЕТА, затвердіння при $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$; б - затверджувач ТЕТА, затвердіння при $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$; в - затверджувач ПЕПА, затвердіння при $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$; г - затверджувач ПЕПА, затвердіння при $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3.13 - Зразки з чистої епоксидної смоли після випробувань на розтягнення

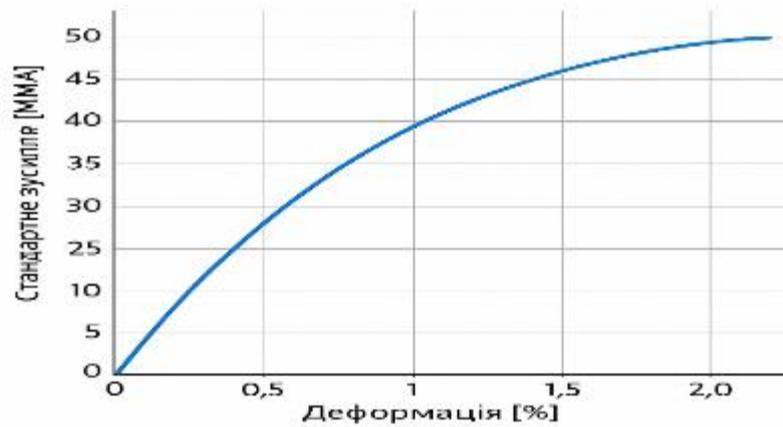


Рисунок 3.14 - Типовий вигляд машинної діаграми розтягування зразків з епоксидної смоли

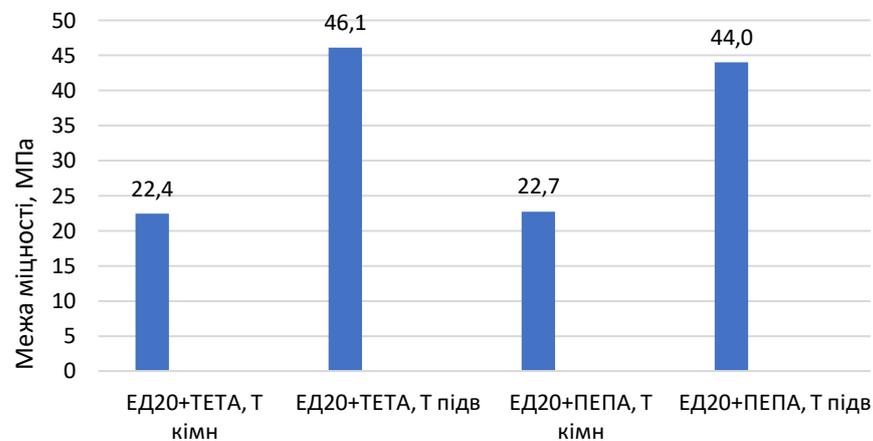


Рисунок 3.15 - Результати випробувань на розтягнення зразків з чистої епоксидної смоли з різними затверджувачами та режимами затвердіння

Використання двоступеневого режиму затвердіння, що складається з витримки при кімнатній температурі протягом 24 годин і подальшої витримки при температурі 90 °С протягом 5 годин, призводить до значного збільшення міцності в порівнянні з режимом затвердіння при кімнатній температурі протягом 5 діб. Зразки, затверділі при підвищеній температурі, мають міцність у два рази вище в порівнянні із затверділими при кімнатній температурі при обох видах використовуваного затверджувача. При цьому від виду затверджувача міцність не залежить: в обох випадках максимальні показники міцності становили близько 45 МПа. Отримані значення міцності узгоджуються з очікуваними значеннями тільки для затверджувача ПЕПА. У випадку ж затверджувача ТЕТА заявлена міцність удвічі вища за отриману при реальних

випробуваннях. Знижений показник міцності в даному випадку може бути пов'язаний з неправильно підбраною пропорцією між основою і затверджувачем, оскільки властивості епоксидних смол дуже чутливі до даного параметра.

Результати випробувань просочених 3D-друкованих зразків із заповненням 33 % і різним напрямком укладання шарів пластику в процесі друку представлені на рис. 3.16 і 3.17. Також на цих рисунках наведено значення міцності непросочених каркасів з аналогічною геометрією. Діаграма розтягування за видом відповідає діаграмі розтягування зразка з епоксидної смоли, руйнування зразків крихке.

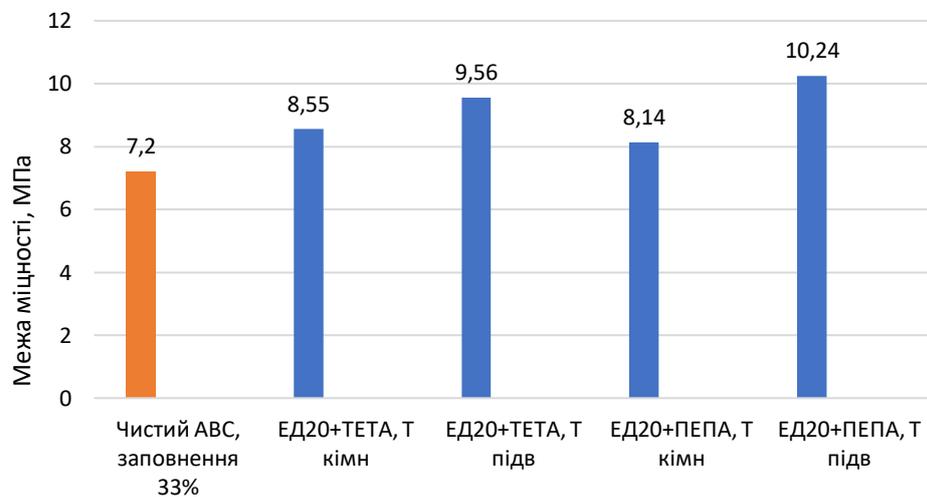


Рисунок 3.16 - Результати випробувань на розтягнення просочених зразків з напрямком укладання шарів пластику вздовж осі зразка

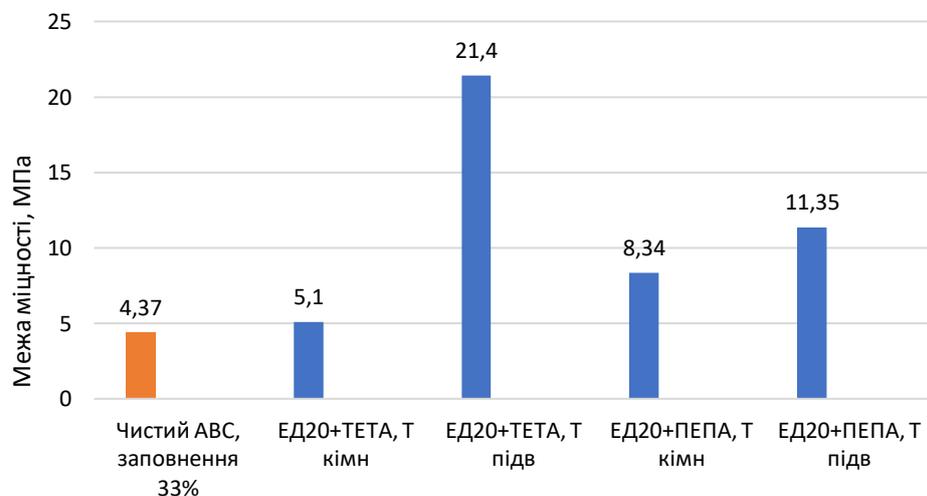


Рисунок 3.17 - Результати випробувань на розтягнення просочених зразків з напрямком укладання шарів пластику поперек осі зразка

Як видно на наведених вище малюнках, міцність просочених зразків у порівнянні з непросоченими підвищилася при всіх варіантах виконання просочення, проте приріст міцності не настільки значний, як очікувалося. Знаючи міцність чистої смоли і чистого 3D-друкованого каркаса, можна оцінити теоретичну міцність композиції за допомогою закону адитивності, розглянутого в другому розділі даної роботи:

$$\sigma = V_{\text{кар}} \cdot \sigma_{\text{кар}} + V_{\text{смоли}} \cdot \sigma_{\text{смоли}}, \quad (3.5)$$

де $V_{\text{кар}}$, $V_{\text{смоли}}$ - об'ємні частки каркаса і смоли відповідно;

$\sigma_{\text{кар}}$, $\sigma_{\text{смоли}}$ - міцність каркаса і смоли відповідно.

Приймаючи за міцність смоли отримане експериментально максимальне значення міцності (46,1 МПа, що відповідає використанню затверджувача ТЕТА і двоступеневого режиму затвердіння), в якості значення міцності каркаса відповідні експериментальні значення міцності чистого ABS із заповненням 33%, то значення міцності композиту на основі каркасів типу вздовж очікувано може становити:

$$\sigma_{\text{вздовж}} = 0,33 \cdot 7,20 + 0,67 \cdot 46,1 \approx 33,3 \text{ МПа},$$

а міцність композиту на основі каркасів типу поперек

$$\sigma_{\text{поперек}} = 0,33 \cdot 4,37 + 0,67 \cdot 46,1 \approx 32,3 \text{ МПа}.$$

За результатами випробувань можна спостерігати, що найближчим до розрахункового значення виявився результат для партії зразків на основі каркаса типу *поперек* з просоченням компаундом з затверджувачем ТЕТА і затвердженням при підвищеній температурі (21,4 МПа). Решта просочених зразків продемонстрували значно нижчу міцність. Для встановлення причини низької міцності зразки були додатково піддані візуальному огляду. Було встановлено, що в зламах переважної частини зразків відсутня смола (рис.3.18). Таким чином, низькі міцнісні властивості зразків, мабуть, пов'язані з поганою якістю просочення досліджуваної партії матеріалів.



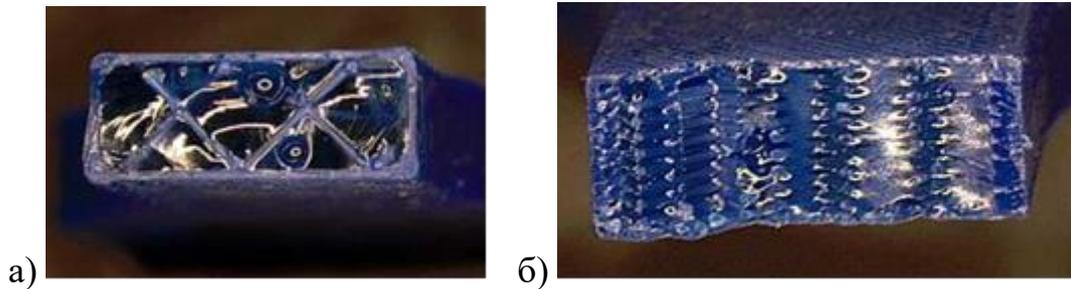
Рисунок 3.18 - Злами зразків, випробуваних на розтягнення

В цілому за результатами проведених випробувань на міцність просочених зразків можна відзначити, що як і у випадку з чистою смолою, зразки, затверділі при двоступеневому режимі (24 години при кімнатній температурі, 5 годин при температурі 90°C) демонструють більш високі показники, хоча відмінності в даному випадку не такі значні, як у випадку з чистою смолою (зростання міцності при використанні двоступеневого режиму затвердіння на просочених зразках становило переважно в середньому 23 %, тоді як на чистій смолі цей показник досягає 100 %). У серії зразків типу вздовж найбільша міцність спостерігалася в зразках, просочених компаундом на основі смоли ЕД-20 з затверджувачем ПЕПА з подальшим двоступеневим режимом затвердіння при підвищеній температурі - 10,24 МПа проти вихідних 7,20 МПа, і хоча у відносному вираженні приріст досить значний (близько 40 %), в абсолютному вираженні зростання міцності досить мале. У серії зразків типу поперек найбільше значення міцності спостерігалось на зразках, просочених компаундом на основі смоли ЕД-20 з затверджувачем ТЕТА з подальшим двоступеневим режимом затвердіння при підвищеній температурі - 4,37 МПа проти 21,40 МПа.

3.6 Результати фактографічного дослідження композитів

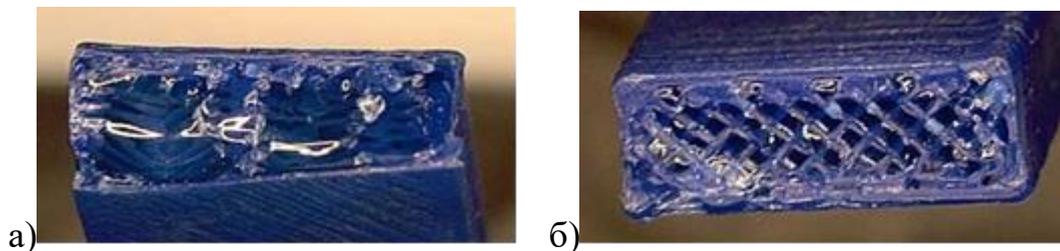
В результаті вивчення зломів було виявлено, що деформація складових компонентів композиційного матеріалу однакова, не спостерігається виривання матеріалу, розшарування та інші дефекти межі розділу, що свідчить про сильну міжшарову адгезію (міцність межі велика). Також встановлено, що відсутня

площадка пластичної течії, що свідчить про крихке руйнування матеріалу, що підтверджується і діаграмою розтягування. Фотографії зломів представлені на рис. 3.19 і 3.20.



а) - напрямок укладання шарів поперек осі; б) - напрямок укладання шарів уздовж осі

Рисунок 3.19 - Фотографії зломів зразків для випробувань на розтягнення



а) - напрямок укладання шарів уздовж осі; б) - напрямок укладання шарів поперек осі

Рисунок 3.20 - Фотографії зломів зразків для випробувань на ударне навантаження

Також варто відзначити, що на фотографіях видно наявність пор. Переважно руйнування зразків на розтягнення відбувалося по перетину, де спостерігається найбільша кількість порожнин. Зразки, які випробовувалися на ударну в'язкість, переважно руйнувалися по надрізу. Характер розподілу пористості, вивчений на зламках, в цілому повторює і підтверджує закономірність, отриману при дослідженні пористості методом гідростатичного зважування.

На мікроскопі високої роздільної здатності з великим збільшенням були досліджені межі розділу пластика ABS і компаунда. На рис. 3.21 показаний приклад незаповненої області.



Рисунок 3.21 - Зображення бульбашки повітря в просоченому зразку

У даній області смола проникла в пору, яка була задана конструкційно, але при цьому бульбашка повітря, яка була менше цієї пори, не встигла вийти зі зразка. В результаті у зразку залишаються незаповнені області, які є концентраторами напружень і впливають на рівень механічних властивостей.

На рис. 3.22 більш детально представлена межа розділу в ПКМ. Як видно з рисунку, відшарування одного матеріалу від іншого не відбувається, отже, адгезія між компонентами висока.



Рисунок 3.22 - Зображення межі розділу пластик-компаунд

Також варто відзначити, що на матеріалі смоли видно текстуровану поверхню з орієнтованими смугами. Це може свідчити про те, що при руйнуванні компаунд зазнає значних напружень, які найсильніші поруч з концентраторами напружень (пора на рисунку). У зоні дефекту структури поверхня більш текстурована, а смуги більш яскраво виражені.

3.7. Висновки за розділом

1. Для дослідження залежності механічних властивостей композиту від геометрії каркаса заплановано виготовлення зразків з відсотками заповнення 20, 33 і 50 %, а також з орієнтацією шарів пластику вздовж і поперек осі зразка з

оптимальною тривалістю витримки при просочуванні, виявленою на попередній групі зразків. Для дослідження залежності механічних властивостей від складу просочувального компаунда і режиму затвердіння після просочення заплановано виготовлення зразків для випробувань на розтягнення і ударну в'язкість із заповненням 33% і одинарною товщиною стінки. В якості матеріалів на даному етапі обрано

2. У зразках композиту, виготовлених для випробувань на розтяг і ударну в'язкість, рівень пористості був оцінений за допомогою методу гідростатичного зважування. В середньому пористість склала близько 18% і мала невеликий розкид в залежності від параметрів виготовлення зразка (в межах $\pm 0,5\%$). Даний рівень пористості може істотно вплинути на механічні властивості зразків при випробуваннях, у зв'язку з чим в подальшому параметри просочення були скориговані для поліпшення якості.

3. Отримано залежність міцності та ударної в'язкості композиту на основі 3D-друкованого каркаса з ABS-пластику із заповненням 33 % та напрямками укладання шарів пластику вздовж і поперек осі зразка від складу просочувального компаунда – виду використовуваного для смоли ЕД-20 затверджувача, ТЕТА або ПЕПА, і режиму затвердіння, одноступінчастого – при кімнатній температурі протягом 5 діб, або двоступінчастого – при кімнатній температурі протягом 24 годин з подальшою додатковою витримкою при 90 °С протягом 5 годин. Застосування двоступеневого режиму затвердіння замість одноступеневого дозволяє підвищити міцність композитів на 25 %, з 8,14 МПа до 10,24 МПа, а ударну в'язкість майже в два рази, з 3,7 до 6,2 кДж/м². Застосування в якості затверджувача ТЕТА в порівнянні з ПЕПА підвищує механічні властивості на 15 %.

РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ВИКОНАННІ РОБІТ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ 3D-ПРИНТЕРА

4.1 Загальні вимоги безпеки та охорони праці на підприємствах

Охорона праці є одним з ключових елементів організації виробничого процесу та забезпечення стабільної роботи підприємства. Вона базується на комплексі правових, соціально-економічних, організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на збереження життя, здоров'я та працездатності працівників у процесі трудової діяльності. Законодавчу основу складають Закони України Про охорону праці, Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування, Про пожежну безпеку, а також чинні державні стандарти, правила і норми безпеки [27].

На кожному підприємстві повинна діяти система управління охороною праці, яка включає планування заходів, ідентифікацію небезпечних факторів, оцінювання ризиків, контроль виконання нормативних вимог та інформування працівників. Одним із фундаментальних принципів є створення таких умов праці, за яких рівень професійного ризику є прийнятним і керованим.

До базових вимог охорони праці відносяться:

- дотримання трудового законодавства та забезпечення безпечних умов роботи;
- проведення навчання, інструктажів, стажування та перевірки знань із питань охорони праці;
- забезпечення працівників засобами індивідуального захисту (ЗІЗ);
- регулярне технічне обслуговування та контроль справності обладнання;
- запровадження заходів попередження аварійних ситуацій;
- дотримання правил пожежної безпеки, електробезпеки та виробничої санітарії;
- постійний моніторинг мікроклімату, рівнів шуму, вібрації, хімічних речовин.

На виробництвах, де використовуються цифрові технології, роботизоване обладнання, адитивні технології або робота з полімерними матеріалами, до загальних вимог додаються спеціалізовані положення, що враховують особливості роботи з електронними пристроями, лазерними системами, нагрівальними елементами та леткими продуктами полімеризації.

Особливу увагу слід приділяти організації робочого місця. Воно повинно бути достатньо просторим, добре освітленим та обладнаним вентиляційною системою. Розміщення обладнання має забезпечувати вільний доступ для технічного обслуговування, а меблі та інвентар — відповідати ергономічним вимогам. Усі легкозаймисті та хімічно активні матеріали повинні зберігатися у спеціальних контейнерах згідно з нормами.

4.2. Вимоги безпеки при проведенні друку на 3D-принтері

Сучасні 3D-принтери використовують різні технології: FDM/FFF (екструзія пластику), SLA/DLP (фотополімеризація), SLS/SLM (лазерне спікання порошків) та інші методи адитивного виробництва. Кожна з них має особливості, що вимагають дотримання окремих правил безпеки.

Загальні вимоги:

Перед початком роботи оператор повинен пройти відповідний інструктаж.

Принтер встановлюється на міцній рівній поверхні, ізолюється від джерел вологи та високої температури.

Усі елементи підключаються через справні електромережі з наявністю заземлення та захисту від короткого замикання.

Забороняється користуватися пристроєм із пошкодженими проводами, несправними датчиками чи відкритими електричними контактами.

У приміщенні має бути забезпечена примусова або природна вентиляція, що гарантує видалення парів, аерозолів та дрібнодисперсних частинок.

Вимоги під час підготовки до друку:

Підготовка моделі проводиться на окремому комп'ютері, розміщеному поза прямою дією нагрівальних елементів.

Завантаження філаментів або фотополімерів здійснюється у ЗІЗ (рукавички, окуляри, маска/респіратор типу FFP2–FFP3 при роботі з фотополімерними смолами).

Заборонено торкатися сопла екструдера, нагрівального стола або лазерного модуля під час розігріву — температура може досягати 200–300 °C і більше.

Вимоги під час друкування:

Оператор повинен контролювати процес через оглядові вікна або датчики відеоспостереження, не відкриваючи кришку принтера, якщо це не передбачено конструкцією.

У разі появи стороннього запаху, диму або шуму необхідно негайно зупинити друк та вимкнути обладнання.

Забороняється переміщувати принтер або змінювати налаштування, торкаючись рухомих частин.

Принтери технології SLA/DLP повинні працювати в закритому корпусі, що захищає від УФ-випромінювання.

Вимоги після завершення друку:

Виріб знімають лише після повного охолодження платформи та екструдера.

Фотополімерні моделі промивають у спеціальних контейнерах із спиртом або розчинником, забезпечуючи захист шкіри та органів дихання.

Приміщення необхідно провітрити протягом 10–15 хвилин після роботи.

Проводиться очищення принтера від залишків смол, пластику чи порошків, дотримуючись рекомендацій виробника.

4.3. Шкідливі та небезпечні фактори при роботі з 3D-принтером

Використання 3D-принтерів пов'язане з впливом ряду потенційно небезпечних виробничих факторів. Їх виявлення та мінімізація є ключовою умовою безпечної експлуатації обладнання.

Розглянемо фактори, які найбільше впливають на безпеку при використанні 3D-принтерів.

1. Термічні фактори: нагрівальні елементи (екструдера, платформи) можуть досягати надзвичайно високих температур, що загрожує ризиком опіків при випадковому контакті з гарячими деталями. Також у разі перегріву можливе загоряння пластику.

2. Хімічні фактори: FDM-матеріали (ABS, PETG, Nylon) виділяють у процесі плавлення леткі органічні сполуки (ЛОС) та мікрочастинки.

Фотополімерні смоли є токсичними, можуть спричинити алергічні реакції, дерматити та подразнення слизових оболонок.

Порошкові матеріали (SLS/SLM) є небезпечними при вдиханні та здатні формувати вибухонебезпечні аерозолі.

3. Механічні фактори: рухомі елементи принтера можуть спричинити травмування пальців чи одягу, якщо проникнути в робочу зону, а неправильне кріплення корпусу чи стола може спричинити падіння обладнання.

4. Також принтери споживають значну потужність, що створює ризики електротравм, коротких замикань та загорянь.

Крім того, неякісні або пошкоджені кабелі можуть бути джерелом іскріння.

5. Радіаційні та світлові фактори: SLA/DLP-принтери працюють із ультрафіолетовим випромінюванням, небезпечним для органів зору та шкіри.

Лазерні установки SLS/SLM становлять серйозний ризик для очей та вимагають спеціального захисту.

6. Полімери є легкозаймистими, при перегріванні або неправильному встановленні температур можливе займання філаменту або смоли.

Також при використанні невідповідних блоків живлення значно підвищується ризик пожежі.

В таблиці 4.1. наведені можливі ризики при роботі з 3D-принтером.

Таблиця 4.1 – Ризики при роботі з 3D-принтером

№	Небезпечний / шкідливий фактор	Джерело виникнення	Потенційні наслідки	Ймовірність (1–5)	Тяжкість (1–5)	Рівень ризику (L = P × S)	Заходи зниження ризику
1	Висока температура нагрівальних елементів	Екструдер, нагріта платформа	Опіки, загоряння матеріалу	4	4	16 (високий)	Термозахисні рукавички, контроль температури
2	Виділення летких органічних сполук (ЛОС)	Плавлення ABS, PETG, Nylon	Отруєння, подразнення дихальних шляхів	4	3	12 (середній/високий)	Вентиляція, респіратори FFP2–FFP3
3	Токсичність фотополімерних смол	SLA/DLP-принтери	Хімічні опіки, дерматити	3	4	12 (середній/високий)	ЗІЗ, герметичні контейнери
4	Мікрочастинки полімерів і порошоків	SLS/SLM-принтери	Потрапляння в легені, алергія	3	5	15 (високий)	Фільтрація HEPA, маски FFP3
5	УФ-випромінювання	SLA/DLP-системи	Пошкодження очей, опіки шкіри	3	4	12	Закриті корпуси, УФ-окуляри
6	Лазерне випромінювання	SLS/SLM лазерні модулі	Травми очей	2	5	10 (середній)	Закритий корпус, датчики блокування

7	Пожежна небезпека	Перегрів, коротке замикання	Пожежа	3	5	15 (високий)	Якісні блоки живлення, вогнегасник CO ₂
8	Електротравми	Пошкоджені кабелі	Ураження струмом	2	5	10 (середній)	Огляд кабелів, заземлення
9	Механічні травми	Рухомі елементи принтера	Порізи, защемлення	3	3	9 (середній)	Захисний кожух
10	Недостатній мікроклімат	Температура, вентиляція	Перевтома	2	2	4 (низький)	Нормалізація мікроклімату

Ймовірність (1–5): 1 – майже неможливо, 5 – дуже ймовірно.

Тяжкість (1–5): 1 – легкі наслідки, 5 – важкі, загрозливі життю.

$L = P \times S$: інтегральний показник ризику.

Градація рівнів ризику: 1–5 – низький; 6–10 – середній; 11–15 – високий; 16–25 – критичний

4.4. Висновки

Забезпечення безпеки та охорони праці при роботі з 3D-принтерами є важливою складовою організації виробничого процесу. Використання адитивних технологій застосовується у різних галузях — від машинобудування до медицини, тому контроль небезпечних факторів має бути системним і всебічним.

В результаті аналізу встановлено, що:

- робота з 3D-принтером пов'язана з впливом термічних, хімічних, механічних, електричних та пожежних ризиків.

- безпечна експлуатація обладнання забезпечується за рахунок проведення інструктажів, застосування ЗІЗ, вентиляції, регулярного технічного обслуговування та контролю справності пристроїв.

- дотримання вимог безпеки дозволяє мінімізувати негативний вплив шкідливих факторів на оператора та навколишнє середовище.

- комплексне впровадження профілактичних заходів забезпечує підвищення надійності, стабільності та продуктивності виробничих процесів, у яких застосовуються технології 3D-друку.

РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТИПОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАПАСНИХ ЧАСТИН ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-ДРУКУ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

5.1. Розрахунок для випадку заміни пальця мотовила зернозбирального комбайна John Deere

На мотовилах сучасних зернозбиральних комбайнів, особливо на іноземних моделях, застосовують пластикові пальці. Оскільки пальці іноді потрапляють в систему різання під впливом ваги і прогину мотовила, їх використання дозволяє знизити ризики пошкодження дорогих ріжучих частин комбайна, виготовлених з металу. Металевий палець в цьому випадку завдає великої шкоди ріжучій частині, тоді як пластиковий легко зрізається без пошкоджень самої ріжучої частини. Крім того, такий палець дешевший за металевий аналог. На рисунку 5.1 представлені пальці мотовила, що застосовуються на комбайнах John Deere.



а)



б)

Рис. 5.1 - Мотовило зернозбиральних комбайнів John Deere (а) і
пластикові пальці, що встановлюються на них (б)

У процесі роботи комбайна ці пальці іноді ламаються через помилки в експлуатації. За експертними оцінками, ймовірність такого роду відмови становить близько 6%. Через відносну рідкість виходу з ладу сільгоспвиробники

часто не тримають на складах цю деталь, проте без неї подальша експлуатація комбайна небажана, оскільки призводить до втрат врожаю. У цьому випадку підприємство змушене шукати запасну частину у дилерів. Мінімальний термін поставки зазначеної запасної частини за даними дилерів на липень 2025 року становить 3 -7 днів, протягом яких зернозбиральний комбайн буде простоювати або експлуатуватись з порушенням технології збирання.

При перестойі врожайність культур зменшується через осипання. Чим вищий термін перестою, тим нижча врожайність. Вартість денних втрат врожаю через простої зернозбирального комбайна за i -й день можна оцінити за такою формулою, отриманою на основі аналізу джерел [29]:

$$C_{\text{ш}} = (Y_{i-1} - Y_i) \cdot Ц \cdot W_{\text{дн}} \quad (5.1)$$

де Y_i - врожайність культури в i -й день, т/га;

Y_{i-1} - врожайність культури в попередній день Y - максимальна врожайність культури, т/га;

$Ц$ - закупівельна (здавальна) ціна продукції, грн./т;

$W_{\text{дн}}$ - денна продуктивність комбайна, га/день.

Залежність врожайності озимої пшениці від терміну збирання представлена на рисунку 5.2.

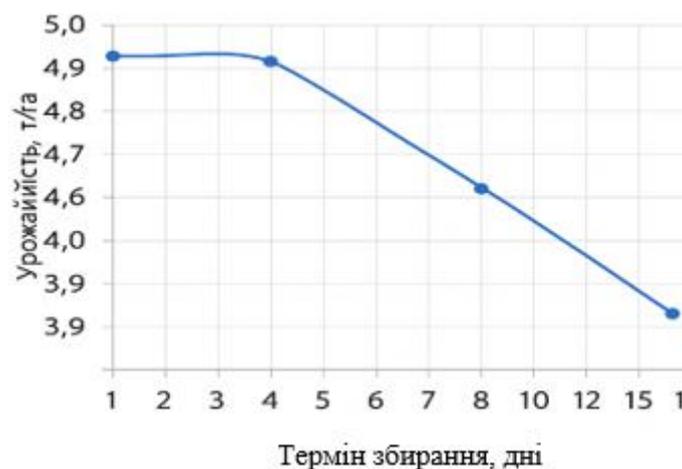


Рисунок 5.2 - Врожайність озимої пшениці залежно від терміну збирання

Закупівельна ціна озимої пшениці 3 класу за даними на 01.10.2025 становить 8850 – 10125 грн в залежності від регіону приймемо середню ціну $C = 9000,0$ грн/т.

Добову продуктивність зернозбирального комбайна можна обчислити за такою формулою [29]:

$$W_{\text{дн}} = 0,1 \cdot B_p \cdot V_p \cdot \tau_{\text{см}} \cdot T_{\text{см}}, \quad (5.2)$$

де B_p - робоча ширина захвату, м;

V_p - робоча швидкість, км/год;

$\tau_{\text{см}}$ - коефіцієнт використання змінного часу;

$T_{\text{см}}$ - тривалість зміни, год.

Приклад робочої ширини захвату для комбайна John Deere моделі 616R, вона становить $B_p = 4,9$ м. Решту величин приймемо згідно з рекомендаціями: $V_p = 7$ км/год; $\tau_{\text{см}} = 0,63$; $T_{\text{см}} = 7$ год. У такому випадку денна продуктивність комбайна становитиме

$$W_{\text{дн}} = 0,1 \cdot 4,9 \cdot 7 \cdot 0,63 \cdot 7 = 15,13 \text{ га / день.}$$

(5.3)

Таким чином, знаючи денну продуктивність комбайна, за формулою (5.2) можна обчислити втрати, що припадають на кожен день простою зернозбирального комбайна, починаючи з повної стиглості. Результати розрахунків наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Результати розрахунків втрат від простою зернозбирального комбайна з моменту настання повної стиглості

День простою	1	2	3	4	5	6	7
Збитки, грн	1187	1187	1187	1187	7122	9496	10683
День простою	8	9	10	11	12	13	14

Збитки, грн	11871	9496	10863	10683	10863	10863	10863
-------------	-------	------	-------	-------	-------	-------	-------

Аналізуючи таблицю 5.1, можна зробити висновок, що втрати від простою комбайна в перші дні після настання стиглості не настільки високі, але вони збільшуються на порядок, якщо відмова сталася в середині рекомендованого терміну збирання, який зазвичай становить близько 8-10 днів. Для виконання подальших розрахунків приймемо гіпотезу, що відмова пальця відбулась в середині агростроку, тобто на 4 день. У такому випадку, простій протягом 7 днів під час очікування запасної частини спричинить втрати вартості продукції в розмірі

$$П_7 = 7122 + 9496 + 10683 + 11871 + 9496 + 10683 + 10683 = 70214 \text{ грн.} \quad (5.4)$$

Простій комбайна можна скоротити до двох днів, якщо використовувати для ремонту технологію виготовлення запасних частин за допомогою 3D-друку з вакуумним просоченням. У цьому випадку втрати становитимуть

$$П_2 = 7122 + 9496 = 16618 \text{ грн.} \quad (5.5)$$

Для оцінки економічного ефекту слід також врахувати вартість самих запасних частин. Як показав огляд пропозицій дилерів, вартість оригінального пальця становить близько 100 грн. Розрахунок вартості виготовлення пальця за допомогою технології 3D-друку з вакуумним просоченням можна провести за допомогою формул. У цьому випадку вартість пальця складе 1176 грн. Тоді економічний ефект при одному випадку відмови від використання технології складе

$$E = 70214 + 100 - (16618 + 1176) = 52520 \text{ грн.} \quad (5.6)$$

5.2 Висновки за розділом

Була проведена оцінка економічного ефекту розробленої технології для випадку заміни пальця мотовила зернозбирального комбайна John Deere.

При ремонті мотовила зернозбирального комбайна John Deere через відмову пальця запасні деталі є у продажу, але оскільки комбайн іноземного виробництва, існують складнощі з швидкою поставкою запасних частин. За проведеними оцінками мінімальний термін поставки даної запасної частини становить 7 днів. При виготовленні запасного пальця замість того, що вийшов з ладу, термін ремонту знизиться до 2 днів. У зв'язку з цим оцінювалися втрати від простою зернозбирального комбайна на період ремонту, пов'язані зі зниженням врожайності культури через осипання. Економічний ефект в даному випадку склав 52520 грн для одного випадку відмови.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено спосіб виготовлення полімерних запасних частин для сільськогосподарської техніки, який передбачає на першому етапі 3D-друк каркаса деталі з термопластичного полімеру за допомогою технології FDM, а на другому етапі зміцнювальне вакуумне просочення отриманої конструкції в термореактивному полімері.

2. Розроблено методику розрахунку максимально можливої товщини деталі в умовах вакуумного просочення 3D-друкованого каркаса полімерними компаундами на основі використання рівняння Нав'є-Стокса-Дарсі, що описує процес просочення пористих структур. Розрахована максимально можлива товщина деталі в умовах вакуумного просочення 3D-друкованого каркаса із заповненням 33 % епоксидною смолою ЕД-20, яка склала 622 мм.

3. Розроблено математичну модель залежності просочуваності 3D-друкованого каркаса від товщини стінок і відсотка заповнення в результаті проведеного експерименту на основі D-оптимального плану. За допомогою даної моделі виявлено параметри, що відповідають максимальному значенню просочуваності – кількість стінок 2 шт., заповнення 50 %.

Встановлено залежність міцності та ударної в'язкості композитів на основі 3D-друкованих каркасів від відсотка заповнення та напрямку укладання шарів пластику в процесі друку. Механічні властивості просочених зразків у порівнянні з непросоченими зростають утричі, коефіцієнт анізотропії знижується з 5,5 до 0,94. На основі критерію рівномірності для виготовлення запасних частин сільськогосподарської техніки 3D-друком з вакуумним просоченням рекомендовано застосовувати заповнення при друку 33 %.

4. Встановлено залежність міцності та ударної в'язкості композиту на основі 3D-друкованого каркаса із заповненням 33 % та напрямками укладання шарів пластику вздовж і поперек осі зразка від складу просочувального компаунда – виду використовуваного для смоли ЕД-20 затверджувача, ТЕТА або ПЕПА, і режиму затвердіння, одноступінчастого – при кімнатній температурі протягом 5 діб, або двоступінчастого – при кімнатній температурі протягом 24

годин з подальшою додатковою витримкою при 90 °С протягом 5 годин. Максимальні показники досягнуті при використанні затверджувача ТЕТА і двоступеневого режиму затвердіння, у зв'язку з чим зазначені параметри рекомендовані для виготовлення запасних частин 3D-друком з вакуумним просоченням.

5. Розроблено типовий технологічний процес виготовлення запасних частин для сільськогосподарської техніки з полімерних композиційних матеріалів із застосуванням 3D-друку та вакуумного просочення.

Проведено оцінку економічної ефективності розробленого технологічного процесу, яка показала, що при виготовленні запасних частин 3D-друком з подальшим просоченням їх вартість в 5,4 рази нижча, ніж при використанні механічної обробки за рахунок застосування менш дорогого обладнання та інструментів. Також при виготовленні запасних частин 3D-друком з вакуумним просоченням терміни ремонту іноземної техніки з тривалими термінами поставок запчастин скорочуються в три рази, в результаті чого економічний ефект від скорочення простоїв у разі ремонту зернозбиральних комбайнів становить близько 52 тис. грн. на один випадок відмови.

ЛІТЕРАТУРА

1. Huang, S., Chen, H., & Wang, Y. (2025). *On-demand additive manufacturing of spare parts: Opportunities and challenges for industrial supply chains*. *Journal of Additive Manufacturing Processes*, 14, 112–128. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790825001521>
2. Сливка Д.М. (2025). Застосування технологій 3D-друку для виготовлення деталей транспортної та сільськогосподарської техніки. *Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу»* (21 листопада 2025 року), ДДАЕУ, Дніпро, (с. 56–59).
3. Кагадій С.В. Основи механіки матеріалів і конструкцій: навчальний посібник / Кагадій С.В., Демяненко А.Г., Гурідова В.О. – Дніпропетровськ : Вид-во Свідлер А.Л., 2011. – 416 с.
4. Мельянцов П.Т. Методичні рекомендації «Організація та технологія ремонту МТП в умовах сільськогосподарського підприємства» / Мельянцов П.Т., Калганков Є.В., Кириленко О.І. – Д.: ДДАУ, 2010. – 125 с.
5. Ремонт машин та обладнання: підручник для вищих навчальних закладів / [Дирда В.І., Мельянцов П.Т., Калганков, Є.В. та ін.]. – Дніпропетровськ: Журфонд, 2015. – 292 с.
6. Калганков, Є., (2022). Поліпшення фізико-механічних властивостей гуми шляхом її модифікації фулереном C₆₀. У: *Теоретичні та практичні питання аграрної науки, 18 травня 2022, Дніпро, Україна*. Дніпро: ДДАЕУ. с. 95–97.
7. Пат. 119244 Україна, МПК7 МПК G01N 33/44 (2006.01). Пристрій для випробувань гумових елементів на стирання [Текст] / Дирда В.І.; Калганков Є.В.; Черній О.А.; Цаніді І.М.; Калганков Б.В.. u201602207; заявл. 09.03.2016 ; опубл. 25.09.2017, бюл. № 18- 4с.
8. Черній О. Деякі проблеми технічної надійності сільськогосподарських тракторів JOHN DEERE. The 7 th International scientific and practical conference “Innovations and prospects of world science”(March 2-4, 2022) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2022. С. 13–19.

9. Shemyakin, A. V. (2024). Galvanic Fe–Ni–P coatings for restoration of worn parts of agricultural machinery and process equipment. *Izvestiya NV AUK*. Retrieved from

<https://agris.fao.org/search/en/providers/122613/records/67656b11fccf879925c10e47>

10. Kalhankov, Ye.V.(2017), “Features of fractal analysis of fractured surfaces of the rubber liners, which work in conditions of abra-sive and fatigue wear”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 133, pp. 66-74.

11. Umysky, S. (2024). Restoration of parts of agricultural equipment by electrodeposition of iron–boride coatings. *Restoration of parts of agricultural equipment*. Retrieved from <https://lib.osau.edu.ua/jspui/handle/123456789/5019>

12. Kumar, A., & Gupta, R. K. (2003). *Fundamentals of polymer engineering* (2nd ed.). Marcel Dekker.

13. Xometry. (2023, April 15). *Polymer vs. metal: What are the differences?* Xometry Resources. <https://www.xometry.com/resources/materials/polymer-vs-metal>

14. Arthur, D. E., Ogbonna, U. I., & Maduelosi, N. J. (2013). A review on the assessment of polymeric materials used as corrosion inhibitors. *International Journal of Industrial Chemistry*, 4(2), 1–9. <https://doi.org/10.1186/2228-5547-4-2>

15. Oladele, I. O., Daramola, O. O., & Adewuyi, B. O. (2025). Sustainable polymer and polymer-based composite materials for engineering applications: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 36, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.XXXX>

16. Hussain, A. R. J., AlAjmi, A., Al-Mulla, A., Roy, A., & Alhajeri, H. (2017). Review of polymers for heat exchanger applications. *Applied Thermal Engineering*, 113, 1118–1139. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.123>

17. AlMaadeed, M. A. A. (2020). Polymers to improve the world and lifestyle: Physical, mechanical and chemical needs. In *Polymer Science and Innovative Applications* (pp. 1–30). Elsevier.

18. Калганков, Є., (2022). Поліпшення фізико-механчних властивостей гуми шляхом її модифікації фулереном C60. У: *Теоретичні та практичні питання аграрної науки*, 18 травня 2022, Дніпро, Україна. Дніпро: ДДАЕУ. с. 95–97.

19. IMARC Group. (2025). *3D Printing Market Size, Share, and Growth Forecast 2025–2033*. IMARC Group.
20. Grand View Research. (2024). *3D Printing Market Size & Share | Industry Report, 2030*. Grand View Research.
21. Ochoa, T. A., Daza, J. R., & Garzon, J. (2023). On-Demand Manufacturing of Agricultural Spare Parts Using 3D Printing Technology. *Research Journal of Agricultural Sciences*, 14(1), 1–6.
22. Wang, S., Wang, H., & Liu, G. (2024). Review and Research Prospects on Additive Manufacturing Technology for Agricultural Manufacturing. *Agriculture*, 14(8), 1207. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081207>
23. BuyAnyPart 3D prints spare parts for farming equipment [Электронный ресурс] // 3DPrintingIndustry URL: <https://3dprintingindustry.com/news/buyanypart-3d-prints-spare-parts-for-farming-equipment-141100/>
24. Wits W.W. How additive manufacturing enables more sustainable end-user maintenance, repair and overhaul (MRO) strategies / W.W. Wits, G.J.R. Reyes, B.J.M. Jauregui // *Procedia CIRP*. – 2016. – № 40. – P. 693-698.
25. Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2021). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
26. Durgashyam K. Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method / K. Durgashyam, I.M. Reddy, A. Balakrishna et al. // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – V. 18. – P. 2052–2059.
27. Пугач, А., Черній, О. та Калганков, Є., (2023). Дослідження ефекту релаксації напруження та залишкової деформації сучасних полімерних матеріалів для захисту поверхонь деталей від зношування. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 8(39), 76–84.
28. Агальцов, Г. М., Лисиця, М. І., Новікова, А. В., & Калганков, Є. В. (2024). Оцінка та управління ризиками, пов'язаними з виробничим шумом та вібраціями на виробництві. У *«ПОТУРАЇВСЬКІ ЧИТАННЯ»: матеріали XXI*

Всеукр. наук.-техн. конф., присвяч. 102- річниці з дня народження акад. НАН України В.М. Потораєва (с. 61-62). НТУ Дніпровська політехніка.
<https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/10825>

29. Лебеденко О.В. Методичні рекомендації з економічного обґрунтування дипломних проектів і робіт для студентів факультету механізації сільського господарства, (кафедра надійності і ремонту машин) за напрямом підготовки "Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва" / Лебеденко О.В. Дніпропетровськ: ДДАУ, 2011. – 16 с.

ДОДАТКИ

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра «Інжинірингу технічних систем»

**ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ ПОЛІМЕРНИХ ДЕТАЛЕЙ**

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

Виконав: студент 2 курсу, групи МІАТ-1-24
Слява Дмитро Миколайович

Керівник: доцент, к.т.н.
Толстенко Олександр Васильович

Дніпро-2025

Метою даної роботи є зниження витрат на реновацію технічних засобів за рахунок застосування 3D-друку з вакуумним просоченням для запасних частин з полімерних композиційних матеріалів.

ЗАДАЧІ РОБОТИ

1. Розробити спосіб виготовлення полімерних запасних частин для сільськогосподарської техніки з використанням 3D-друку на основі аналізу існуючих підходів.
2. Розробити методіку експериментальної оцінки просочуваності 3D-друкованих каркасів полімерними компаундами у вакуумі.
3. Провести експериментальні дослідження впливу геометричних параметрів 3D-друкованих каркасів на їх просочуваність полімерними компаундами та механічні властивості отриманих композиційних матеріалів.
4. Провести експериментальні дослідження впливу складу просочувального компаунда та режиму затвердіння на механічні властивості композиційних матеріалів на основі 3D-друкованих каркасів.
5. Розробити типовий технологічний процес виготовлення запасних частин для сільськогосподарської техніки з полімерних композиційних матеріалів із застосуванням 3D-друку та вакуумного просочення і оцінити його економічну ефективність.

Відомості про відмови полімерних деталей



а - деталь промислового водоочисного фільтра мембранного типу; б – корпус турбінного водоміра; в - крильчатка турбінного водоміра; г - черв'ячна пара турбінного водоміра; д - корпус розпилювачів самохідних обприскувачів
 Деталі виготовлені з полімерного матеріалу

№ за п/п	Найменування	Габаритні розміри, мм	Умови роботи деталей	Матеріал	Інформація щодо вартості та умов придбання
1	Деталь промислового водоочисного фільтра мембранного типу	120 x 180	Очищення води від зважених частинок розміром понад 80 мкм	Поліетилен або нейлон	Деталь окремо не продається, картридж в зборі з даною деталлю 5600 грн.
2	Корпус турбінного водоміра	100 x 110 x 110	Контакт з гарячою проточною водою, інтенсивний знос, гідроудари	АБС, зміцнений короткими волокнами	Деталі окремо не продаються, новий лінійник 6000 грн.
3	Крильчатка турбінного водоміра	80 x 80	Контакт з гарячою проточною водою, інтенсивний знос	Ударостійкий полістирол або поліпропілен	
4	Черв'ячна пара турбінного водоміра	40 x 50; 12 x 12	Контакт з гарячою проточною водою, інтенсивний знос	Нейлон	Деталь окремо не продається, розпилювач в зборі 150 грн.
5	Корпус розпилювачів самохідних обприскувачів	15 x 10	Малі статичні навантаження, поломки відбуваються в результаті чищення	Поліпропілен	



Зовнішній вигляд ливарної машини



Одночерв'ячний екструдер

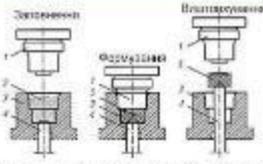
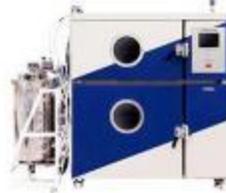


Схема технологічного процесу переробки термоактивних матеріалів методом пресування
 1 – пуансон; 2 – полімерний порошок; 3 – матриця; 4 – виштохувач; 5 – виріб



Автоматична вакуумно-ливарна машина FVC-2A

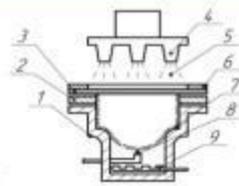


Схема півє матичного формування виробу з полімерних матеріалів:
 1 – матриця ліній керування вакуумом; 2 – проставка; 3 – лист полімеру; 4 – сошла; 5 – струмені гарячого повітря; 6 – притискач; 7 – готовий виріб; 8 – кінцевий вимісач; 9 – канал відсмоктування повітря

Аналіз випадків застосування 3Д-друку для виготовлення запасних частин різних машин



а - ручка дверей автомобіля KIA Shuma; б - шестерня модуля стоянкового гальма автомобіля LAND ROVER; в - зубясте колесо склоочисника автомобіля Mazda»



Відновлення вал-пестерні зубчато-ремінної передачі садового тримера

5

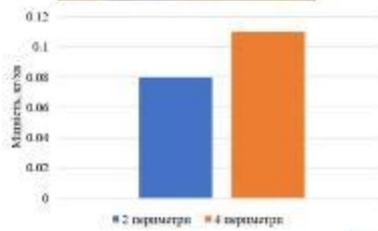
ОГЛЯД МАТЕРІАЛІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ПРИ ЗД-ДРУКУ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ FDM



	Технологічні властивості				Експлуатаційні властивості		
	Темп. екструзії, °C	Темп. столу, °C	Мікшарова адгезія	Усадка, %	Темп. експлуатації, °C	Межа міцності, МПа	Відносна подовження, %
PLA	190-230	20-60	добра	нет	-20...+40	25	3,8
ABS	210-245	90-120	середня	до 0,8	-40...+80	35	6
PETG	215-245	70-80	дуже висока	ні	40...+70	36	50
SBS	220-240	70-90	низька	0,2	-80...+65	34	250
Flex	220-240	90-110	добра	0,35-0,8	-100...+100	18	600
Nylon	235-260	100-120	висока	1	-30...+120	70	300
PC	270-310	90-110	висока	3	40...+120	57	4,8

6

ПАРАМЕТРИ ДРУКУ, ПОВ'ЯЗАНІ З ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ МАТЕРІАЛУ



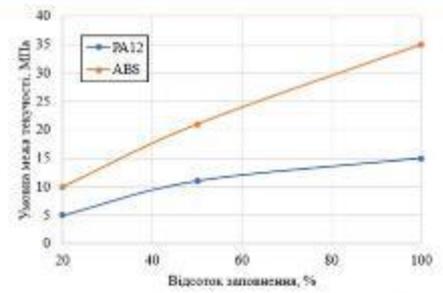
Зразки з товщиною стінки в два і чотири периметри (а) і питома міцність даних зразків (б)



Основні види заповнення, що застосовуються при 3D-друку, зліва направо: суцільне, кругле, шестикутне, лінійне

Міцність 3D-друкованих зразків з різними видами заповнення

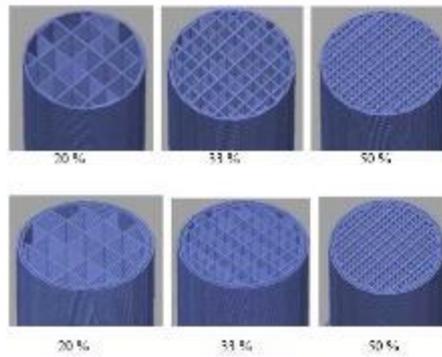
Вид заповнення	Межа міцності, МПа	Вага, г	Питома міцність, МПа/г
Суцільне	17,82	1,176	40,66
Кругле	34,30	0,760	45,13
Шестикутне	42,25	0,582	72,59
Лінійне	51,01	0,760	67,12



Залежність умовної межі міцності 3D-друкованих зразків із пластиків акрилонітрилбутадієстирол (ABS) і поліамід-12 (PA12) від відсотка заповнення



3D принтер Crealty
K1 max



Перерізи 3D-моделей просочених зразків

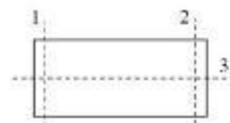
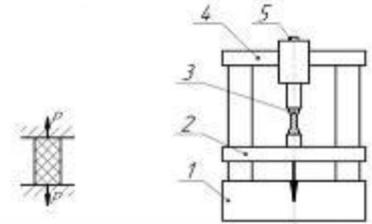


Схема розрізу просочених зразків

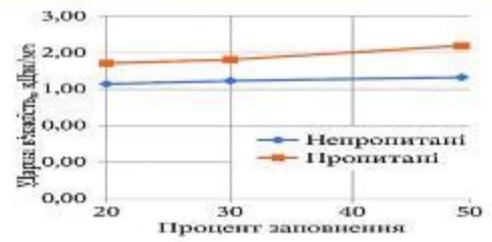


Зразки для дослідження механічних
властивостей
композиційного матеріалу

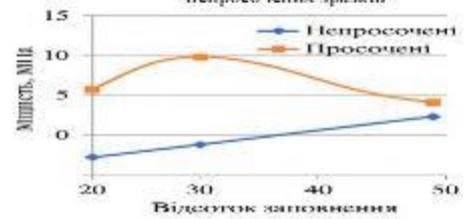


а - схема прикладання навантаження; б - схема
випробувальної машини Випробування матеріалів
на одноосьове статичне розтягнення

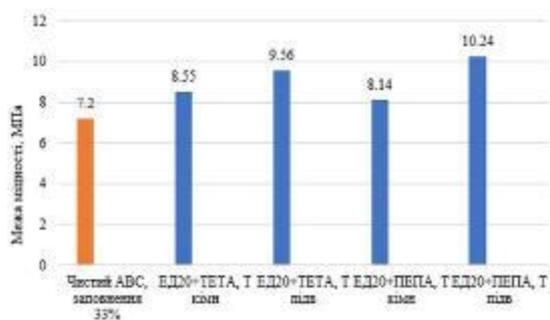
№ зразка	Відсоток заповнення		
	20%	33%	50%
	Непросочені зразки		
1	1,0	3,0	5,0
2	1,0	3,0	6,0
3	1,0	3,0	7,0
середнє	1,0	3,0	6,0
	Просочені зразки		
1	8,5	13,0	7,5
2	7,0	10,0	-
3	8,0	12,0	10,0
середнє	7,8	11,7	8,8



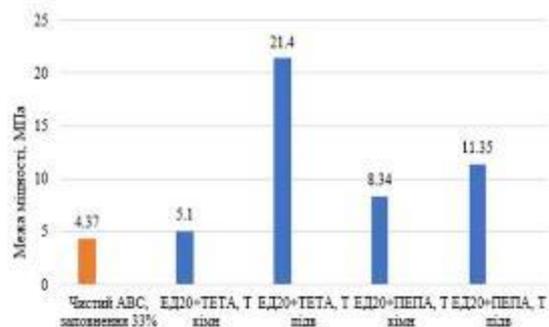
Залежність міцності зразків типу вздовж від відсотка заповнення для просочених і непросочених зразків



Залежність міцності зразків типу поверх від відсотка заповнення для просочених і непросочених зразків



Результати випробувань на розтягнення просочених зразків з напрямком укладання шарів пластику вздовж осі зразка



Результати випробувань на розтягнення просочених зразків з напрямком укладання шарів пластику поперек осі зразка

Ризики при роботі з 3D-принтером

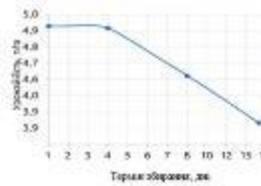
№	Небезпечний / шкідливий фактор	Джерело виникнення	Потенційні наслідки	Ймовірність (1–5)	Тяжкість (1–5)	Рівень ризику (L = P × 5)	Заходи зниження ризику
1	Висока температура нагрівальних елементів	Екструдер, нагріта платформа	Опіки, загоряння матеріалу	4	4	16 (високий)	Термозахисні рукавички, контроль температур
2	Бидієтнів летких органічних сполук (ЛОС)	Плавлення ABS, PETG, Nylon	Огрудіння, подразнення дихальних шляхів	4	3	12 (середній/високий)	Вентиляція, респіратори FFP2–FFP3
3	Токсичність фотополімерних смол	SLA/DLP-принтери	Хімічні опіки, дерматити	3	4	12 (середній/високий)	ЗІЗ, герметичні контейнери
4	Мікрочастинки полімерів і порошоків	SLS/SLM-принтери	Потрапляння в легені, алергія	3	5	15 (високий)	Фільтрація HEPA, маски FFP3
5	УФ випромінювання	SLA/DLP системи	Пошкодження очей, опіки шкіри	3	4	12	Закриті корпуси, УФ-окуляри
6	Лазерне випромінювання	SLS/SLM лазерні модулі	Травми очей	2	5	10 (середній)	Закритий корпус, датчики блокування
7	Пожежна небезпека	Перегрів, коротке замикання	Пожежа	3	5	15 (високий)	Якісні блоки живлення, вогнегасник CO ₂
8	Електротравми	Пошкоджені кабелі	Ураження струмом	2	5	10 (середній)	Огляд кабелів, заземлення
9	Механічні травми	Рухомі елементи принтера	Порізи, защемлення	3	3	9 (середній)	Захисний кожух
10	Недостатній мікроклімат	Температура, вентиляція	Перевтома	2	2	4 (низький)	Нормалізація мікроклімату



Мотовило зернозбиральних комбайнів John Deere



Пластиковий палець мотвила



Урожайність озимої пшениці залежно від терміну збирання

Характеристика пальця мотвила

Вага	0.06	кг
Внутрішній діаметр	35	шт
Діаметр отворів кріплення	3.5	мм
Загальна ширина	117	мм
Довжина	275	мм
Висота	50	мм

Показник	Значення
Вартість оригінального пальця John Deere	100 грн
Собівартість виготовлення пальця 3D-друком з просоченням	1176 грн
Мінімальний термін поставки оригінальної деталі	3-7 днів
Термін виготовлення деталі за технологією 3D-друку	1-2 дні
Скорочення простою комбайна	2-5 днів
Економічні втрати при очікуванні постачання (орієнтовно)	включено в кінцевий ефект
Економічний ефект при використанні 3D-друку	52520 грн/випадок
Рентабельність застосування технології	висока (попад 40× економічний виграв)

1. Розроблено спосіб виготовлення полімерних запасних частин для сільськогосподарської техніки, який передбачає на першому етапі 3D-друк каркаса деталі з термопластичного полімеру за допомогою технології FDM, а на другому етапі зміцнювальне вакуумне просочення отриманої конструкції в термореактивному полімері.

2. Розроблено методичку розрахунку максимально можливої товщини деталі в умовах вакуумного просочення 3D-друкованого каркаса полімерними компаундами на основі використання рівняння Нав'є-Стокса-Дарсі, що описує процес просочення пористих структур. Розрахована максимально можлива товщина деталі в умовах вакуумного просочення 3D-друкованого каркаса із заповненням 33 % епоксидною смолою ЕД-20, яка склала 622 мм.

3. Розроблено математичну модель залежності просочуваності 3D-друкованого каркаса від товщини стінок і відсотка заповнення в результаті проведеного експерименту на основі D-оптимального плану. За допомогою даної моделі виявлено параметри, що відповідають максимальному значенню просочуваності – кількість стінок 2 шт., заповнення 50 %.

Встановлено залежність міцності та ударної в'язкості композитів на основі 3D-друкованих каркасів від відсотка заповнення та напрямку укладання шарів пластику в процесі друку. Механічні властивості просочених зразків у порівнянні з непросоченими зростають утричі, коефіцієнт анізотропії зникається з 5,5 до 0,94. На основі критерію рівномірності для виготовлення запасних частин сільськогосподарської техніки 3D-друком з вакуумним просоченням рекомендовано застосовувати заповнення при друку 33 %.

4. Встановлено залежність міцності та ударної в'язкості композиту на основі 3D-друкованого каркаса із заповненням 33 % та напрямками укладання шарів пластику вздовж і поперек осі зразка від складу просочувального компаунда – виду використовуваного для смоли ЕД-20 затверджувача, ТЕТА або ШЕНА, і режиму затвердіння, одноступінчастого – при кімнатній температурі протягом 5 діб, або двоступінчастого – при кімнатній температурі протягом 24 годин з подальшою додатковою витримкою при 90 °С протягом 5 годин. Максимальні показники досягнуті при використанні затверджувача ТЕТА і двоступеневого режиму затвердіння, у зв'язку з чим зазначені параметри рекомендовані для виготовлення запасних частин 3D-друком з вакуумним просоченням.

5. Розроблено типовий технологічний процес виготовлення запасних частин для сільськогосподарської техніки з полімерних композиційних матеріалів із застосуванням 3D-друку та вакуумного просочення.

Проведено оцінку економічної ефективності розробленого технологічного процесу, яка показала, що при виготовленні запасних частин 3D-друком з подальшим просоченням їх вартість в 5,4 рази нижча, ніж при використанні механічної обробки за рахунок застосування менш дорогого обладнання та інструментів. Також при виготовленні запасних частин 3D-друком з вакуумним просоченням терміни ремонту іноземної техніки з тривалими термінами поставок запчастин скорочуються в три рази, в результаті чого економічний ефект від скорочення простоїв у разі ремонту зернозбиральних комбайнів становить близько 52 тис. грн. на один випадок відмови.

Міністерство освіти і науки України
Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Інженерно-технологічний факультет



**ІНЖИНІРИНГ ТЕХНОЛОГІЙ І
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
АГРОПРОМИСЛОВОГО
КОМПЛЕКСУ**

ЗБІРНИК ТЕЗ

**IV Всеукраїнської науково-практичної конференції
молодих вчених**

**Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового
виробництва**

21 листопада 2025 р.

Дніпро • 2025

*Рекомендовано до друку вченою радою
Інженерно-технологічного факультету
Дніпровського державного аграрно-економічного університету
(протокол № 3 від 25 листопада 2025 р.)*

*Захід внесено в реєстр УкрІНТЕІ
(посвідчення № 729 від 20 жовтня 2025 р.)*

Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро, ДДАЕУ, 2025. – 286 с.

Викладено матеріали наукових досліджень, виконаних вченими науково-дослідних установ та закладів вищої освіти з питань впровадження сучасного інжинірингу технологій і технічних систем агропромислового комплексу України. Видання представляє інтерес для науковців, викладачів, аспірантів, студентів аграрних і біологічних вузів та сільгоспвиробників.

Автори опублікованих тез доповідей відповідальні за патентну чистоту і точність наведених фактів, цитат, власних імен, географічних назв, а також за розголошення даних, які не підлягають публікації у відкритих засобах масової інформації.

УДК 621.9:004.94:629.1

Сливка Д.М., здобувач вищої освіти СВО Магістр, ОПП Агроінженерія²³

dsau_npm@ukr.net

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНОЇ ТА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

Сучасний розвиток транспортної, автомобільної та сільськогосподарської техніки вимагає швидкого, економічно ефективного та технологічно гнучкого виготовлення деталей. Проблема доступності запасних частин, особливо для машин з тривалим строком служби та імпортного походження, ускладнює технічне обслуговування. У таких умовах адитивні технології, зокрема 3D-друк, стають важливим інструментом для оперативного виготовлення деталей різної складності [1].

Переваги 3D-друку полягають у можливості швидко отримувати прототипи та функціональні елементи з достатнім запасом міцності для застосування в автомобілях, тракторах та сільськогосподарських знаряддях. Висока точність побудови забезпечує відтворення складної геометрії, а сучасні полімери та композити дозволяють створювати зносостійкі й довговічні деталі. На рис. 1 наведено приклад сучасного 3D-принтера, що використовується для таких завдань.

Особливо цінною є можливість виготовлення деталей безпосередньо на підприємстві або в польових умовах, що мінімізує прості техніки. До найпоширеніших деталей, які доцільно друкувати, належать корпуси механізмів, елементи кріплення, шестерні з помірним навантаженням, кожухи, прокладки,

²³ Науковий керівник – Толстенко О.В., кандидат технічних наук, доцент кафедри інжинірингу технічних систем

патрубки та інші компоненти. Використання армованих полімерів на основі скловолокна або вуглецевого волокна підвищує їхню міцність і термостійкість.



Рисунок 1 - 3D-принтер Crealty K1 Max

На рис. 2 показано приклади готових деталей, виготовлених методом 3D-друку та використаних як заміники штатних елементів техніки. Для машин, у яких знос окремих частин є критичним, можливість отримати точну копію деталі зі знизженими витратами значно підвищує ефективність ремонтних робіт. Цифрове моделювання також дозволяє створювати електронні бібліотеки запасних частин і швидко адаптувати їх під конкретні потреби.

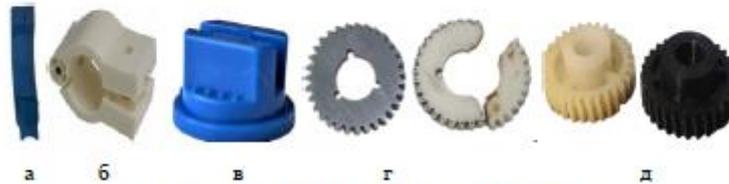


Рисунок 2 – Деталі, виготовлені методом 3D-друку

а – заспокоювач насіння пневматичної сіялки John Deere 1890, б – опора пальців шнека жатки John Deere, в - розпилювач на обрискувач пілінний AP110 Agroplast, г – шестерні склопідіймача, д - дзеркальна передача для KIA Ceed

Важливо, що адитивні технології дають змогу оптимізувати конструкції [2]. Топологічна оптимізація дозволяє зменшити масу, підвищити міцність і збільшити ресурс роботи деталей, що особливо актуально для мобільної та сільськогосподарської техніки. У ряді випадків міцність композитних надрукованих компонентів є співставною з литими або фрезерованими аналогами.

Загалом, впровадження 3D-друку у сферу виготовлення запасних частин сприяє зниженню вартості ремонту, скороченню часу відновлення та підвищенню рівня технічної готовності машин. Це робить адитивні технології перспективним напрямом для підприємств аграрного сектору, машинобудівних заводів та сервісних центрів [3].

Список літератури

1. Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2021). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer.
2. Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business horizons*, 2017; 60(5): 677-688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
3. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196.

Наукове видання

ІНЖИНІРИНГ ТЕХНОЛОГІЙ І ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції
молодих вчених

Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва
(21 листопада 2025 р.)

Мови: українська, англійська

Редактор: Ельчин АЛІЄВ
Комп'ютерна верстка: Ілля БЛЮУС

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
49600, м. Дніпро, вул. Сергія Єфремова, 25

Тел.: (056) 371-08-21
E-mail: technologyengineeringdsau@gmail.com
dsau.dp.ua
133phd.dsau.dp.ua