

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра експлуатації машинно-тракторного парку

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до дипломної роботи

ступеня вищої освіти «Магістр» на тему:

**Обґрунтування конструкції деталей рухомих з'єднань виготовлених з
композитних матеріалів**

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-3-23 за
спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Вітер Віталій Андрійович

Керівник: _____ Макаренко Дмитро Олександрович

Рецензент: _____

Дніпро – 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра експлуатації машинно-тракторного парку

Ступінь вищої освіти: «Магістр»

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ЕМТП

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Деркач О.Д.

(підпис) (прізвище, ініціали)

«___» _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Вітру Віталію Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування конструкції деталей рухомих з'єднань виготовлених з композитних матеріалів

керівник роботи Макаренко Дмитро Олександрович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від

« 12 » листопада 2024 року № 3784

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до проєкту Огляд стану питання в сфері удосконалення рухомих з'єднань сільськогосподарських машин. Аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). Обґрунтування використання полімерно-композитних матеріалів у рухомих з'єднаннях техніки сільського господарства. 2. Теоретичні дослідження втулки з полімерно-композитного матеріалу з додатковим армуванням у вигляді сталюї вставки. 3. Обґрунтування результатів експериментальних досліджень розробленої конструкції втулки з полімерно-композитного матеріалу з використанням армованої вставки 4.

Охорона праці та безпека при роботі з полімерно-композитними матеріалами.
5. Розрахунок економічної ефективності. Загальні висновки. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Тема роботи, основна мета та цілі (2 аркуші, А4). Аналіз впливу робочого середовища на рухомі з'єднання сільськогосподарських машин (1 аркуш, А4). Графічне відображення результатів розрахунків з САЕ (2 аркуші, А4). Огляд отриманих результатів розрахунків (1 аркуш, А4). Огляд залежності результатів від змінних у моделюванні (1 аркуш, А4). Підготовка до виготовлення деталей та проведення лабораторних досліджень (2 аркуші, А4). Огляд та аналіз отриманих результатів лабораторних досліджень (1 аркуш, А4). Економічна ефективність впровадження розробленої деталі (1 аркуш, А4). Загальні висновки (1 аркуш, А4).

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-5	Макаренко Д.О., доцент		
нормоконтроль			

7. Дата видачі завдання: _____

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	27.09.2024	виконано
2	Розрахунково теоретичний	15.10.2024	виконано
3	Експериментальна частина	12.11.2024	виконано
4	Охорона праці	20.11.2024	виконано
5	Економічний	02.12.2024	виконано

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Студент _____

Вітер В.А. _____

№	формат	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	Номер аркуша	примітки
<p>(підпис)</p> <p>Керівник роботи</p>			<p>(прізвище та ініціали)</p> <p><u>Макаренко Д.О.</u></p> <p>(прізвище та ініціали)</p>			

					48 ДР.001 000.000 РД								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Відомість дипломної роботи								
Розроб.	Вітер В.А.									Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.	Макаренко Д.О.										1	1	
Т. Контр.										ДДАЕУ М2АІ-3-23			
Н. Контр.	Макаренко Д.О.												
Затверд.	Деркач О.Д.												

АНОТАЦІЯ

Вітер В.А. Обґрунтування конструкції деталей рухомих з'єднань виготовлених з композитних матеріалів / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». – ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

В дипломній роботі проаналізовано використання полімерно-композитних матеріалів у рухомих з'єднаннях сільськогосподарської техніки. У роботі проведено аналіз основних факторів, що впливають на знос рухомих з'єднань, вивчено фізико-механічні властивості полімерно-композитних матеріалів, а також запропоновано конструкції з додатковими армованими вставками для підвищення їхньої міцності та довговічності. Виконано чисельне моделювання напружень і деформацій із використанням сучасного програмного САЕ забезпечення. Експериментальні дослідження проведено на тестових стендах, що імітують реальні умови роботи техніки. Наведено обґрунтування доцільності застосування розробленої конструкції. Розглянуто вимоги безпеки при роботі з полімерними матеріалами. Проаналізовано економічну ефективність роботи.

Мета дослідження. Основною метою роботи є розробка конструкції деталей рухомих з'єднань із полімерно-композитних матеріалів, які забезпечать ефективну експлуатацію сільськогосподарської техніки. Для досягнення цієї мети використано аналітичні, чисельні та експериментальні методи дослідження.

Наукова новизна. Запропоновано методику поєднання полімерно-композитних матеріалів із армованими вставками для оптимізації характеристик рухомих з'єднань у сільськогосподарській техніці. Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень дозволили встановити залежності між конструктивними параметрами деталей і їхньою ефективністю в реальних умовах експлуатації.

Практичне значення. Розроблені конструкції з полімерно-композитних матеріалів можуть бути впроваджені у виробництво, що дозволить знизити витрати на технічне обслуговування та ремонт сільськогосподарської техніки, підвищити її продуктивність і довговічність. Крім того, використання таких матеріалів сприятиме зменшенню негативного впливу на довкілля через зниження споживання мастильних матеріалів.

Результати. Застосування полімерно-композитних матеріалів у конструкції рухомих з'єднань дозволяє досягти таких переваг, як стійкість до зношування, відсутність необхідності регулярного мащення, зменшення маси деталей та підвищення їхньої корозійної стійкості. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих рішень у складних експлуатаційних умовах аграрного сектору.

Ключові слова: полімерно-композитні матеріали, рухомі з'єднання, вузли тертя, сільськогосподарська техніка, чисельне моделювання, зносостійкість, армування.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1. ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІМЕРНО-КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ У РУХОМИХ З'ЄДНАННЯХ ТЕХНІКИ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА	12
1.1. Умови роботи деталей та вузлів сільськогосподарської техніки	12
1.2. Методи підвищення ефективності, довговічності та надійності трибоспрямижень техніки сільськогосподарства	17
1.3. Огляд існуючих методів забезпечення кращої адгезії полімерно-композитних матеріалів з різними матеріалами	22
1.4. Обґрунтування теми дипломної роботи	25
2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВТУЛКИ З ПОЛІМЕРНО-КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ З ДОДАТКОВИМ АРМУВАННЯМ У ВИГЛЯДІ СТАЛЬНОЇ ВСТАВКИ	26
2.1. Обґрунтування методів теоретичного розрахунку досліджуваної деталі	26
2.2. Проведення теоретичних розрахунків геометричних моделей деталі за допомогою САЕ	33
2.3 Огляд та аналіз отриманих даних попередніх дослідів	37
3. ОБГРУНТУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОЗРОБЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВТУЛКИ З ПОЛІМЕРНО-КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ З ВИКОРИСТАННЯ АРМОВАНОЇ ВСТАВКИ	44
3.1. Підготовка до виготовлення спроектованої втулки та проведення експериментальної частини	44
3.2. Аналіз та обґрунтування отриманих результатів лабораторних досліджень	50
3.3. Висновки до отриманих результатів	56

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПРИ РОБОТІ З ПОЛІМЕРНО-КОМПОЗИТНИМИ МАТЕРІАЛАМИ	58
5. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	61
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Сучасний розвиток сільськогосподарської техніки, яка працює в умовах інтенсивних механічних і хімічних впливів, вимагає застосування матеріалів, що здатні витримувати високі навантаження, забезпечуючи при цьому економічну ефективність та тривалий термін експлуатації. Полімерно-композитні матеріали далі (ПКМ), які об'єднують властивості легкості, стійкості до зношування, високої міцності та корозійної стійкості, відкривають нові можливості для вирішення проблем, з якими стикається техніка в аграрному секторі. Зокрема, їх використання для виготовлення деталей рухомих з'єднань стало перспективним напрямком досліджень.

Актуальність теми. Умови експлуатації сільськогосподарської техніки характеризуються значним зносом рухомих з'єднань, який спричиняється абразивними частинками ґрунту, залишками рослинних матеріалів і впливом агресивних хімічних сполук. Постійна дія цих факторів призводить до зниження ефективності роботи обладнання, збільшення витрат на ремонт і обслуговування, а також до частих простоїв техніки. Традиційні матеріали, такі як сталь, не завжди забезпечують необхідну довговічність у таких умовах. Полімерно-композитні матеріали, завдяки своїй стійкості до зносу та хімічної корозії, а також здатності працювати без додаткового мащення, є ефективною альтернативою.

Крім того, сучасні тенденції розвитку аграрного сектору передбачають мінімізацію негативного впливу технічних засобів на довкілля. Використання деталей із полімерно-композитних матеріалів дозволяє знизити споживання мастильних матеріалів, що є важливим з екологічної точки зору. Тому вивчення можливостей і обмежень цих матеріалів має значну наукову та практичну цінність.

Мета і завдання дослідження. Основною метою роботи є наукове обґрунтування та розробка конструкції деталей рухомих з'єднань із

використанням полімерно-композитних матеріалів, які забезпечать підвищення ефективності й надійності сільськогосподарської техніки. Для досягнення цієї мети виконували такі завдання:

1. Провести аналіз експлуатаційних умов і основних факторів, що впливають на знос рухомих з'єднань у сільськогосподарській техніці.
2. Вивчити фізико-механічні властивості ПКМ та їх адаптивність до умов роботи вузлів тертя.
3. Розробити конструкції рухомих з'єднань із застосуванням ПКМ, включаючи варіанти з армованими вставками.
4. Виконати чисельне моделювання навантажень і напружень у деталях рухомих з'єднань із ПКМ за допомогою сучасного програмного забезпечення.
5. Провести експериментальні дослідження розроблених конструкцій і порівняти їхні характеристики з традиційними рішеннями.
6. Навести вимоги безпеки при роботі з полімерними матеріалами.
7. Виконати економічну оцінку роботи.

Наукова новизна. У роботі проведено комплексний аналіз властивостей ПКМ у контексті їх використання для виготовлення деталей рухомих з'єднань, які працюють в агресивних умовах сільськогосподарського середовища. Розроблено методику поєднання полімерних матеріалів із армованими вставками, що дозволяє досягти оптимального балансу між міцністю, гнучкістю та стійкістю до зношування. Проведено чисельне моделювання процесів експлуатаційного навантаження, що забезпечило наукове обґрунтування вибору конструкційних параметрів деталей.

Методи дослідження. У роботі застосовано аналітичні, чисельні та експериментальні методи дослідження. На етапі аналізу експлуатаційних умов використовувалися статистичні дані щодо зношування вузлів тертя у сільськогосподарській техніці. Для оцінки властивостей матеріалів було виконано лабораторні випробування з використанням сучасного обладнання.

Чисельне моделювання напружень і деформацій виконувалося в програмному САЕ середовищі, що дозволило детально вивчити поведінку деталей під різними видами навантажень. Експериментальні дослідження проводилися на спеціально створених тестових стендах, що імітують умови роботи техніки в полі.

Практичне значення роботи. Отримані результати мають значний потенціал для впровадження у виробництво сільськогосподарської техніки. Використання деталей рухомих з'єднань із ПКМ дозволить підвищити їхню довговічність, знизити витрати на технічне обслуговування та ремонти, а також покращити економічну ефективність підприємств. Крім того, результати роботи сприятимуть зниженню негативного впливу технічних засобів на навколишнє середовище за рахунок зменшення споживання мастильних матеріалів.

Таким чином, розробка й впровадження ПКМ у конструкції деталей рухомих з'єднань є важливим напрямком розвитку техніки, що дозволяє підвищити її надійність, ефективність і екологічність.

1. ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІМЕРНО-КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ У РУХОМИХ З'ЄДНАННЯХ ТЕХНІКИ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

1.1. Умови роботи деталей та вузлів сільськогосподарської техніки

Сільськогосподарська техніка зазвичай експлуатується в агресивних умовах, що спричинені високим рівнем абразивних та агресивних частинок у робочій зоні. Під час виконання багатьох технологічних операцій, таких як обробка ґрунту, посів чи збирання врожаю, робочі органи машин безпосередньо контактують з ґрунтом або рослинною масою. Це призводить до накопичення дрібнодисперсних частинок, які утворюються як з ґрунту, так і з рослинних залишків, підвищуючи запиленість навколишнього середовища у робочій зоні техніки. Особливо інтенсивно це відбувається при виконанні ґрунтообробних операцій, де рівень пилу в повітрі може досягати 5 г/м^3 [5].

Наявність пилу і абразивних частинок створює додаткові навантаження на трибоспряження – механічні з'єднання, які забезпечують рухомість та функціонування вузлів сільськогосподарської техніки [4]. До таких з'єднань належать підшипникові вузли (в колісних механізмах, дисках ґрунтообробної техніки, сошниках, прикочувальних механізмах), а також рухомі частини механізмів копіювання поверхні ґрунту, механізми переведення техніки з транспортного положення в робоче, механізми напрямних маркерів, системи безпеки та стабілізації секцій сівалок, а також вузли дозування насіння і добрив.

Трибоспряження, які функціонують в умовах підвищеної запиленості, піддаються інтенсивному зносу. Потрапляння пилових частинок у зону тертя з'єднань призводить до їхнього абразивного зносу, причому інтенсивність

цього процесу залежить від багатьох факторів, таких як розмір та структура частинок, а також від матеріалу, з якого виготовлені робочі поверхні з'єднань. Наприклад, тверді мінеральні частинки, що містяться у ґрунті, можуть чинити набагато сильніший зносний вплив, ніж м'які органічні залишки [5].

Надмірний знос призводить до поступового погіршення якості роботи сільськогосподарської техніки, зменшуючи її точність і продуктивність, а також підвищуючи витрати на технічне обслуговування і ремонт. Це особливо критично для вузлів, що відповідають за точність посіву або рівномірність розподілу добрив, оскільки навіть незначні похибки можуть вплинути на врожайність. Врахування абразивних властивостей середовища, в якому працюють вузли машин, є важливим фактором для підвищення їхньої зносостійкості та подовження терміну експлуатації, що може бути досягнуто шляхом удосконалення конструктивних рішень, використання спеціальних матеріалів з високою стійкістю до зносу або застосування мастильних матеріалів із захисними властивостями.

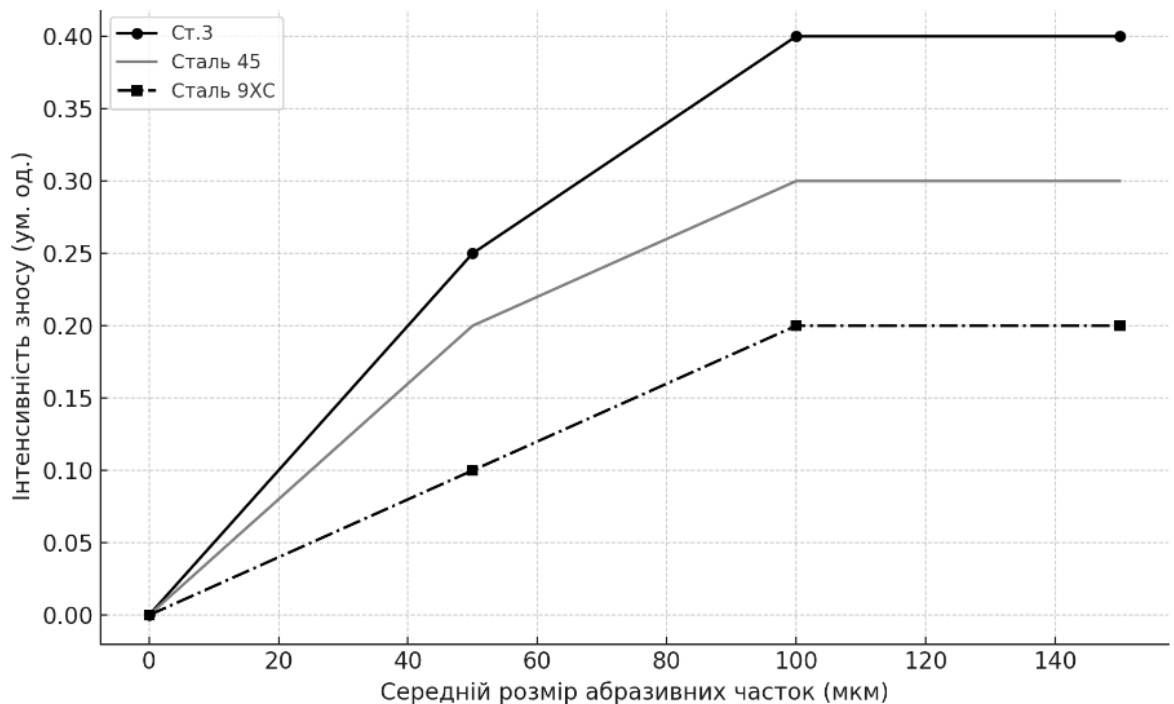


Рис. 1.1. Залежність зносу сталі від розміру абразивних частинок

З аналізу рис. 1.1 видно, що знос деталей при зростанні розміру абразивних частинок підвищується до певної критичної межі, після чого його рівень стабілізується, і подальше збільшення розмірів частинок не впливає на швидкість зносу [25]. Це пояснюється тим, що більші частинки не можуть так активно взаємодіяти з поверхнею тертя, тоді як малі частинки здатні проникати у мікротріщини й заглибини на поверхні, що підсилює їхній зносний вплив.

Існують також відомості, що абразивні частинки розміром до 5 мкм мають особливу поведінку у зоні тертя. В абразивному середовищі такі частинки здатні абсорбувати на своїй поверхні продукти окислення мастильного матеріалу. Це може зменшити інтенсивність зношування поверхонь деталей, оскільки оксидний шар, що утворюється, має певні захисні властивості та діє як мікропрокладка між контактними поверхнями, знижуючи прямий контакт [25].

Розмір пиловидних частинок ґрунту в середньому складає близько 0,06 мм і менше, а їхній вміст у залежності від типу ґрунту може досягати 10–30% загальної маси. Це вимагає особливої уваги до питань зносостійкості матеріалів, що використовуються у трибоспряженнях сільськогосподарської техніки, яка працює в умовах високої запиленості.

Залежність зносу також залежить від додаткових складових які вказані на рисунку 1.2.

При обробці ґрунту, внесенні добрив, ядохімікатів та органічних добавок, таких як гній, зони тертя піддаються взаємодії з агресивними компонентами, що можуть значно прискорювати процеси корозії та зношування [15]. Це зумовлено наявністю кислот, лугів, аміаку, органічних залишків, які вступають у хімічні реакції з поверхнею металу. Такі умови є серйозним викликом для забезпечення тривалого терміну служби деталей та надійності техніки загалом.

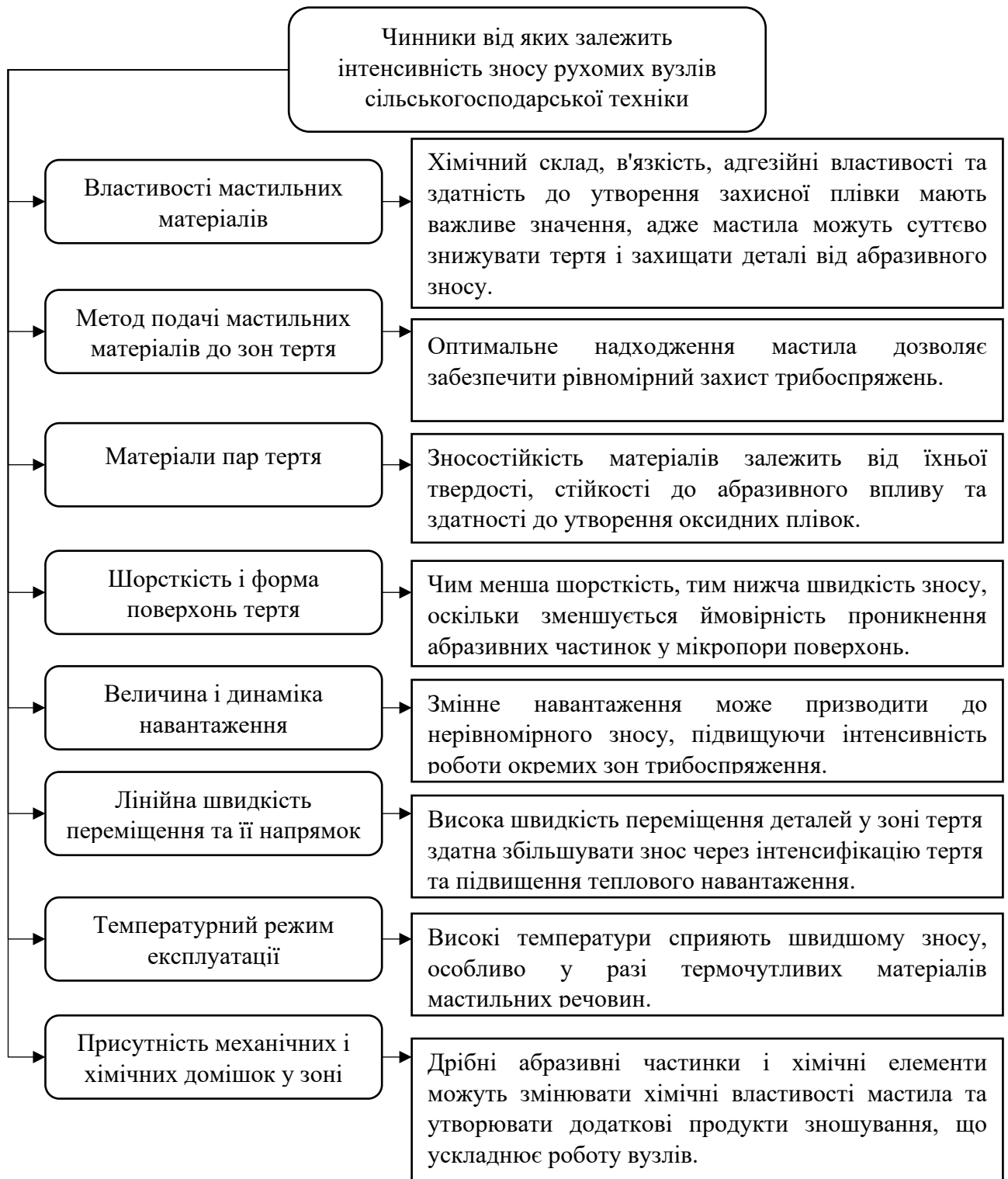


Рис. 1.2. Чинники інтенсивності зносу деталей та вузлів сільськогосподарської техніки

Також всі ці фактори можна умовно розподілити на три групи щоб систематизувати підхід до роботи. Згруповані фактори зносу зображено на рисунку 1.3.



Рис. 1.3. Групи факторів зносу деталей та вузлів сільськогосподарської техніки

Під час внесення ядохімікатів на ґрунт деталі техніки потрапляють у середовище, насичене токсичними та хімічно активними речовинами. Ці речовини можуть не тільки впливати на механічну структуру металу, але й викликати додаткові термічні реакції, що прискорюють деградацію поверхні. Зокрема, пестициди, що використовуються для знищення шкідників, мають високий рівень кислотності або лужності, що сприяє корозійному зносу. Окрім цього, хімічні сполуки можуть залишатися на поверхні деталей навіть після завершення операцій, посилюючи корозійний вплив і знижуючи їх довговічність. Деталі сільськогосподарської техніки також працюють у контакті з мінеральними добривами, які містять нітрати, фосфати та калійні солі [15]. Такі хімічні сполуки можуть мати абразивний характер, що викликає механічне пошкодження поверхні, а також спричиняють корозійні процеси. Наприклад, азотні добрива в умовах підвищеної вологості

утворюють агресивне середовище, в якому частинки добрива осідають на деталях, викликаючи активну хімічну корозію. В результаті цього знижується експлуатаційна придатність техніки, а також зростає потреба в додатковому обслуговуванні та ремонті.

Органічні добавки, такі як гній, хоча і не містять агресивних хімічних компонентів у тій же мірі, що й мінеральні добрива, також чинять негативний вплив на деталі. Гній є джерелом великої кількості органічних речовин та мікроорганізмів, які здатні впливати на поверхні металу, спричиняючи біологічну корозію. Крім того, гній містить аміак, сульфіді та інші речовини, які у вологому середовищі створюють хімічно активне середовище. Вплив органічних речовин разом з механічними частинками у вигляді грубих часток посилює зношування деталей, особливо у місцях з'єднань і контактних поверхнях.

Таким чином, агресивне середовище, в якому працюють деталі та вузли сільськогосподарської техніки, що займається обробкою ґрунту, створює складні умови для їх довговічної роботи [2]. Важливими є розробка та застосування захисних покриттів, вибір стійких до корозії матеріалів, а також регулярне технічне обслуговування, що включає очищення, змащування та обробку антикорозійними засобами. Лише комплексний підхід до забезпечення захисту вузлів може суттєво подовжити термін їх служби та підвищити ефективність роботи сільськогосподарської техніки в умовах агресивного середовища.

1.2. Методи підвищення ефективності, довговічності та надійності трибоспряжень техніки сільського господарства

Рухомі з'єднання сільськогосподарської техніки, що працюють в умовах високих навантажень, потребують ретельного підходу до забезпечення їхньої довговічності. Існують три основні напрями підвищення

довговічності таких з'єднань: конструкторські, технологічні та експлуатаційні методи. Кожен з них спрямований на зниження зношування та захист від агресивного зовнішнього середовища, і їх комплексне використання дозволяє досягти максимальних показників надійності техніки [12].

Конструкторські методи полягають у виборі матеріалів з високою довговічністю та правильному їх поєднанні у трибоспряженнях, тобто у вузлах тертя. Важливим аспектом є забезпечення оптимальних умов мащення та використання сучасних ущільнювачів для захисту від пилу та хімічних речовин. Крім того, значна увага приділяється розробці нових конструкцій рухомих з'єднань, які мінімізують вплив агресивного середовища. Такі методи застосовуються на етапі проєктування або вдосконалення техніки і спрямовані на підвищення технологічності виробництва машин в цілому.

Технологічні методи підвищення довговічності засновані на виготовленні деталей з високою точністю та застосуванні спеціальних зносостійких покриттів [13]. Такі покриття захищають поверхневі шари від механічного зношування і хімічної корозії, що особливо важливо при контакті деталей з абразивними частинками та агресивними речовинами у ґрунті. Відновлення зношених деталей також є поширеною практикою для подовження їхнього терміну служби, зокрема, завдяки технологічним методам можна значно знизити витрати на заміну деталей.

Експлуатаційні методи передбачають забезпечення належних умов роботи трибоспряжень шляхом регулярного технічного обслуговування. Виконання планово-запобіжних ремонтів, а також якісне обкатування нових або відновлених механізмів сприяють підвищенню довговічності вузлів. Крім того, важливим є забезпечення відповідних умов експлуатації, які відповідають інструкціям виробника, що мінімізує можливість передчасного зносу деталей [13]. Основним недоліком цих методів є високі витрати енергетичних, матеріальних та трудових ресурсів на їх реалізацію.

Одним із основних факторів, що впливають на довговічність трибоспряжень, є рівень захисту зон тертя від зовнішнього середовища, зокрема від абразивних частинок та хімічних речовин. Для цього широко використовуються ущільнюючі елементи різних типів: безконтактні, контактні та статичні ущільнювачі. Безконтактні ущільнювачі, такі як манжети, забезпечують захист з невеликим зазором між рухомими та нерухомими деталями, що є особливо ефективним у запилених умовах. Контактні ущільнювачі призначені для трибоспряжень з лінійним або обертальним рухом, а статичні ущільнювачі використовуються для герметизації між деталями та зниження вібрацій [20].

Підшипники кочення та ковзання є основними елементами трибоспряжень у сільськогосподарській техніці. Для підвищення їх довговічності застосовують захисні конструкції, які запобігають потраплянню забруднень і забезпечують оптимальні режими роботи. Наприклад, підшипники типу Y від SKF мають спеціальні ущільнювачі, які захищають їх від зовнішнього середовища, що дозволяє уникнути частого обслуговування. Вітчизняний виробник HARP також пропонує серію підшипників HARP AGRO з системою ущільнювачів X-SHIELD, які мають високий ресурс навіть в агресивному середовищі.

У підшипниках ковзання для зниження зносу та підвищення довговічності використовують мастильні матеріали, що дозволяє зменшити опір тертя, відвести тепло та захистити зону тертя від абразивних частинок. Введення мастил має свої недоліки, зокрема, підвищену силу внутрішнього тертя та обмеження температурного діапазону. Однак, застосування спеціальних консистентних мастил дозволяє досягти значного покращення експлуатаційних характеристик.

Таким чином, підвищення довговічності рухомих з'єднань є комплексною задачею, яка включає конструкторські, технологічні та експлуатаційні заходи. Ретельне дотримання всіх умов зберігання,

обслуговування та експлуатації дозволяє значно продовжити термін служби техніки та знизити витрати на її ремонт та заміну деталей [15].

В процесі роботи трибоспряжень в умовах високих температур, великих навантажень і наявності магнітних полів, що виникають при терті, відбувається явище водневого зношування [17]. Це явище обумовлене тим, що в зоні тертя відбувається інтенсивне виділення водню з різних компонентів, які можуть бути присутні в середовищі тертя – мастильних матеріалів, залишків палива, води та інших речовин [19]. Вивільнений водень накопичується в міжзернових просторах металів, що веде до підвищення напружень і утворення мікротріщин. Таке водневе зношування стає серйозною проблемою для довговічності підшипників, особливо в умовах агресивної експлуатації.

Розробка сплавів і металевих композитів для протидії цьому процесу не дала значних результатів. Тому перспективним напрямом стало використання неметалевих самозмащувальних матеріалів, зокрема полімерно-композитних матеріалів (ПКМ), для підшипників ковзання та інших рухомих з'єднань.

Полімерно-композитні матеріали (ПКМ) є новим рішенням для збільшення довговічності трибоспряжень у різних галузях техніки. ПКМ створюються на основі полімерів, до яких додаються наповнювачі, що покращують їхні властивості – як механічні, так і експлуатаційні. Серед поширених полімерів, що використовуються для створення ПКМ, виділяється поліамід, який часто поєднують з вуглецевими волокнами для підвищення міцності. Такі матеріали володіють унікальними властивостями, що робить їх перспективними для застосування в сільськогосподарській техніці, промислового обладнанні та багатьох інших сферах.

Однією з головних переваг ПКМ є здатність працювати в умовах тертя без мастила, що дозволяє використовувати їх у важкодоступних місцях, де регулярне обслуговування може бути ускладнене або економічно недоцільне.

Крім того, такі матеріали стійкі до заклинювання вузлів, що робить їх надійними навіть за умови часткового руйнування деталей. Важливо також зазначити, що ПКМ практично не зношують спряжені металеві деталі, завдяки чому підвищується загальна довговічність вузлів і механізмів [20].

Застосування ПКМ у підшипниках ковзання має додаткові переваги в агресивних середовищах, де відсутність мастила дозволяє уникнути забруднення робочої зони абразивними частинками та агресивними речовинами, які можуть взаємодіяти з мастильними матеріалами, утворюючи шкідливі хімічні сполуки. Окрім того, полімерні матеріали часто здатні поглинати вібрації, що додатково зменшує знос і підвищує комфортність роботи механізмів.

ПКМ мають широкі можливості адаптації під специфічні потреби завдяки варіаціям у виборі полімерів і наповнювачів. Наприклад, використання вуглецевого волокна або інших твердих частинок може значно підвищити зносостійкість та міцність ПКМ, а також забезпечити їхню стабільність у широкому діапазоні температур. Сьогодні розробки в 10цьому напрямку активно продовжуються, і ПКМ стають незамінними для створення надійних трибоспряжень у техніці, що експлуатується в важких умовах [12].

Таким чином, перспективним напрямком підвищення довговічності підшипників та інших рухомих з'єднань є розробка самозмащувальних ПКМ. Їх використання в агресивних умовах сільського господарства, промисловості та інших сфер дозволяє вирішити низку проблем, зокрема водневе зношування та залежність від мастильних матеріалів, знижуючи витрати на технічне обслуговування і підвищуючи надійність і ефективність роботи техніки.

1.3. Огляд існуючих методів забезпечення кращої адгезії полімерно-композитних матеріалів з різними матеріалами

Адгезія полімерно-композитних матеріалів (ПКМ) з іншими матеріалами є важливою задачею при створенні надійних з'єднань у промислових та інженерних конструкціях. Зважаючи на широкий спектр застосувань ПКМ, забезпечення ефективного з'єднання цих матеріалів з металами, іншими полімерами та самими ПКМ має суттєве значення для довговічності та міцності конструкцій. Для досягнення найкращих показників адгезії використовують спеціальні клеї, що мають високу міцність, стійкість до впливу температур і навантажень, а також здатність забезпечити стабільний адгезійний зв'язок у різних умовах експлуатації.

При з'єднанні полімерно-композитних матеріалів між собою особливу увагу приділяють вибору клеїв, які можуть забезпечити хімічну та механічну сумісність. Одним із найефективніших клеїв для з'єднання ПКМ є епоксидні клеї. Ці клеї мають високі механічні характеристики, забезпечують високу адгезію до різних полімерних поверхонь та можуть витримувати значні навантаження. Популярними марками епоксидних клеїв, які показали високу ефективність при з'єднанні ПКМ, є **Loctite EA 9466**, **3M Scotch-Weld DP420** та **Araldite 2011**. Приклад зображено на рисунку 1.4. Ці клеї мають високу стійкість до дії температур, добре працюють в агресивних середовищах і забезпечують стабільність з'єднання навіть під дією значних навантажень.



Рис. 1.4. Епоксидний клей 3М Scotch-Weld DP420

Крім епоксидних клеїв, широко використовуються поліуретанові клеї, які також забезпечують хорошу адгезію до ПКМ. Поліуретанові клеї відзначаються гнучкістю та стійкістю до динамічних навантажень, що робить їх ефективними для з'єднань, де можливі механічні деформації. До відомих марок поліуретанових клеїв, які добре підходять для з'єднання ПКМ, належать **SikaPower-4720** і **3М DP620**. Приклад зображено на рисунку 1.5. Ці матеріали демонструють високу стійкість до впливу вологи, температурних коливань і мають відмінну адгезію як до ПКМ, так і до металевих поверхонь.



Рис.1.5. Поліуретановий клей SikaPower-4720

Для з'єднання ПКМ з металевими поверхнями, окрім епоксидних і поліуретанових клеїв, можна використовувати метакрилатні клеї, які відзначаються чудовою адгезією до гладких і твердих поверхонь. Вони забезпечують високу міцність з'єднання, особливо при використанні на металевих поверхнях, і є стійкими до хімічних впливів. Популярні марки метакрилатних клеїв включають **Permabond TA4246**, **Henkel Loctite H8000** і **SCIGRIP SG300**. Приклад зображено на рисунку 1.6. Ці клеї забезпечують швидке затвердіння, що є важливим у виробничих процесах, де потрібне швидке складання з'єднань.



Рис. 1.6. Метакрилатний клей Permaglue TA4246

Акрилові клеї також знаходять застосування у з'єднанні ПКМ з різними поверхнями, особливо у випадках, коли потрібна висока стійкість до вібраційних навантажень та температурних коливань. Акрилові клеї, такі як **Loctite 330**, **3M Scotch-Weld DP810**, і **Plexus MA300**, приклад зображено на рисунку 1.7., демонструють хорошу адгезію як до полімерних, так і до металевих поверхонь. Вони мають властивість швидкого схоплювання, що дозволяє використовувати їх у швидких виробничих процесах.



Рис.1.7. Акриловий клей Plexus MA300

Застосування спеціалізованих клеїв для з'єднання ПКМ дозволяє забезпечити високу якість і довговічність з'єднань. Вибір конкретної марки клею залежить від умов експлуатації, таких як температурний режим, рівень навантаження, можливий вплив вологи або агресивних середовищ. Використання сучасних високоякісних клеїв, таких як епоксидні,

поліуретанові, метакрилатні та акрилові, дозволяє надійно з'єднувати ПКМ як між собою, так і з різними іншими поверхнями, забезпечуючи міцність і стабільність конструкцій у найскладніших умовах.

1.4. Обґрунтування теми дипломної роботи

В умовах експлуатації сільськогосподарської техніки, що постійно піддається впливу абразивних частинок і хімічно агресивних речовин, традиційні матеріали для трибоспрязень показують низьку довговічність і швидко виходять з ладу. Як було зазначено в дослідженні, ПКМ мають низьку переваг, що робить їх перспективними для використання в даних умовах. Здатність ПКМ працювати без додаткового мащення та їх висока стійкість до зносу відкривають нові можливості для підвищення ефективності та зниження витрат на обслуговування вузлів сільськогосподарської техніки.

Подальші дослідження мають бути зосереджені на оптимізації складу ПКМ з метою досягнення більш високої зносостійкості та стабільності у змінних кліматичних умовах. Важливою є також розробка нових конструкцій трибоспрязень, що забезпечать максимальне використання унікальних властивостей ПКМ, таких як здатність до демпфування вібрацій і підвищення комфорту роботи обладнання.

Запропоноване дослідження спрямоване на впровадження інноваційних рішень у галузі матеріалознавства для аграрного сектору, що забезпечить суттєве підвищення надійності та ефективності сільськогосподарської техніки.

Саме тому, метою роботи є наукове обґрунтування та розробка конструкції деталей рухомих з'єднань із використанням полімерно-композитних матеріалів, які забезпечать підвищення ефективності й надійності сільськогосподарської техніки.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВТУЛКИ З ПОЛІМЕРНО-КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ З ДОДАТКОВИМ АРМУВАННЯМ У ВИГЛЯДІ СТАЛЬНОЇ ВСТАВКИ

2.1. Обґрунтування методів теоретичного розрахунку досліджуваної деталі

При аналізі характеристик працездатності нової деталі важливо закласти надійну теоретичну основу для розрахунків. Цей розділ висвітлює принципи та методи, які будуть використовуватися для проведення розрахунків, з урахуванням унікальних властивостей матеріалу та конструкційної особливості деталі. Завдяки поєднанню властивостей ПКМ та сталевих армувань є завданням змодельовати розподіл напружень, деформацію та довговічність втулки при робочих навантаженнях [1].

У рамках теоретичних моделей будуть враховані такі параметри, як механічні властивості ПКМ, характеристики сталевих вставок, а також розподіл навантажень, які виникають при експлуатації деталі. Особливу увагу приділено впливу армуючої вставки на жорсткість та міцність втулки, що дозволяє підвищити її зносостійкість і стійкість до деформацій.

Методологія розрахунку базується на застосуванні математичних моделей, які дозволяють врахувати поведінку матеріалу під навантаженням, включаючи пружні та пластичні деформації. Розрахунки проводитимуться з використанням сучасного САЕ забезпечення, що забезпечить точне визначення розподілу напружень та деформацій у межах втулки [1]. Додатково застосовано сіткові методи для побудови поверхневої сітки, що допоможе деталізувати зони максимальних напружень і можливих точок руйнування.

Наступні етапи включають введення формул для розрахунків, визначення навантажень, а також в'язів, які забезпечуватимуть необхідну фіксацію деталі під час її експлуатації.

За основу деталі береться розповсюджений полімер який має назву PA type 6 і має такі фізико механічні властивості:

- Модуль Юнга (Elastic Modulus): 2620000000 Н/м²
- Коефіцієнт Пуассона (Poisson's Ratio): 0.34 (безрозмірний)
- Модуль зсуву (Shear Modulus): 970400000 Н/м²
- Густина (Mass Density): 1120 кг/м³
- Міцність на розрив (Tensile Strength): 90000000 Н/м²
- Міцність на стискання (Compressive Strength): (Н/м²)
- Межа текучості (Yield Strength): 103648886 Н/м²
- Коефіцієнт теплового розширення (Thermal Expansion Coefficient): (1/К)
- Теплопровідність (Thermal Conductivity): 0.233 Вт/(м·К)
- Питома теплоємність (Specific Heat): 1601 Дж/(кг·К)
- Коефіцієнт демпфування матеріалу (Material Damping Ratio): (безрозмірний)

За основу вставки яка буде виконувати функцію армування обираємо матеріал Plain Carbon Steel, який має такі фізико механічні властивості:

- Модуль Юнга (Elastic Modulus): 2.1e+11 Н/м²
- Коефіцієнт Пуассона (Poisson's Ratio): 0.28 (безрозмірний)
- Модуль зсуву (Shear Modulus): 7.9e+10 Н/м²
- Густина (Mass Density): 7800 кг/м³
- Міцність на розрив (Tensile Strength): 399826000 Н/м²
- Міцність на стискання (Compressive Strength): (Н/м²)
- Межа текучості (Yield Strength): 220594000 Н/м²
- Коефіцієнт теплового розширення (Thermal Expansion Coefficient): 1.3e-05 1/К

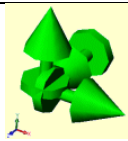
- Теплопровідність (Thermal Conductivity): 43 Вт/(м·К)
- Питома теплоємність (Specific Heat): 440 Дж/(кг·К)
- Коефіцієнт демпфування матеріалу (Material Damping Ratio): (безрозмірний)

Для розрахунку навантажень необхідно задати в'язі по зовнішній поверхні деталі щоб змоделювати вставлену втулку у посадочне місце. Для твердих тіл цей тип обмеження встановлює всі трансляційні ступені свободи рівними нулю. Для оболонок та балок він встановлює нулі як для трансляційних, так і для обертальних ступенів свободи. Для вузлів ферми він встановлює нулі тільки для трансляційних ступенів свободи. Використовуючи цей тип обмеження, геометрія посилання не потрібна.

Узагальнюючі задачі та вхідні дані, необхідні для цього обмеження зображено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Узагальнюючі задачі для фіксації геометрії деталі

Атрибут	Значення
Ступені свободи, що обмежуються для твердих елементів	3 трансляції
Ступені свободи, що обмежуються для оболонок і балок	3 трансляції та 3 обертання
Ступені свободи, що обмежуються для вузлів ферми	3 трансляції
Символ 3D (стрілки для трансляцій і диски для обертань)	
Вибіркові сутності	Вершини, ребра, грані та з'єднання балок
Вибіркова сутність посилання	Немає
Трансляції	Немає
Обертання	Немає

Для моделювання робочих навантажень втулки будемо використовувати задачу яка має назву «Навантаження підшипника», ця

задача враховує саме ту модель розподілення напружень що підходять для цієї задачі та працює за наступними розрахунками.

Програма розподіляє навантаження на підшипник радіально та нерівномірно по поперечному перерізу циліндричної поверхні або ребра оболонки.

Синусоїдальне розподілення навантаження

На рисунку 2.1 зображено поперечний переріз циліндричної поверхні або ребра оболонки, залежно від вибору. Для детальніших ілюстрацій визначення півпростору з розділу «Навантаження на підшипники».

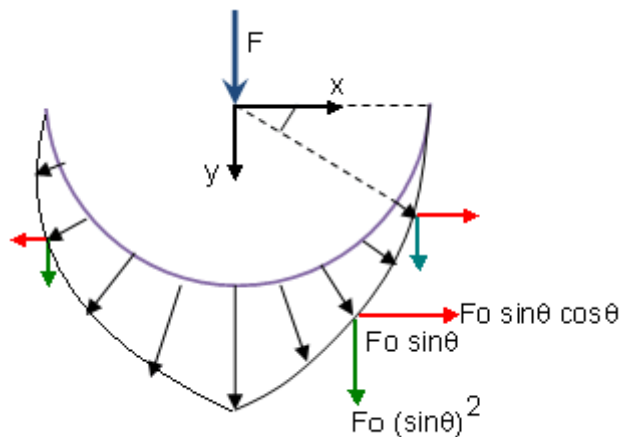


Рисунок 2.1. Синусоїдальне розподілення навантаження

Прикладене навантаження позначене як F . Програма розподіляє це навантаження на кожен вузол вздовж окружності вибраних граней або поперечного перерізу вибраних поверхонь, використовуючи вираз $F_o \sin \theta$. На малюнку 2.1 показані компоненти навантаження по осях x і y , відповідно, червоними та зеленими стрілками. Значення F_o розраховується на основі рівноваги сил.

$$F = \sum_{i=0}^n (F_o)_i \sin^2 \theta \quad (2.1)$$

n — кількість вузлів, що розташовані вздовж окружності.

Для параболічного розподілу зображеного на рисунку 2.2, навантаження переноситься на кожен вузол вздовж окружності за формулою:

$$F_o(1 - x^2) \quad (2.2)$$

Що спрощується до:

$$F_o \sin^2 \theta \quad (2.3)$$

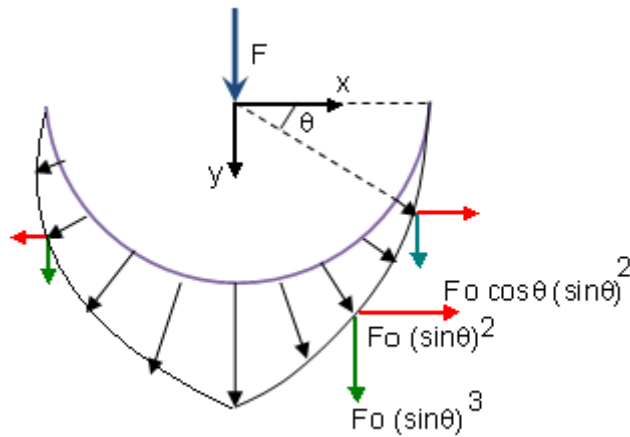


Рис.2.2 Схема параболічного розподілу навантажень

Значення F_o визначається через вимогу рівноваги сил.

$$F = \sum_{i=0}^n (F_o)_i \sin^3 \theta \quad (2.4)$$

Тут n — кількість вузлів вздовж окружності.

У наведених вище прикладах горизонтальна компонента сил, позначена червоними стрілками, компенсується через симетричний вибір сутностей. Рекомендується забезпечити симетричність також для мережі.

Додаткове навантаження зображено на рисунку 2.3 застосовується, коли вибрані поверхні або ребра не є симетричними відносно вказаного напрямку навантаження на підшипник. Якщо додаткове навантаження перевищує 5% від прикладеного навантаження на підшипник, система сповістить вас про це.

У наведеному прикладі вибрана сутність є асиметричною щодо вказаного напрямку навантаження. Горизонтальні компоненти переданого навантаження P вздовж окружності явно не додаються до нуля.

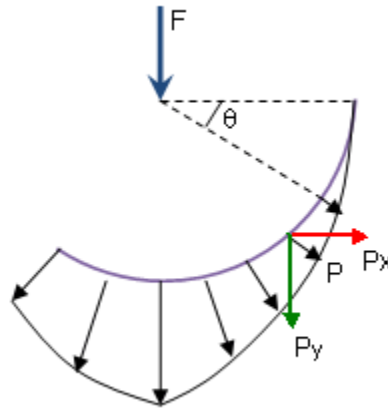


Рис. 2.3. Схема розподілу додаткових навантажень для асиметричних поверхонь

Додаткове незбалансоване навантаження обчислюється за такою формулою:

$$U.F. = \sum_{i=0}^n (P_x)_i \quad (2.5)$$

$U.F.$ позначає незбалансовану силу.

Для синусоїдального розподілу навантаження:

$$P_x = P \cos \theta = F_o \sin \theta * \cos \theta \quad (2.6)$$

Для параболічного розподілу навантаження:

$$P_x = P \cos \theta = F_o \sin^2 \theta * \cos \theta \quad (2.7)$$

Процент незбалансованого навантаження розраховується за формулою:

$$(U.F./F) * 100 \quad (2.8)$$

Загалом, уточнення мережі та розташування вузла впливають на обчислення незбалансованої сили через зміну P_x вздовж окружності.

Наступним головним кроком є побудова поверхневої сітки від розмірів якої буде залежати точність та якість розрахунку. Процес створення сітки починається з вибору типу сітки та налаштування її параметрів для

конкретної моделі. Першим етапом є визначення розміру елементів сітки, який залежить від геометрії моделі та вимог до точності обчислень. В залежності від вибраного типу сітки, програма автоматично застосовує певні методи для визначення оптимального розміру елементів на основі обраної стратегії: стандартної, на основі кривизни чи змішаної.

Для сітки на основі кривизни, програма автоматично генерує більше елементів в областях з високою кривизною, що дозволяє досягти більш детальної апроксимації геометрії в таких зонах. У той час як стандартна сітка використовує однаковий розмір елементів по всій моделі, схема на основі кривизни дає змогу варіювати розмір елементів залежно від кривизни поверхні. Змішана сітка, в свою чергу, комбінує підходи, адаптуючи елементи до локальної кривизни для досягнення більш рівномірного і точного розподілу елементів по геометрії.

Коли розмір елементів встановлено, наступним кроком є налаштування точності сітки, що визначається через параметр толерантності. Програма автоматично визначає мінімальний розмір елемента, який не перевищує встановленої толерантності, що дозволяє уникнути проблем з суміщенням вузлів або утворенням занадто великих елементів у критичних зонах.

Після цього система проводить перевірку на наявність спотворених елементів. Якщо такі елементи виявлено, програма може видати попередження, оскільки спотворені елементи мають від'ємне значення якобіанового коефіцієнта, що може призвести до неточних результатів. У разі виявлення таких елементів можна відкоригувати сітку, або провести додаткову перевірку геометрії.

Процес створення сітки також включає в себе можливість для додаткового налаштування для складних деталей, таких як маленькі отвори чи фаски. Програма дозволяє автоматично застосовувати ці налаштування до таких частин моделі, аби забезпечити точне відображення навіть найдрібніших елементів без необхідності ручного коригування сітки.

2.2. Проведення теоретичних розрахунків геометричних моделей деталі за допомогою САЕ

Спочатку було проведено розрахунок втулки з ПКМ з внутрішнім розміром 22 мм, зовнішнім 39,5 мм та висотою 30 мм без використання армованої вставки, навантаження по осі x задавалося 7500 Н. Результати розрахунків цього варіанту зображено на рисунку 2.4.

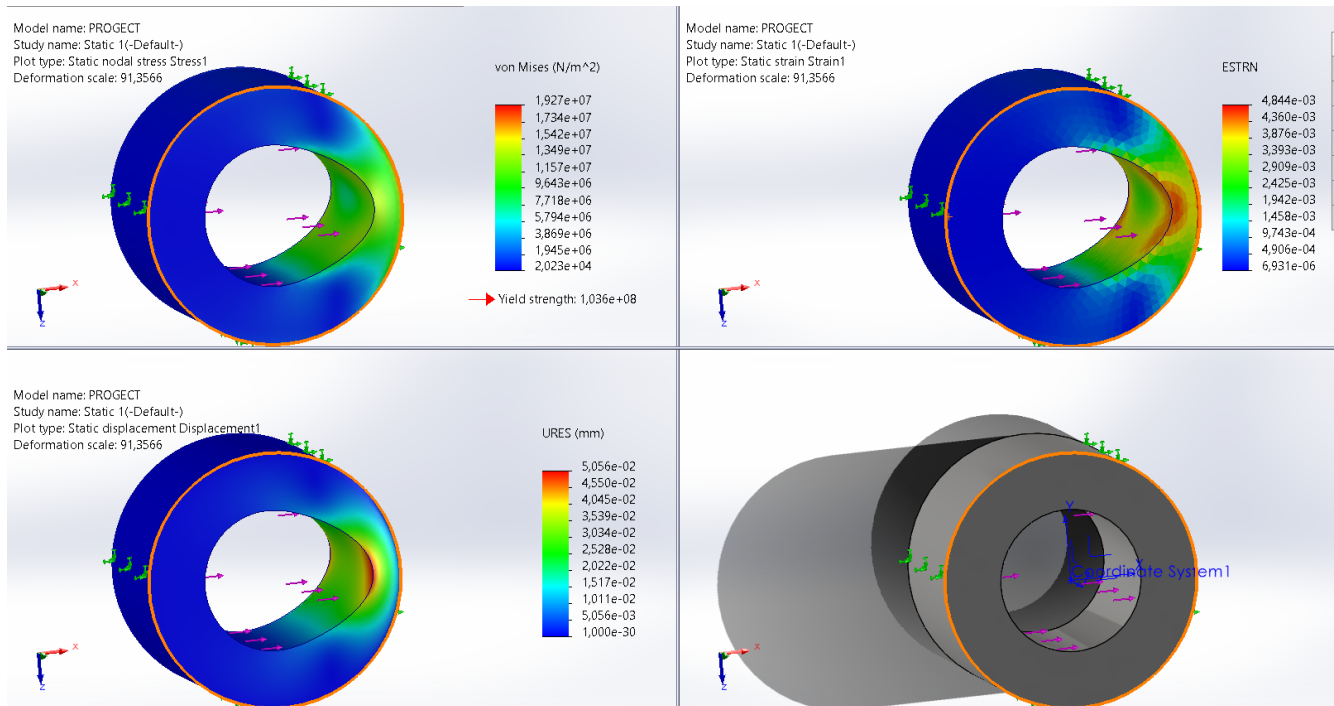


Рис. 2.4 Розрахунок втулки з ПКМ без використання армованої вставки

Наступним кроком було дослідження реакцій на навантаження втулки з використання перфорованої вставки, параметричні розміри втулки залишаються незмінними в подальших дослідях, а розміри та товщина армованих вставок будуть варіюватися. Для ефекту перфорації було виконано наскрізні 4 отвори, діаметром по 10 мм по осі x та наскрізні отвори

діаметром по 10 мм перпендикулярно до попередніх. Внутрішні і зовнішні розміри перфорованих вставок змінювалися.

Для першого варіанту було використано діаметри 28 на 30 мм, графічні результати розрахунку наведені на рисунку 2.5.

Для другого варіанту вставка мала розміри 30 на 32 мм, результати зображено на рисунку 2.6.

Та для третього варіанту вставка мала розміри 28 на 32 мм, графічне відображення результатів наведено на рисунку 2.7.

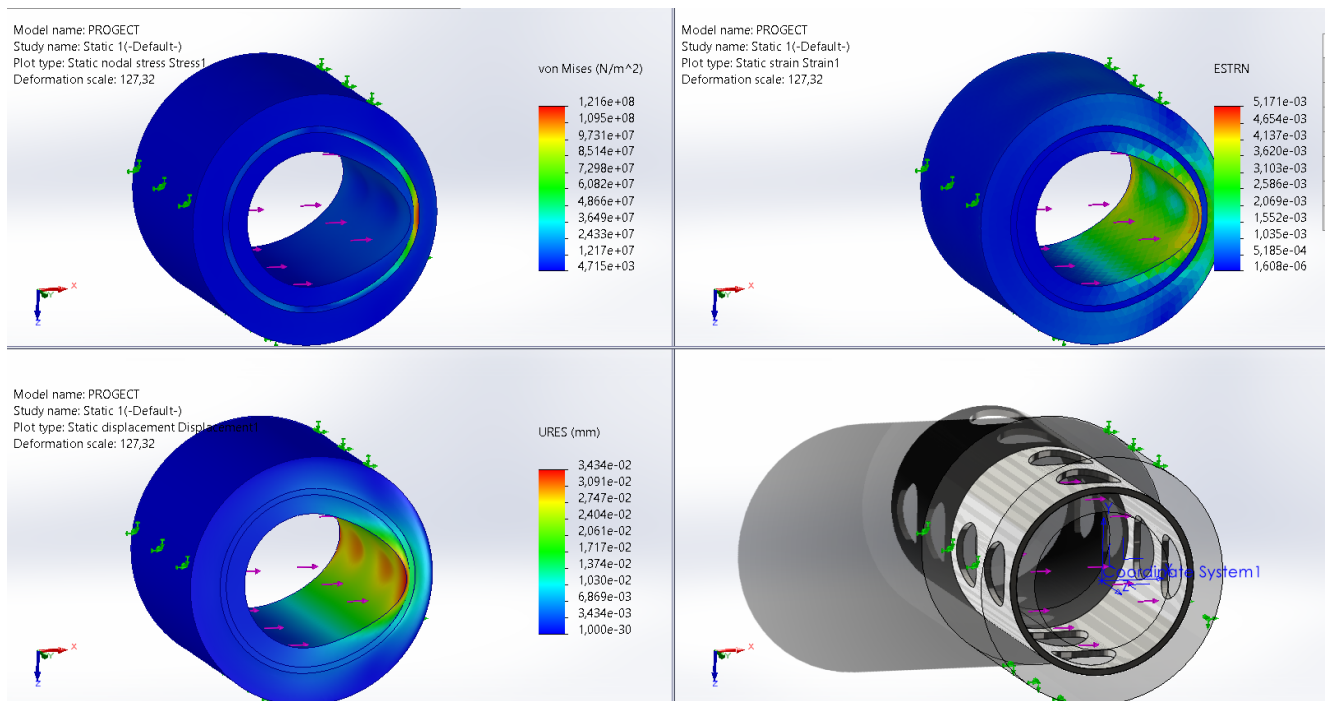


Рис. 2.5. Результати розрахунку зі вставкою 28-30 мм

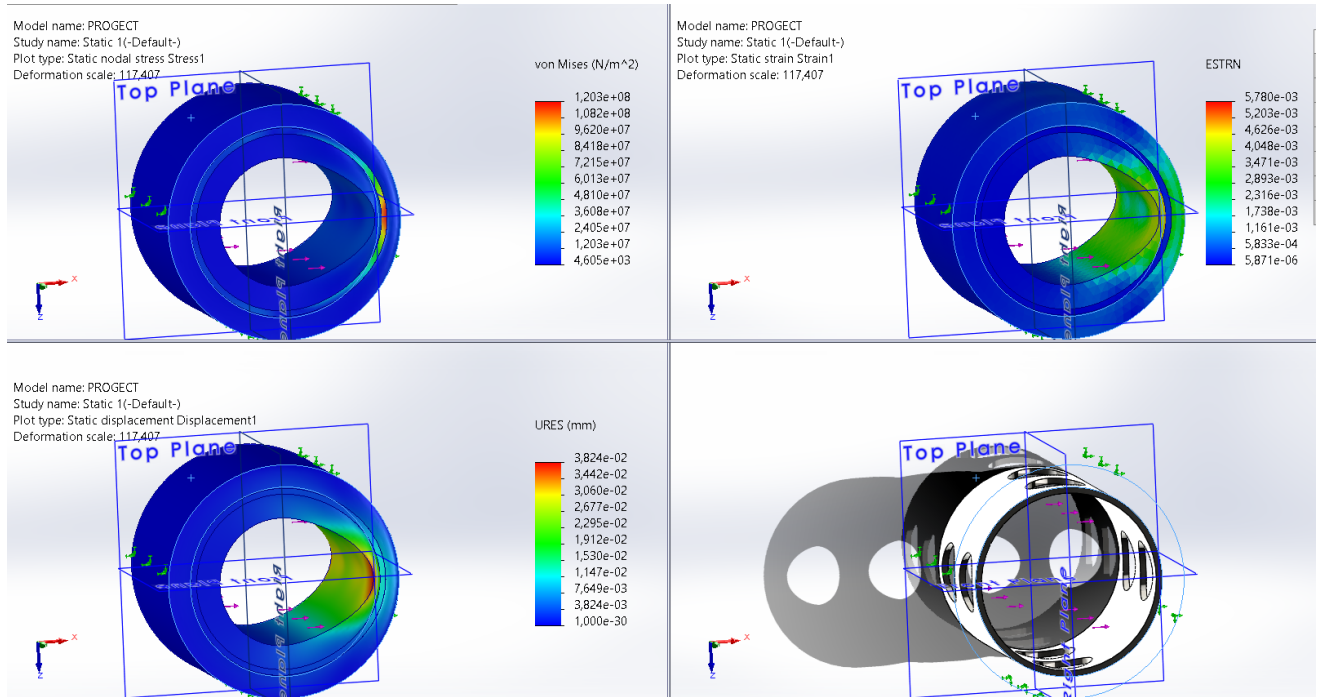


Рис. 2.6. Результати розрахунку з розмірами вставки 30-32 мм

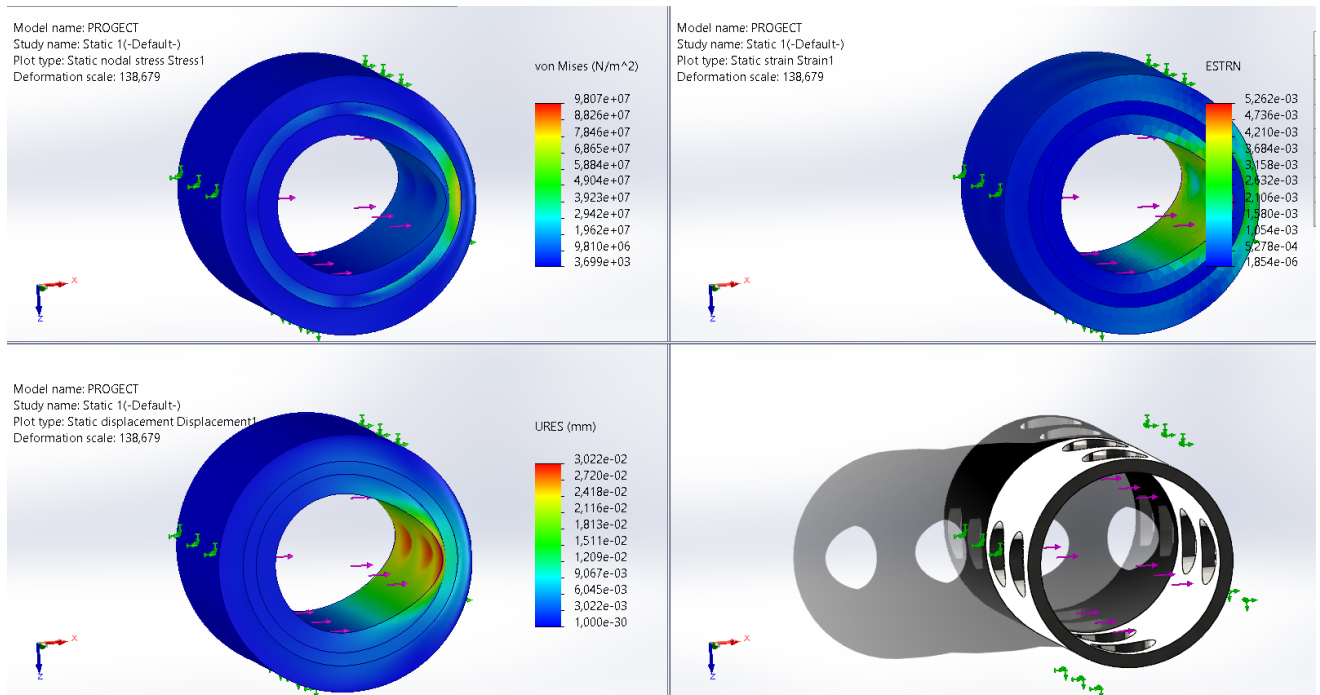


Рис. 2.7. Результати дослідження з параметрами вставки 28-32 мм

Наступним кроком в дослідженнях є розрахунок втулки з ПКМ з використанням суцільної армованої вставки зі змінними розмірами, параметричні розміри самої втулки з ПКМ залишаються попередніми (22-39,5 мм), навантаження по осі x також складає 7500 Н.

Першим дослідженням став розрахунок з використанням вставки з внутрішнім та зовнішнім діаметром відповідно 28 мм та 30 мм, результати цього дослідження наведено на рисунку 2.8.

Другим розрахунком було використання вставки розміром 30-32 мм, результати представлені на рисунку 2.9.

Та останнім розрахунком стало використання розмірів вставки 28-32 мм, графічні результати дослідження наведено на рисунку 2.10.

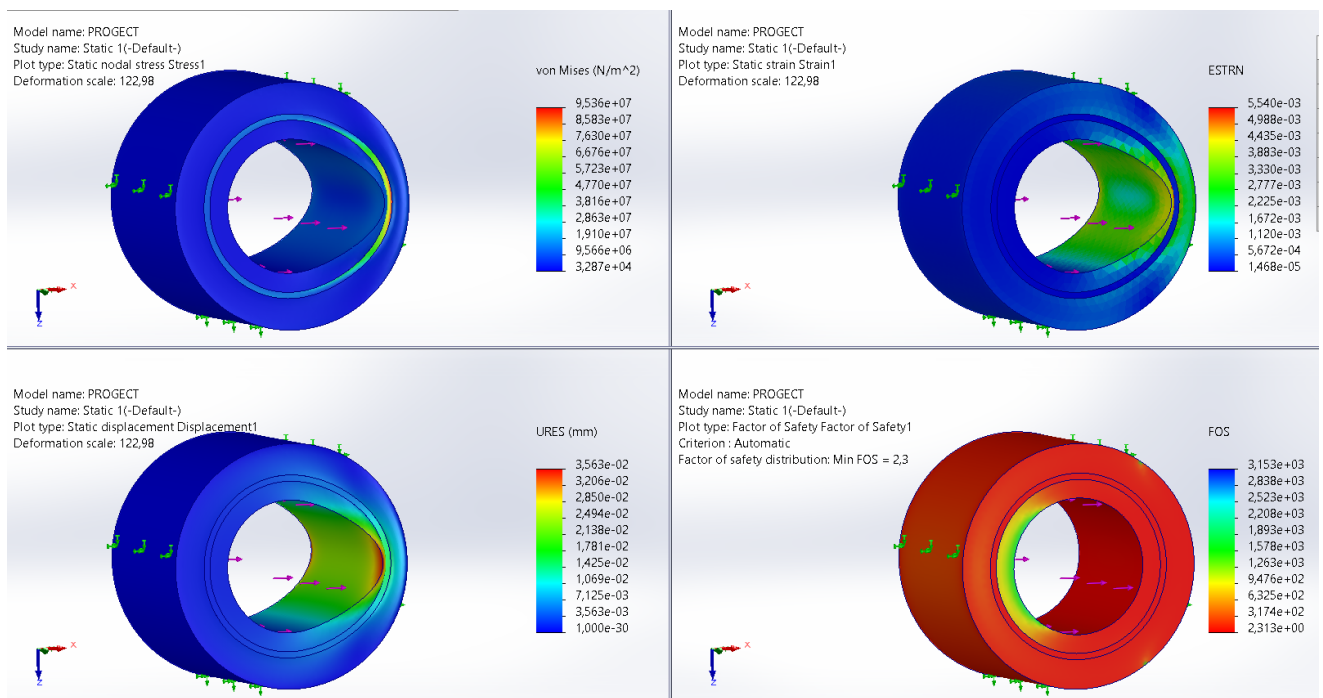


Рис. 2.8. Результати з суцільною вставкою розмірами 28-30 мм

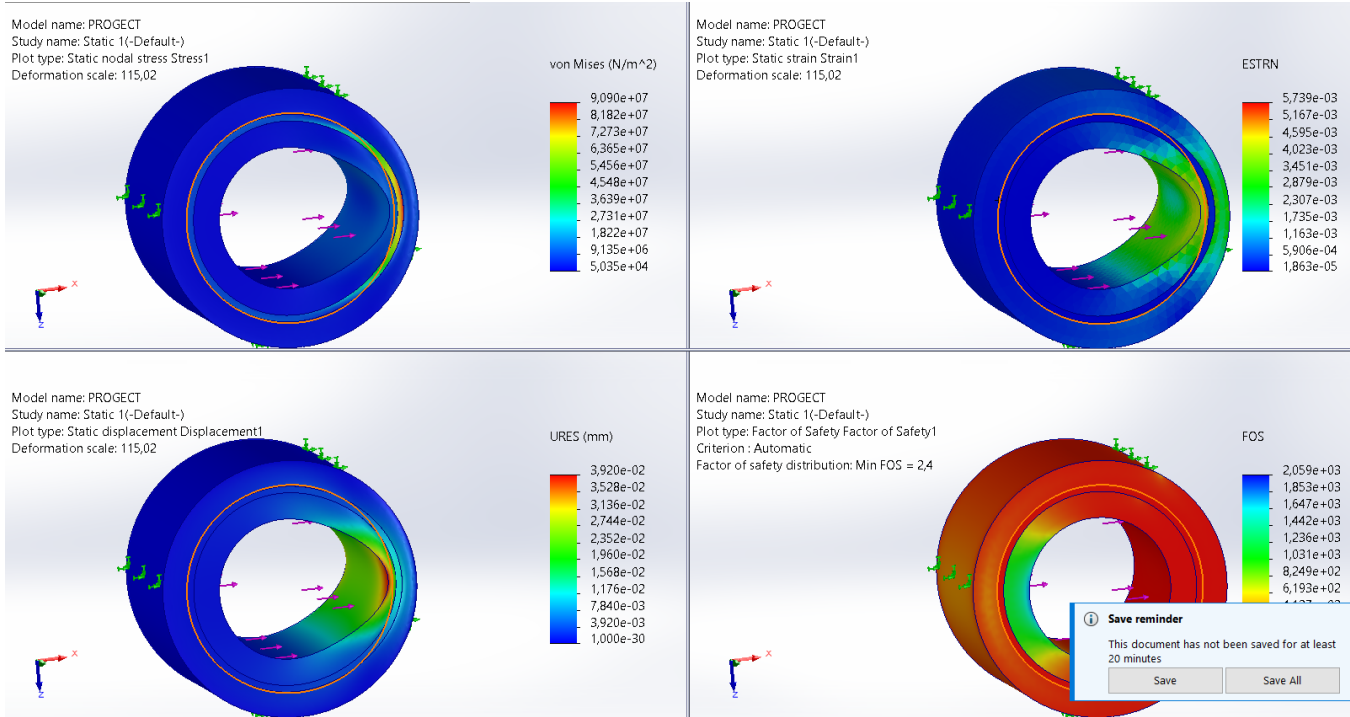


Рис. 2.9. Результати дослідів з розмірами вставки 30-32 мм

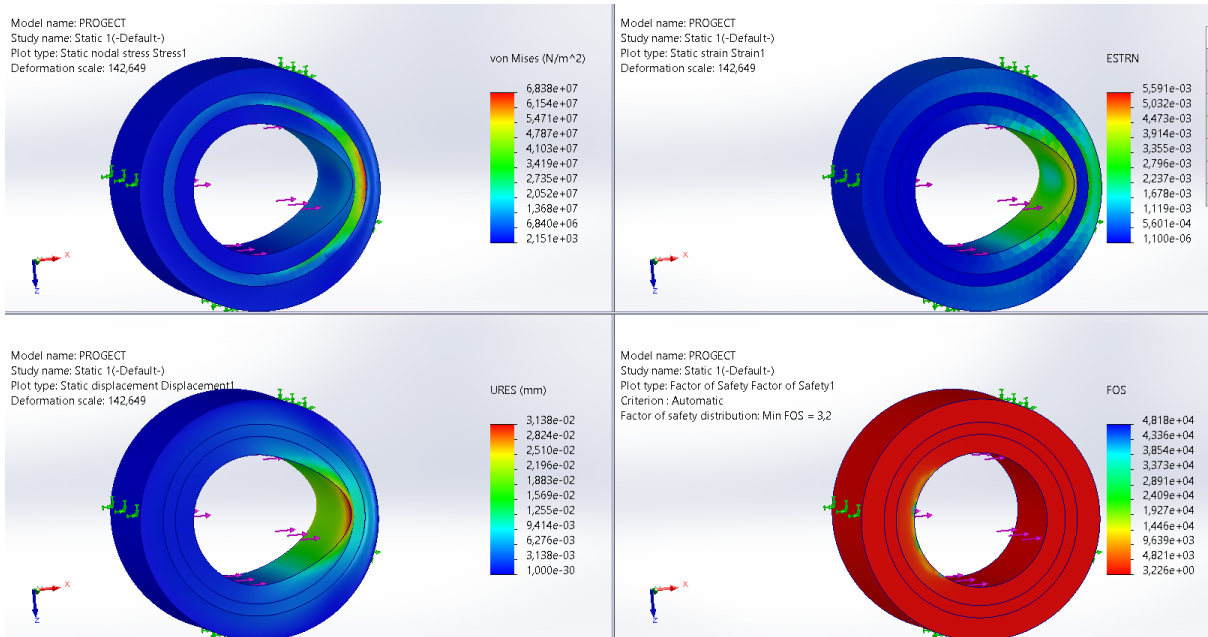


Рис. 2.10. Результати розрахунків моделювання з розмірами вставки - 28-32 мм

2.3 Огляд та аналіз отриманих даних попередніх дослідів

Всі основні дані отримані з попередніх розрахунків, для зручності аналізу записуємо до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Результати дослідження втулок ПКМ зі змінними вставками

Наступним кроком є побудова діаграм відображення змінних, для зручнішого візуального аналізу результатів.

Діаграма напружень відповідно з номеру досліду, наведено на рисунку 2.11.

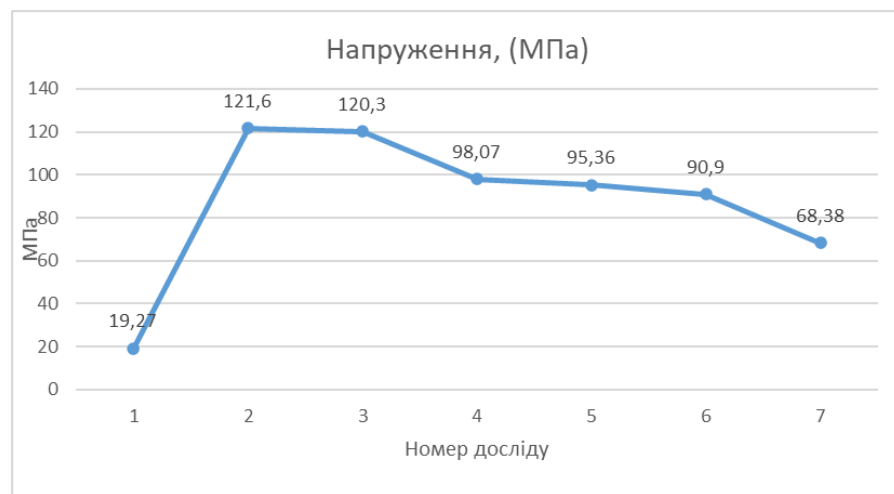


Рис. 2.11. Діаграма напружень до номеру досліду

Діаграми переміщень та статичної деформації наведено на рисунках 2.12 та 2.13.

Номер досліду	1	2	3	4	5	6	7
	Суцільна втулка	З перфорованою вставкою			З суцільною вставкою		
	22-39,5мм	28-30 мм	30-32 мм	28-32мм	28-30 мм	30-32 мм	28-32мм
Напруження, (МПа)	19,27	121,6	120,3	98,07	95,36	90,9	68,38
Статичне деформування, (%)	0,004844	0,005171	0,00578	0,005262	0,00554	0,005739	0,005591
Переміщення, (мм)	0,05056	0,03434	0,03824	0,03022	0,03563	0,0392	0,03138
Коефіцієнт запасу міцності	-	-	-	-	2,3	2,4	3,2



Рис. 2.12 Діаграма переміщень



Рис. 2.13. Діаграма статичного деформування виражено у відсотках

Дослідження втулок показало, що кожен із розглянутих варіантів має свої переваги та обмеження залежно від умов експлуатації.

Також проведено дослідження значень регресії відповідно до втулки та виконаного експерименту за допомогою стандартного статистичного підходу з використанням моделі Ordinary Least Squares (OLS).

Кроки аналізу:

Підготовка даних:

Категоріальну змінну "Тип втулки" (x) перетворено на числову шкалу:

0 — суцільна втулка,

1 — втулка з перфорованою вставкою,

2 — втулка з суцільною вставкою.

Ці значення використовуються як незалежна змінна x .

1. Регресія:

Для кожного з параметрів (напруження, деформація, переміщення) було застосовано лінійну регресію, що шукає найкращу пряму залежність вигляду:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x \quad (2.9)$$

де:

y — залежна змінна (напруження, деформація або переміщення),

β_0 — константа (перетин із віссю y),

β_1 — коефіцієнт залежності від x .

2. Розрахунок коефіцієнтів:

Використано пакет `statsmodels`, щоб обчислити значення β_0 і β_1 , а також статистичні характеристики моделей, зокрема коефіцієнт детермінації (R^2).

3. Отримані рівняння:

1. Напруження y_1 , МПа:

$$y_1 = 65.21 + 17.49 \cdot x \quad (2.10)$$

де x — тип втулки (0: суцільна, 1: перфорована, 2: суцільна вставка).

2. Деформація y_2 , %:

$$y_2 = 0.0050 + 0.0003 \cdot x \quad (2.11)$$

3. Переміщення y_3 , мм:

$$y_3 = 0.0440 - 0.0054 \cdot x \quad (2.12)$$

У рівнянні напруження (y_1) спостерігається збільшення напруження зі зростанням значення x , що відповідає переходу від суцільної втулки до втулок із металевими вставками.

Для деформації (y_2) зростання x спричиняє поступове збільшення значення, що свідчить про дещо вищу гнучкість суцільних втулок у порівнянні з втулками з металевими вставками.

Переміщення (y_3) зменшується зі збільшенням x , що вказує на підвищення жорсткості конструкції при переході до металевих вставок.

Результати регресійного аналізу дали рівняння для кожного параметра:

Для напруження (y_1): $\beta_0 = 65.21$, $\beta_1 = 17.49$,

Для деформації (y_2): $\beta_0 = 0.0050$, $\beta_1 = 0.0003$,

Для переміщення (y_3): $\beta_0 = 0.0440$, $\beta_1 = -0.0054$.

Результати регресійного аналізу наведено у таблиці 2.2

Таблиця 2.2.

Результати аналізу регресії

Параметр	Константа (β_0)	Коефіцієнт типу (β_1)	R^2	P-value (β_1)
Напруження (МПа)	62,206	17,493	0,141	0,407
Деформація (%)	0,004972	0,000347	0,595	0,042
Переміщення (мм)	0,044024	-0,005400	0,361	0,153

Напруження (МПа) $R^2 = 0.141$:

Залежність між типом втулки та напруженням слабка. Р-значення: $0.407 > 0.05$, тому вплив типу втулки на напруження не є статистично значущим.

Деформація (%) $R^2 = 0.595$:

Помірна залежність між типом втулки та деформацією. Р-значення: $0.042 < 0.05$, вплив типу втулки на деформацію є статистично значущим.

Переміщення (мм) $R^2 = 0.361$:

Слабка залежність між типом втулки та переміщенням. Р-значення: $0.153 > 0.05$, вплив типу втулки на переміщення не є статистично значущим.

Графіки отриманих ліній регресії зображено на рисунку 2.14.

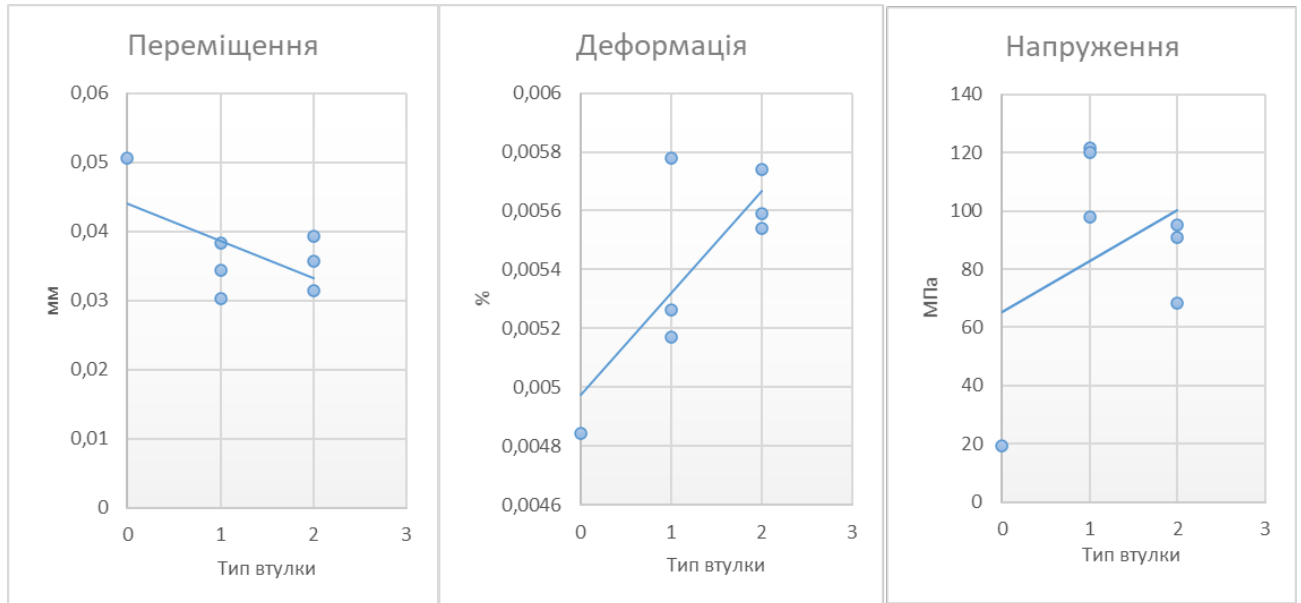


Рис. 2.14. Графіки отримані відповідно до рівнянь регресії

Втулка без металевої вставки демонструє найнижчі значення напружень, але значні переміщення та деформації. Це свідчить про її придатність для роботи за умов невеликих навантажень, де важливими є гнучкість і мінімізація ваги конструкції.

Втулки з перфорованими металевими вставками забезпечують кращу жорсткість у порівнянні із суцільною полімерною втулкою. Водночас вони характеризуються підвищеним рівнем напружень, що може обмежувати їх застосування у високонавантажених вузлах.

Втулки з суцільною металевою вставкою показали найкращі результати за всіма критеріями: мінімальні переміщення, низький рівень деформацій і високий коефіцієнт запасу міцності. Ці характеристики роблять їх найбільш

придатними для використання у вузлах, що піддаються значним навантаженням, особливо там, де важливі довговічність і стійкість до зношення.

Таким чином, вибір конструктивного рішення втулки залежить від експлуатаційних умов. Для високонавантажених вузлів доцільно використовувати втулки із суцільними металевими вставками. У середньо навантажених вузлах оптимальним є застосування втулок із перфорованими вставками, які забезпечують достатню жорсткість при необхідних умовах роботи. Для умов із меншими навантаженнями можна обирати суцільні втулки з полімерного композитного матеріалу.

3. ОБГРУНТУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОЗРОБЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВТУЛКИ З ПОЛІМЕРНО-КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ З ВИКОРИСТАННЯ АРМОВАНОЇ ВСТАВКИ

3.1. Підготовка до виготовлення спроектованої втулки та проведення експериментальної частини

Підхід до вибору матеріалів та початкова підготовка

Проектування деталей для вузлів тертя вимагає детального аналізу як умов експлуатації, так і властивостей матеріалів. Для втулки було визначено ключові критерії: висока стійкість до навантажень, зносостійкість та здатність протистояти абразивному зношенню. Відповідно до цих вимог, конструкція втулки мала складатися з двох частин: полімерно-композитного корпусу та внутрішньої армованої вставки, виготовленої з металу.

Підібрана металева вставка зображена на рисунку 3.1.



Рис. 3.1. Підготовлена металева вставка

Для виготовлення металевої вставки було обрано низьковуглецеву сталь марки Ст3сп, яка характеризується помірними механічними властивостями і широким застосуванням у промисловості. Цей матеріал є аналогом сталей, що використовуються для виготовлення водопровідних

труб, та забезпечує достатню пластичність і стійкість до навантажень без додаткового загартування.

Процес проточування зображено на рисунку 3.2.



Рис. 3.2. Проточування металевої вставки на токарному верстаті

Основні властивості сталі Ст3сп:

- Границя текучості (σ_T): 225–245 МПа (в залежності від товщини заготовки);
- Межа міцності (σ_B): 370–470 МПа;
- Твердість за Брінеллем (НВ): 120–160 одиниць.

Металеві вставки виготовлялися на токарному верстаті. Для забезпечення точності розмірів виконувалися такі операції:

1. Розточування зовнішнього діаметра до 32 мм.
2. Розточування внутрішнього діаметра до 30 мм, що забезпечувало оптимальне співвідношення ваги та міцності.
3. Обробка поверхні для створення мікрошорсткості (приблизно Ra 6.3), що підвищує адгезію з полімерним композитом.

На рисунку 3.3. зображено виготовлену металеву вставку з перфорованими отворами.



Рис. 3.3.Металева вставка з перфорованими отворами

Параметри лиття ПКМ

Матеріалом для заливки обрано поліамід-6 з 20% вуглецевого волокна. Цей полімерно-композитний матеріал відрізняється високими механічними властивостями та стійкістю до стирання, що важливо для деталей, які працюють у вузлах тертя.

Технологічні параметри лиття:

- Температура розплаву полімеру (Т): 260–280 °С (залежно від конкретного складу та вмісту наповнювача).
- Температура прес-форми (Тформи): 80–100 °С для забезпечення рівномірного охолодження матеріалу.
- Тиск лиття (Р): 75–85 МПа — цього достатньо для якісного заповнення форми композитним матеріалом, навіть з урахуванням армування.
- Час витримки під тиском: 18–22 секунди — забезпечує усадку матеріалу без утворення внутрішніх дефектів.
- Час охолодження у формі: 45–60 секунд залежно від товщини полімерного шару.

Процес відливу у форму під тиском заздалегідь був змодельований у САМ системі, та зображення з нього наведено на рисунку 3.4.

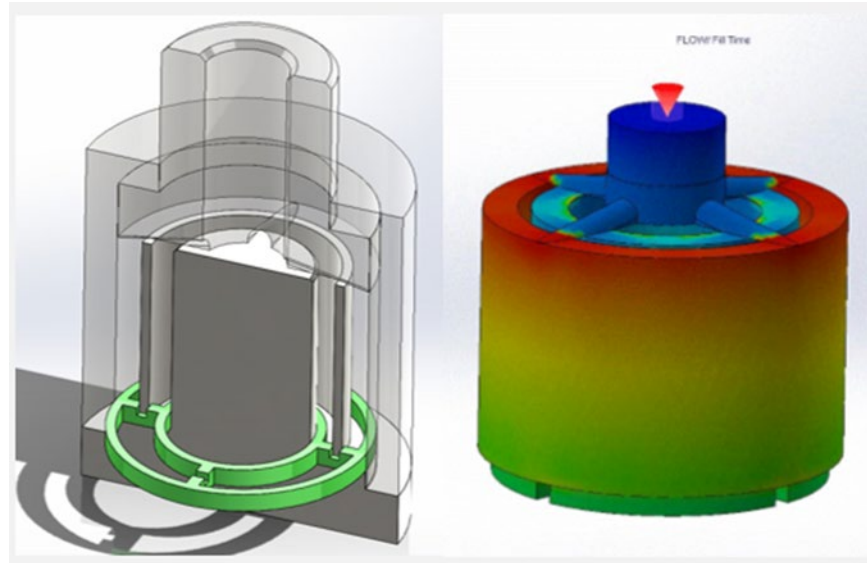


Рис. 3.4 Моделювання в САМ системі процесу виготовлення деталі через відлив прес-форму

Особливості прес-форми:

Прес-форма була виготовлена зі сталі 40Х, яка добре витримує високу температуру і тиск. Конструкція включала:

- Центруюче кільце для точної фіксації металевої вставки.
- Систему подачі полімеру через впускний отвір із діаметром 8 мм.

Прес форма для відливу зображена на рисунку 3.5.



Рис.3.5. Прес форма для виготовлення втулки литтям під тиском
Експериментальні випробування

Отримані втулки були випробувані на прес-стенді. Втулки, виготовлені із суцільними вставками, продемонстрували рівномірний розподіл

навантаження, а перфоровані вставки показали вищу адгезію між металом і полімером, що знижує ризик розшарування.

Для оцінки характеристик і ефективності конструкції втулок було виготовлено дев'ять різних зразків. Перші три – це звичайна втулка без жодного армування. Вона складалася виключно з ПКМ, поліаміду-6 із 20% вуглецевого волокна. Такий зразок виготовили для порівняння з армованими втулками, щоб визначити, наскільки металеві вставки впливають на міцність і інші властивості.

Три наступні втулки були створені з використанням металевих вставок із перфорацією. Для цього на поверхні сталевих заготовок виконували отвори діаметром 10 мм. Перфорація мала вирішальне значення, оскільки через ці отвори полімер проникав і надійно скріплювався з металом, утворюючи єдину конструкцію. Це дозволило значно покращити адгезію між матеріалами та підвищити стійкість до розшарування під дією навантажень.

Ще три зразки виготовили із суцільними металевими вставками. У цих втулках метал відігравав роль зміцнювального елемента без додаткових отворів. Основна перевага такої конструкції полягала у здатності витримувати високі навантаження на стискання, оскільки метал приймав на себе більшу частину зусиль.

Для кожного типу втулок було розроблено свій підхід до виготовлення. У випадку з перфорованими вставками після свердління отворів проводили додаткову шліфовку, щоб видалити задирки й забезпечити якісне зчеплення. Суцільні вставки обробляли на токарному верстаті, надаючи їм потрібної шорсткості для покращення зчеплення з полімером. Усі вставки встановлювалися у прес-форму перед заливкою полімеру, щоб забезпечити міцний монолітний зв'язок металу та композиту.

Готові деталі наведено на рисунку 3.6.



Рис. 3.6 Готові втулки з ПКМ з варіаціями внутрішніх вставок

Для проведення дослідницьких навантажень було використано лабораторну прес-установку, яка забезпечувала точний контроль параметрів навантаження та дозволяла оцінити характеристики виготовлених втулок. Головним завданням випробувань було визначення границі текучості матеріалів, аналіз розподілу навантажень у конструкції та перевірка міцності з'єднання полімерного композиту з металевими вставками. Лабораторна прес-форма була оснащена системою вимірювання, яка реєструвала параметри переміщення під дією навантаження. Це дозволяло відстежувати, як змінюється деформація втулок при поступовому збільшенні прикладеної сили. Крім того, дані, отримані під час випробувань, використовувалися для визначення границі текучості (σ_T) — критичної точки, коли матеріал починає необоротно деформуватися.

Під час тестування кожен втулку послідовно встановлювали на спеціально адаптований стенд прес-установки. До верхньої частини втулки прикладалося навантаження, яке поступово збільшувалося зі швидкістю 1,796 мм/хв. Система датчиків реєструвала значення сили, прикладеної до втулки, та величину переміщення.

Використовувана лабораторна прес установка наведена на рисунку 3.7.

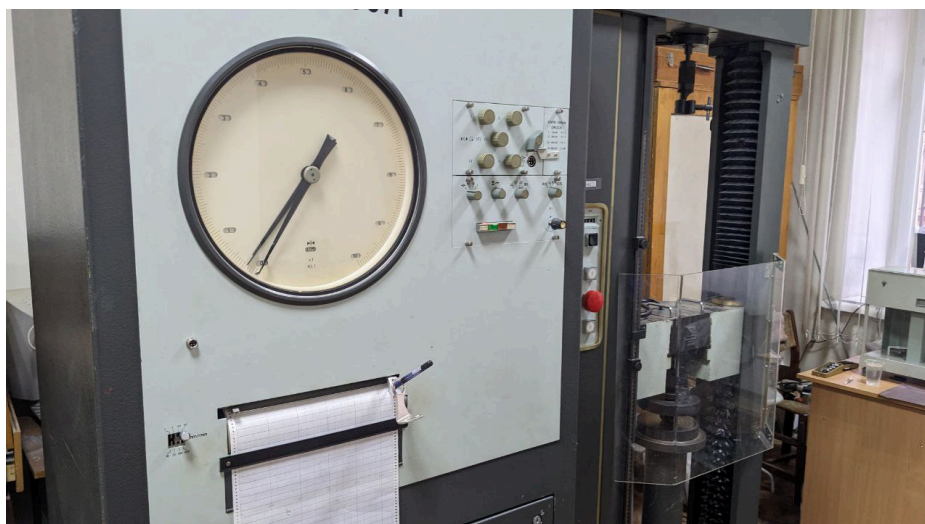


Рис.3.7. Лабораторна прес-установка для проведення досліджень навантажень на виготовлені зразки втулок

Розглянуті етапи виготовлення та підготовки до випробувань дозволили створити дев'ять зразків втулок із різними конструктивними особливостями. Завдяки застосуванню лабораторної прес-установки вдалося забезпечити необхідні умови для проведення досліджень, які дозволять виявити переваги та недоліки кожного зразка.

3.2. Аналіз та обґрунтування отриманих результатів лабораторних досліджень

Аналіз результатів лабораторних досліджень втулок із ПКМ, як суцільних, так і з використанням металевих вставок. Проведені експерименти дозволяють оцінити поведінку втулок за різних типів конструкції та порівняти отримані результати з теоретичними розрахунками. Було виконано 9 дослідів, з яких 3 з суцільною втулкою, 3 з перфорованою вставкою, 3 з суцільною вставкою, та вираховано середні значення експериментів. Дані лабораторних досліджень наведено на таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Таблиця результатів лабораторних досліджень випробовування втулок

Номер досліджу	Тип втулки	Навантаження (кН)	Статичне деформування (%)	Переміщення (мм)
1	Суцільна	6,35	0,00512	0,04852
2	Суцільна	6,41	0,00496	0,0498
3	Суцільна	6,44	0,00518	0,05011
Середнє		6,4	0,00509	0,04948
4	З перфорованою вставкою	8,95	0,00534	0,03451
5	З перфорованою вставкою	8,98	0,00521	0,03472
6	З перфорованою вставкою	8,99	0,00529	0,03483
Середнє		8,973	0,00528	0,03469
7	З суцільною вставкою	9,43	0,00539	0,03118
8	З суцільною вставкою	9,45	0,00542	0,03125
9	З суцільною вставкою	9,47	0,00537	0,03111
Середнє		9,45	0,00539	0,03118

Лабораторні випробування підтвердили відмінності в несучій здатності втулок залежно від їхньої конструкції. Втулки із суцільною вставкою витримали максимальне навантаження, яке в середньому склало 9,450 кН. Втулки з перфорованою вставкою показали дещо менший результат, середнє значення якого дорівнює 8,973 кН. Суцільні полімерно-композитні втулки мали найменшу міцність серед досліджуваних зразків, витримуючи середнє навантаження 6,400 кН. Графік залежності навантаження наведено на рисунку 3.8.



Рис. 3.8. Діаграма залежності міцності від номеру досліду

Результати підтверджують, що використання металевих вставок значно підвищує несучу здатність втулок. Це зумовлено тим, що вставки рівномірно розподіляють навантаження, знижуючи локальні напруження в композитному матеріалі. Втулки з перфорованими вставками показують дещо менші показники через потенційні зони концентрації напружень навколо отворів, хоча їхня маса й економічність є значною перевагою.

Отримана діаграма з лабораторної установка наведена на рисунку 3.9.

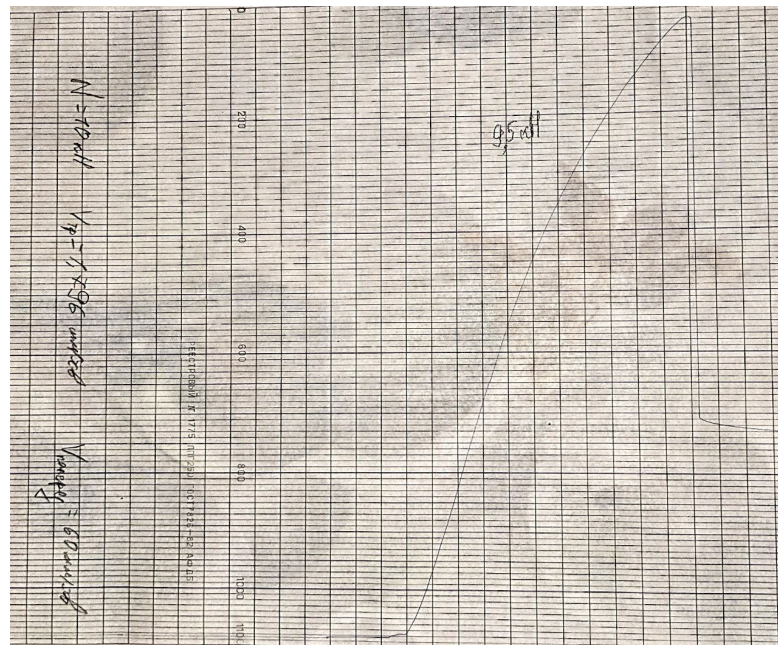


Рис. 3.9. Діаграма навантаження втулки отримана на лабораторному прес-обладнанні

Порівняння деформування та переміщення

Параметри статичного деформування та переміщення, отримані в ході лабораторних випробувань, загалом відповідають теоретичним значенням. Зокрема, суцільні втулки продемонстрували деформування в середньому на рівні 0,00509%, з переміщенням близько 0,04948 мм. Для втулок із перфорованою вставкою ці показники були трохи нижчими, зі середнім деформуванням 0,00528% та переміщенням 0,03469 мм. Найменші деформації та переміщення спостерігалися у втулок із суцільною вставкою — 0,00539% та 0,03118 мм відповідно. Діаграма переміщень від номеру дослідів наведено на рисунку 3.10.

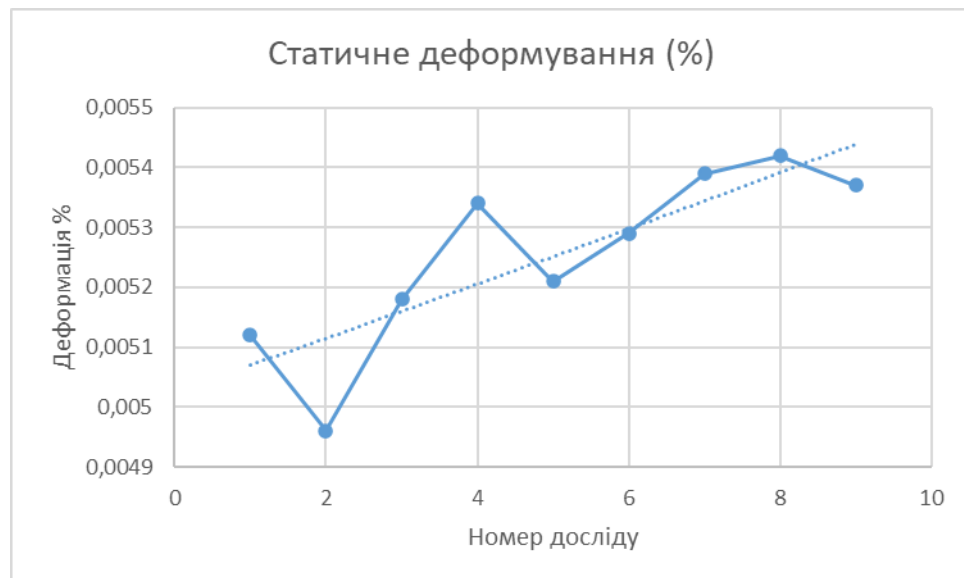


Рис.3.10. Діаграма статичного деформування деталі відповідно до номеру дослідів

Така динаміка демонструє ефективність металевих вставок у підвищенні стійкості втулок до деформування. Суцільна конструкція вставки забезпечує найбільш рівномірний розподіл навантаження, що сприяє зменшенню деформацій. Лабораторні показники підтвердили, що відмінності в переміщенні та деформаціях між різними типами втулок залишаються в межах теоретичних припущень, що свідчить про коректність розрахункових моделей.

Зображення досліду з суцільною втулкою наведено на рисунку 3.11.

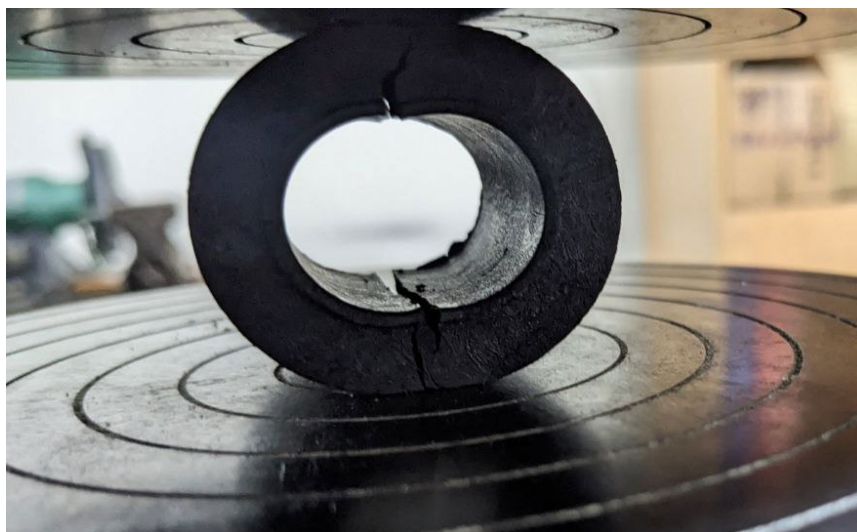


Рис. 3.11. Дослідження суцільної втулки на лабораторному стенді

Рекомендації та обґрунтування

Результати лабораторних досліджень дозволяють дійти висновку, що оптимізація геометрії та матеріального складу втулок може суттєво вплинути на їхні експлуатаційні характеристики. Зокрема, втулки із суцільними металевими вставками забезпечують найвищу стійкість до навантажень і мінімальну деформацію. Це робить їх придатними для використання у важких умовах, таких як високонавантажені вузли сільськогосподарської техніки, де необхідна максимальна міцність і надійність.

Втулки з перфорованими металевими вставками показали себе менш міцними ніж з суцільною вставкою, але перфоровані отвори покращують взаємодію між матеріалами. Такі втулки мали дещо більші значення по деформації та переміщенню але і зі своїми перевагами. Зображення результатів навантаження втулки з перфорованою вставкою наведено на рисунку 3.12.

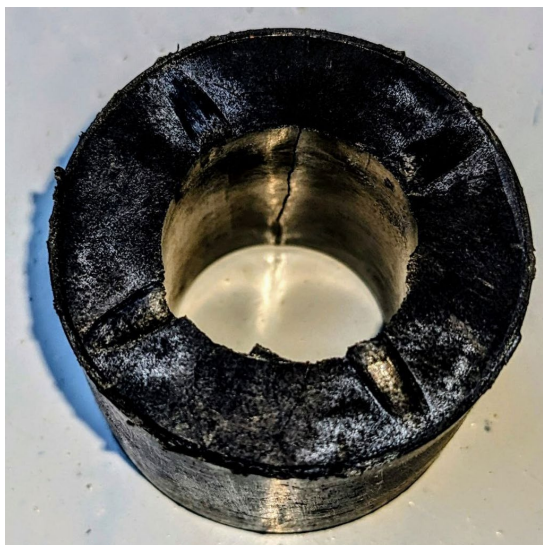


Рис. 3.12. Візуальні пошкодження втулки з перфорованою вставкою при граничних навантаженнях

Для наглядного порівняння на рисунку 3.13 наведено пошкодження суцільної втулки за умов граничних навантажень. Як видно з зображення суцільна втулка розломилася на дві частини та має здатність до викришування, що є негативним фактором який може виникати при експлуатації заданого вузла, а втулка з перфорованою вставкою отримала тріщину та тримається основного тіла, що вказує на протидію викришування з робочого місця.



Рис. 3.13. Результати граничних навантажень для суцільної втулки без армування

Суцільні полімерно-композитні втулки, хоча й мають нижчу несучу здатність, можуть бути економічно доцільними для використання в умовах низького рівня навантажень. Наприклад, вони підходять для опорних конструкцій або вузлів, що працюють із невеликими статичними навантаженнями, таких як допоміжні механізми або кріпильні елементи.

Крім того, результати підтверджують, що форма та структура металевих вставок безпосередньо впливають на розподіл напружень. У майбутніх дослідженнях доцільно зосередитися на аналізі впливу геометричних параметрів вставок, таких як діаметр перфорації або товщина стінок, на загальну міцність конструкції. Варто також провести додаткові випробування втулок у динамічних умовах, зокрема під впливом змінних навантажень і температурних перепадів, щоб оцінити їхню довговічність у реальних експлуатаційних сценаріях.

Загалом, аналіз отриманих даних дозволяє зробити висновок, що вдосконалення конструкції втулок може значно підвищити їх ефективність у широкому спектрі застосувань, зокрема в аграрному секторі та машинобудуванні. Рекомендації, засновані на результатах лабораторних досліджень, спрямовані на поліпшення механічних властивостей втулок і збільшення строку їхньої служби.

3.3. Висновки до отриманих результатів

Результати лабораторних експериментів продемонстрували відмінності у здатності витримувати навантаження між втулками різних конструкцій. Зокрема, втулки з суцільною металевою вставкою показали найвищу стійкість до навантажень, витримуючи до 9450 Н. У той же час втулки з перфорованою вставкою показали дещо нижчі результати, близько 8950–9000 Н. Суцільні полімерно-композитні втулки мали найнижчий поріг навантаження — близько 6400 Н.

При порівнянні отриманих лабораторних даних з теоретичними розрахунками можна відзначити суттєве співпадіння тенденцій, що підтверджує коректність методів теоретичного моделювання. Суцільні втулки відповідали передбаченням теорії, демонструючи значну деформацію під великими навантаженнями. Водночас втулки з металевими вставками проявили значно меншу деформацію завдяки підвищеній жорсткості матеріалу.

Деформування втулок і переміщення також показали подібну кореляцію з теоретичними даними. Втулки з металевими вставками деформувались значно менше, ніж полімерно-композитні, що свідчить про переваги комбінованих матеріалів у використанні в умовах високих навантажень. Це узгоджується із прогнозованими значеннями статичного деформування для таких конструкцій.

Графічні залежності, побудовані за результатами лабораторних досліджень, підтверджують надійність експериментальних даних. Діаграма залежності навантаження від деформації чітко демонструє, що максимальні зусилля для кожного типу втулок досягаються при різних значеннях деформації. Це підкреслює важливість врахування особливостей матеріалу при виборі втулок для конкретних експлуатаційних умов.

Отримані результати мають практичну цінність для вдосконалення конструкцій втулок, що використовуються в сільськогосподарській техніці. Зокрема, використання суцільних вставок рекомендується для вузлів, які зазнають значних динамічних або статичних навантажень. Перфоровані вставки є оптимальними для застосувань, де потрібен компроміс між масою конструкції та її жорсткістю.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію геометрії вставок і матеріальних характеристик полімерів. Також варто розглянути питання довговічності втулок у реальних умовах експлуатації, що дозволить більш точно оцінити їхні переваги та обмеження.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПРИ РОБОТІ З ПОЛІМЕРНО-КОМПОЗИТНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Робота з ПКМ вимагає особливої уваги до питань охорони праці, оскільки процеси їх обробки, виготовлення та експлуатації можуть супроводжуватися ризиками для здоров'я працівників. Цей розділ висвітлює основні аспекти забезпечення безпечних умов праці, з урахуванням нормативних вимог та особливостей поводження з матеріалами даного типу.

Аналіз потенційних небезпек

ПКМ включають до свого складу полімерну матрицю та армуючі компоненти, які можуть виділяти шкідливі речовини при термічній обробці, різанні, шліфуванні чи інших технологічних операціях. Основними небезпеками є:

- ❖ Виділення токсичних випарів, зокрема фенолу, формальдегіду, стиролу та інших хімічних сполук;
- ❖ Пил, що утворюється при механічній обробці та може викликати алергічні реакції або захворювання дихальних шляхів;
- ❖ Можливість ураження електрострумом при використанні обладнання з недостатньою ізоляцією.

Організація робочого місця

Для мінімізації ризиків під час роботи з ПКМ необхідно організувати робоче місце відповідно до чинних санітарних і технічних норм. Робоче приміщення має бути обладнане системою припливно-витяжної вентиляції для видалення шкідливих випарів і пилу. Розташування обладнання повинно забезпечувати зручний доступ до всіх вузлів і елементів, щоб уникнути зайвих рухів і травм.

Засоби індивідуального захисту. Працівники повинні використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) відповідно до специфіки виконуваних робіт. До обов'язкових ЗІЗ відносяться:

- ❖ Респіратори або протигази для захисту органів дихання від пилу і токсичних парів;
- ❖ Захисні окуляри або маски для запобігання потраплянню часток в очі;
- ❖ Рукавички з хімічно стійких матеріалів для захисту шкіри;
- ❖ Одяг із антистатичними властивостями для уникнення накопичення статичного заряду.

Навчання і інструктаж

До виконання робіт з ПКМ допускаються лише працівники, які пройшли відповідне навчання та інструктаж з охорони праці. Інструктаж має включати інформацію про потенційні ризики, порядок використання ЗІЗ, а також дії у разі аварійних ситуацій. Особливу увагу слід приділяти практичним заняттям, які дозволяють працівникам ознайомитися з обладнанням, технологічними процесами та засобами захисту на практиці. Регулярне повторне навчання допомагає актуалізувати знання працівників, враховуючи нові вимоги чи виявлені ризики.

Крім того, важливо проводити тестування для перевірки рівня засвоєних знань. Цей підхід дозволяє виявити прогалини у розумінні основних принципів безпеки та своєчасно виправити їх через додаткове навчання.

Контроль і моніторинг

Важливим елементом охорони праці є регулярний контроль за станом робочого середовища. Потрібно періодично проводити заміри рівня шкідливих речовин у повітрі, а також перевіряти справність вентиляційної системи. Особливу увагу слід приділяти профілактичному медичному огляду працівників, щоб вчасно виявляти можливі професійні захворювання.

Крім замірів повітря, до обов'язкових заходів відносяться перевірка справності робочого обладнання та оцінка ефективності засобів індивідуального захисту. Роботодавець має забезпечити ведення журналу обліку перевірок, що містить детальні дані про виявлені порушення та заходи щодо їх усунення.

Регулярні аудити безпеки, проведення опитувань працівників щодо умов праці, а також впровадження автоматизованих систем моніторингу допомагають оперативно реагувати на відхилення від норм і попереджати можливі нещасні випадки.

Висновок

Дотримання правил охорони праці при роботі з ПКМ дозволяє забезпечити безпеку працівників, підвищити продуктивність праці та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Важливим є систематичний підхід до аналізу ризиків, організації умов праці та навчання персоналу.

5. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Вихідні дані для розрахунків виготовлення втулок з ПКМ:

- ❖ Ціна поліаміду-6: $C_{PA6} = 450$ грн/кг
- ❖ Ціна рубленого вуглеволокна: $C_{CF} = 2000$ грн/кг
- ❖ Заробітна плата працівника: $S = 14,000$ грн/місяць
- ❖ Вартість електроенергії: $C_E = 4,32$ грн/кВт·год
- ❖ Кількість деталей за зміну: $N = 50$
- ❖ Тривалість зміни: $T = 8$ годин
- ❖ Вага полімеру для суцільної деталі: $W_{poly_solid} = 0,028$ кг
- ❖ Вага композиту для модернізованої деталі: $W_{comp} = 0,02$ кг
- ❖ Частка вуглеволокна у композиті: $R_{CF} = 20\%$
- ❖ Ціна сталі для вставки (середня): $C_{steel} = 30$ грн/кг
- ❖ Вага сталевий вставки: $W_{steel} = 0,008$ кг

Розрахунок вартості матеріалів на одну втулку з ПКМ

Суцільна деталь:

Вага вуглеволокна:

$$W_{CF} = W_{solid} \cdot R_{CF} \quad (5.1)$$

$$W_{CF} = 0,028 \cdot 0,2 = 0,0056 \text{ кг}$$

Вага поліаміду-6:

$$W_{PA6} = W_{solid} - W_{CF} \quad (5.2)$$

$$W_{PA6} = 0,028 - 0,0056 = 0,0224 \text{ кг}$$

Вартість матеріалу:

$$C_{mat_solid} = (W_{PA6} \cdot C_{PA6}) + (W_{CF} \cdot C_{CF}) \quad (5.3)$$

$$C_{mat_solid} = (0,0224 \cdot 450) + (0,0056 \cdot 2000) = 10,08 + 11,2 = 21,28 \text{ грн}$$

Деталь з металевою вставкою:

Вага полімеру з армуванням:

$$W_{comp} = W_{solid} - W_{steel} \quad (5.4)$$

$$W_{\text{comp}} = 0,028 - 0,01 = 0,018 \text{ кг}$$

Вага вуглеволокна:

$$W_{\text{CF_arm}} = W_{\text{comp}} \cdot R_{\text{CF}} \quad (5.5)$$

$$W_{\text{CF_arm}} = 0,018 \cdot 0,2 = 0,0036 \text{ кг}$$

Вага поліаміду в композиті:

$$W_{\text{PA6_arm}} = W_{\text{comp}} - W_{\text{CF_arm}} \quad (5.6)$$

$$W_{\text{PA6_arm}} = 0,018 - 0,0036 = 0,0144 \text{ кг}$$

Вартість матеріалу:

$$C_{\text{mat_comp}} = (W_{\text{PA6_arm}} \cdot C_{\text{PA6}}) + (W_{\text{CF_arm}} \cdot C_{\text{CF}}) \quad (5.7)$$

$$C_{\text{mat_comp}} = (0,0144 \cdot 450) + (0,0036 \cdot 2000) = 6,48 + 7,2 = 13,68 \text{ грн}$$

Вартість вставки:

$$C_{\text{steel_insert}} = W_{\text{steel}} \cdot C_{\text{steel}} \quad (5.8)$$

$$C_{\text{steel_insert}} = 0,01 \cdot 150 = 1,5 \text{ грн}$$

Загальна вартість матеріалів:

$$C_{\text{mat_arm}} = C_{\text{mat_comp}} + C_{\text{steel_insert}} \quad (5.9)$$

$$C_{\text{mat_arm}} = 13,68 + 1,5 = 15,18 \text{ грн}$$

Зарплата працівника на одну деталь

Розрахунок заробітної плати:

$$C_{\text{labor}} = 12,73 \text{ грн}$$

Енерговитрати на одну деталь

Вартість електроенергії на одну суцільну деталь:

$$C_{\text{energy}} = 3,46 \text{ грн}$$

Загальна вартість виготовлення

Суцільна деталь:

$$C_{\text{total_solid}} = C_{\text{mat_solid}} + C_{\text{labor}} + C_{\text{energy}} \quad (5.10)$$

$$C_{\text{total_solid}} = 21,28 + 12,73 + 3,46 = 37,47 \text{ грн}$$

Деталь з металевою вставкою

Розрахунок вартості виготовлення металевої вставки. Механічна обробка вставки

Вихідні дані:

- ❖ Час обробки однієї вставки: $t_{\text{insert}} = 0,25$ год (15 хвилин).
- ❖ Ставка за годину: $S_{\text{hour}} = 79,55$ грн/год

Зарплата на виготовлення вставки:

$$C_{\text{labor_insert}} = S_{\text{hour}} \cdot t_{\text{insert}} \quad (5.11)$$

$$C_{\text{labor_insert}} = 79,55 \cdot 0,25 = 19,88 \text{ грн}$$

Енерговитрати

- ❖ Енергоспоживання токарного верстата: $P_{\text{insert}} = 2,5$ кВт
- ❖ Тривалість обробки: $t_{\text{insert}} = 0,25$ год

Споживання енергії:

$$E_{\text{insert}} = P_{\text{insert}} \cdot t_{\text{insert}} \quad (5.12)$$

$$E_{\text{insert}} = 2,5 \cdot 0,25 = 0,62 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Вартість енергії:

$$C_{\text{energy_insert}} = E_{\text{insert}} \cdot C_E \quad (5.13)$$

$$C_{\text{energy_insert}} = 0,62 \cdot 4,32 = 2,67 \text{ грн}$$

Вартість матеріалу

Вага вставки залишається $W_{\text{steel}} = 0,01$ кг, а ціна сталі — $C_{\text{steel}} = 150$ грн/кг:

$$C_{\text{steel_insert}} = W_{\text{steel}} \cdot C_{\text{steel}} \quad (5.14)$$

$$C_{\text{steel_insert}} = 0,01 \cdot 150 = 1,5 \text{ грн}$$

Загальна вартість виготовлення вставки

$$C_{\text{insert}} = C_{\text{labor_insert}} + C_{\text{energy_insert}} + C_{\text{steel_insert}} \quad (5.15)$$

$$C_{\text{insert}} = 19,88 + 2,67 + 1,5 = 24,05 \text{ грн}$$

Результати розрахунків наведено у таблиці 5.1.

Таблиця. 5.1

Результати розрахунку собівартості базової та проектної втулки

Витрати	Суцільна деталь, грн	Деталь з вставкою, грн	Різниця, грн
Матеріали	21,28	15,18	-6,1
Виготовлення вставки	-	19,88	+19,88
Зарплата	12,73	12,73	0
Енерговитрати	3,46	6,13	+ 2,67
Загальна вартість	37,47	53,92	+16,45

Розрахунок витрат на модернізацію посадкових місць

Вихідні дані:

- ❖ Час розточування посадкового місця для однієї суцільної втулки:
 $t_{\text{rework_solid}} = 0,4$ год (24 хвилини).
- ❖ Споживання електроенергії токарним верстатом: $P_{\text{lathe}} = 2,5$ кВт.
- ❖ Кількість деталей за зміну: $N = 50$.
- ❖ Вартість електроенергії: $C_E = 4,32$ грн/кВт·год.
- ❖ Ставка за годину роботи: $S_{\text{hour}} = 156$ грн/год.

Розрахунок витрат для суцільної втулки

Зарплата працівника

Час роботи на одну деталь:

$$C_{\text{labor_solid}} = S_{\text{hour}} \cdot t_{\text{rework_}} \quad (5.16)$$

$$C_{\text{labor_solid}} = 156 \cdot 0,4 = 62,4 \text{ грн}$$

Енерговитрати

Споживання енергії:

$$E_{\text{rework_solid}} = P_{\text{lathe}} \cdot t_{\text{rework_}} \quad (5.17)$$

$$E_{\text{rework_solid}} = 2,5 \cdot 0,4 = 1 \text{ кВт·год}$$

Вартість енергії:

$$C_{\text{energy_solid}} = E_{\text{rework_solid}} \cdot C_E \quad (5.18)$$

$$C_{\text{energy_solid}} = 1 \cdot 4,32 = 4,32 \text{ грн}$$

Загальні витрати:

$$C_{\text{rework_solid}} = C_{\text{labor_solid}} + C_{\text{energy_solid}} \quad (5.19)$$

$$C_{\text{rework_solid}} = 62,4 + 4,32 = 66,72 \text{ грн}$$

Розрахунок витрат для втулки з армуванням**Зарплата працівника**

Час роботи на одну деталь:

$$C_{\text{labor_arm}} = S_{\text{hour}} \cdot t_{\text{rework_arm}} \quad (5.20)$$

$$C_{\text{labor_arm}} = 156 \cdot 0,1 = 15,6 \text{ грн}$$

Енерговитрати

Споживання енергії:

$$E_{\text{rework_arm}} = P_{\text{lathe}} \cdot t_{\text{rework_arm}} \quad (5.21)$$

$$E_{\text{rework_arm}} = 2,5 \cdot 0,1 = 0,25 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Вартість енергії:

$$C_{\text{energy_arm}} = E_{\text{rework_arm}} \cdot C_E \quad (5.22)$$

$$C_{\text{energy_arm}} = 0,25 \cdot 4,32 = 1,08 \text{ грн}$$

Загальні витрати:

$$C_{\text{rework_arm}} = C_{\text{labor_arm}} + C_{\text{energy_arm}} \quad (5.23)$$

$$C_{\text{rework_arm}} = 15,6 + 1,08 = 16,68 \text{ грн}$$

Результати розрахунків наведено на таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Результати розрахунків на модернізацію посадочних місць для сільськогосподарських машин

Витрати	Суцільна деталь, грн	Деталь з армуванням, грн	Різниця, грн
Зарплата	62,4	15,6	-46,8
Енерговитрати	4,32	1,08	-3,24
Загальна вартість	66,72	16,68	-50,04

Загальні економічні результати.

Тепер об'єднаємо витрати на виготовлення деталей та модернізацію посадкових місць.

Суцільна деталь:

$$C_{\text{final_solid}} = C_{\text{total_solid}} + C_{\text{rework_solid}} \quad (5.24)$$

$$C_{\text{final_solid}} = 37,47 + 62,4 = 99,87 \text{ грн}$$

Деталь з армуванням:

$$C_{\text{final_arm}} = C_{\text{total_arm}} + C_{\text{rework_arm}} \quad (5.25)$$

$$C_{\text{final_arm}} = 53,92 + 16,68 = 70,6 \text{ грн}$$

Порівняння загальних витрат на виготовлення та модернізацію сільськогосподарської машини наведено у таблиці 5.3

Таблиця 5.3

Порівняння загальних витрат на впровадження вдосконаленої деталі

Витрати	Суцільна деталь, грн	Деталь з армуванням, грн	Різниця, грн
Виготовлення деталей з ПКМ	37,47	53,92	+16,45
Модернізація рухомого з'єднання	62,4	16,68	-45,72
Загальні витрати	99,87	70,6	-29,27

Висновки

1. Використання деталей із металевими вставками дозволяє зменшити загальні витрати на 29,27 грн на кожній одиниці.
2. Втулки з армуванням є більш економічно ефективними завдяки меншій потребі в модернізації посадкових місць.
3. Додатковою перевагою деталей із армуванням є їхня вища міцність і довговічність, що скорочує витрати на ремонт у довгостроковій перспективі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У проведеній роботі було досліджено застосування полімерно-композитних матеріалів (ПКМ) для виготовлення втулок та інших рухомих з'єднань сільськогосподарської техніки, а також ефективність використання армованих вставок. Метою дослідження було оцінити переваги цих матеріалів у порівнянні з традиційними сталевими конструкціями, а також визначити їх експлуатаційні характеристики в умовах агресивного середовища, таких як ґрунтові операції з високою запиленістю та великою кількістю абразивних часток.

Результати показали, що застосування втулок з ПКМ дозволяє знизити знос деталей на 35% у порівнянні з традиційними сталевими матеріалами. Це забезпечує значне підвищення довговічності і надійності рухомих з'єднань сільськогосподарської техніки, що працює в умовах високих навантажень і агресивного середовища. Зокрема, втулки з армованими вставками продемонстрували значення напружень відмінне на 30% (з 121,6 МПа до 90,9 МПа) та зменшення деформації на 12%. Це також сприяло підвищенню стійкості конструкції до змін температурних і механічних навантажень, що зменшує кількість поломок і знижує витрати на ремонт.

Втулки з суцільними армованими вставками розміром 28–32 мм показали зниження переміщення на 15%, з 0,05056 мм до 0,0392 мм, що свідчить про значне покращення жорсткості конструкції. Це забезпечує стабільність роботи техніки в умовах високих навантажень та знижує ймовірність поломок.

Економічні розрахунки показали, що витрати на виготовлення суцільної деталі складають 37,47 грн на одиницю, тоді як для деталі з металевою вставкою — 53,92 грн, що дає різницю в 16,45 грн на деталь. Проте, з огляду на знижені витрати на модернізацію посадкових місць для втулок з армуванням, загальні витрати на одну деталь з армуванням

становлять 70,6 грн, що на 29,27 грн менше, ніж для суцільної втулки (99,87 грн). Загальна економічна вигода від використання втулок з армованими вставками проявляється не лише у зниженні витрат на виготовлення, а й у зменшенні витрат на модернізацію посадкових місць. Це дозволяє знизити витрати на модернізацію посадкових місць на 29,27 грн на деталь, що робить технологію вигідною для впровадження в серійне виробництво.

Крім того, використання ПКМ знижує потребу в мастильних матеріалах, що позитивно впливає на навколишнє середовище. Зменшення зношування та кількості відходів сприяє більш екологічному використанню сільськогосподарської техніки, знижуючи витрати на утилізацію.

Застосування ПКМ і армованих вставок у конструкціях втулок має не лише технічні, але й економічні та екологічні переваги, що робить ці технології доцільними для впровадження у виробництво сільськогосподарської техніки. Також, при роботі з ПКМ необхідно дотримуватися вимог з охорони праці, оскільки робота з такими матеріалами передбачає використання спеціальних технологій і обладнання, що потребує додаткових запобіжних заходів для забезпечення безпеки працівників.

СПИСОК ВИКРОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алієв, Е. Б. О. (2023). Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва. *Київ: Аграрна наука.*
2. Апанович, А. І. (2021). Обґрунтування параметрів деталей трибоспрязень сільськогосподарської техніки.
3. Беззубка, В. (2024). Інноваційні технології сільського господарства. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції „Формування механізму зміцнення конкурентних позицій національних економічних систем у глобальному, регіональному та локальному вимірах “: зб. тез доповідей, 91-92.*
4. Борак, К. В. (2020). Вплив вологості ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин.
5. Борак, К. В. (2021). *Аналіз умов експлуатації, механізму та характеру зношування деталей машин, що працюють у середовищі ґрунту* (Doctoral dissertation, Полтавський державний аграрний університет).
6. Борак, К. В., & Руднік, Д. І. (2023). Абразивні властивості середовища ґрунту. *Збірник праць X Міжнародної науково-технічної он-лайн конференції «Крамаровські читання» до нагоди, 1906-1987.*
7. Брацлавець, Б. С. (2021, May). МОДЕРНІЗАЦІЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ПРИ РЕМОНТІ. In *The 2nd International scientific and practical conference “Results of modern scientific research and development” (May 2-4, 2021) Barca Academy Publishing, Madrid, Spain. 2021. 640 p. (p. 146).*
8. Ванжа, В., & Потапова, В. (2020). ПРОБЛЕМИ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ. *Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки, 52-58.*
9. Вітер, В. А. (2023). Удосконалення використання техніки при вирощуванні кукурудзи на зерно з розробкою операційної технології оранки.

10. Войтюк, Д. Г., Мартишко, В. М., Гуменюк, Ю. О., Волянський, М. С., Сівак, І. М., & Курка, В. П. (2022). Практикум з теорії та розрахунку сільськогосподарських машин.
11. Гусачук, Д. А., Мельничук, М. Д., Парфентьева, І. О., Фурс, Т. В., Боярська, І. В., & Карпюк, М. М. (2023). ПРОТОТИПУВАННЯ ТА СТРАТЕГІЯ РЕВЕРС ІНЖИНІРИНГУ НА ПРИКЛАДІ ІНЖЕНЕРНИХ ЗАДАЧ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА. *Наукові нотатки*, (76), 58-65.
12. Деркач, О. Д., Макаренко, Д. О., & Вітер, В. А. (2024). Розробка та обґрунтування складу полімерно-композитних матеріалів для трибоспрязень сільськогосподарської техніки.
13. Деркач, О. Д., Макаренко, Д. О., Муранов, Є. С., & Лободенко, А. В. (2021). Підвищення довговічності рухомих з'єднань посівних машин впровадженням прогресивних конструкційних матеріалів/Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного [Електронний ресурс]. *Мелітополь: ТДАТУ*.
14. Деркач, О. Д., Макаренко, Д. О., Муранов, Є. С., Субочев, О. І., & Деркач, П. О. (2021). *Застосування полімерних композитів у конструкціях агророботів та сільськогосподарської техніки* (Doctoral dissertation, Дніпровський державний аграрно-економічний університет).
15. Деркач, О. Д., Макаренко, Д. О., Сукачов, В. В., Кабат, О. С., & Баштанник, П. І. РОЗРОБКА ПОЛІМЕРНО-КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ КОНСТРУКЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ. *Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів ТАСХ-2023: Матеріали III Міжнародної наукової конференції. 20 травня 2024 р., м. Дніпро.– Дніпро: “Середняк ТК”, 2024.–216 с., 52.*
16. Захожий, І. В. (2021). Поняття та джерела охорони праці в сільському господарстві.
17. Земке, В. М., & Чопик, Н. В. (2023). Дослідження термомеханічних властивостей нанокompозитів ПА-6.

18. Литвиненко, О. А., Бойко, Ю. І., & Яновський, В. А. (2020). САД-САМ технології проєктування та виготовлення деталей на верстатах з ЧПК.
19. Макаренко, Д. О., Деркач, Д. О., Муранов, Є. С., & Івашкович, М. М. (2022). Вплив мастильних матеріалів на довговічність трибоспряжень.
20. Макаренко, Д. О., Деркач, О. Д., Говоруха, В. Б., & Веселовська, Н. Р. Модернізація рухомих з'єднань секції посівного комплексу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2023.№ 4 (123). С. 12-20. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-4-2.*
21. Марусенко, С. І., Ткачук, М. А., & Назаренко, С. О. (2023). Цифрове проєктування та моделювання—важливі технології Індустрії 4.0.
22. Масюк, А. С., Левицький, В. Є., Гуменецький, Т. В., & Білий, Л. М. (2022). Морфологія і фізико-механічні властивості модифікованих поліамідів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, (58,№ 1), 132-138.
23. МАШИН, Т. П. С. (2023). СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали III Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених (Запоріжжя, 30 січня-24 лютого 2023 р.)/ТДАТУ: ред. кол., СВ Кюрчев, ВМ Кюрчев, ВТ Надикто, ОГ Скляр [та ін.]—Запоріжжя: ТДАТУ, 2023.—245 с. У збірнику представлені матеріали міжнародної науково-практичної*, 128.
24. Мороз, С. М., Васильковський, О. М., & Лещенко, С. М. (2023). Використання САД-програм при проєктуванні сільськогосподарських машин. *Сільськогосподарські машини*, (49), 15-21.
25. Пастухов, В. І., & Цяпкало, Р. О. (2021). Вплив механіко-технологічних властивостей ґрунту на роботу сільськогосподарських машин і знарядь.

26. Плашихін, С. В. (2023). Параметричне моделювання технологічних процесів. Розділ 2. Моделювання фізичних процесів в CAD/CAE системі SolidWorks.
27. Попов, В. А. (2021). Ефективність використання композитних матеріалів для рухомих з'єднань посівних машин ділянок гібридизації.
28. Риндяєв, В. І. (2021). Шляхи підвищення працездатності сільськогосподарських машин.
29. ЯРЕМЧУК, Н. (2023). СИСТЕМИ КОМП'ЮТЕРНОГО АПАРАТНОГО CAD/CAM МОДЕЛЮВАННЯ В СЛЮСАРНІЙ СПРАВІ. In *ЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ: СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ* (pp. 443-444).
30. Chang, K. H. (2024). *Motion Simulation and Mechanism Design with SOLIDWORKS Motion 2024*. SDC publications.
31. Feng, N., Zhao, H., & Singh, P. K. (2022). Modeling in mechanical engineering cad technology. *Computer-Aided Design and Applications*, 19, 1-14.
32. Kobets, A., Aliiev, E., Tesliuk, H., & Aliieva, O. (2023). Simulation of the interaction between the working bodies of tillage machines and the soil in Simcenter STAR-CCM+. *Machinery & Energetics*, 14(1).
33. Letchumanan, S. M., Tajul Arifin, A. M., Taib, I., Rahim, M. Z., & Nor Salim, N. A. (2021). Simulating the optimization of carbon fiber reinforced polymer as a wrapping structure on piping system using SolidWorks. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 21, 2038-2063.
34. Lewicka, K., Szymanek, I., Rogacz, D., Wrzalik, M., Łagiewka, J., Nowik-Zajac, A., ... & Rychter, P. (2024). Current Trends of Polymer Materials' Application in Agriculture. *Sustainability (2071-1050)*, 16(19).
35. Sikder, A., Pearce, A. K., Parkinson, S. J., Napier, R., & O'Reilly, R. K. (2021). Recent trends in advanced polymer materials in agriculture related applications. *ACS Applied Polymer Materials*, 3(3), 1203-1217.

36. Soni, A., Das, P. K., Yusuf, M., Ridha, S., Kamyab, H., Chelliapan, S., ... & Mussa, Z. H. (2024). Valorization of post-consumers plastics and agro-waste in sustainable polymeric composites for tribological applications. *Waste and Biomass Valorization*, 15(3), 1739-1755.
37. Zeid, I. (2021). *Mastering Solidworks*. Macromedia Press.

ДОДАТКИ

Додаток А – Демонстраційний матеріал до дипломної роботи

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра експлуатації машинно-тракторного парку

Обґрунтування конструкції деталей рухомих з'єднань виготовлених з композитних матеріалів

Демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-3-23 за

спеціальністю 208 «Агроінженерія»

Вітер Віталій Андрійович

Керівник: к.т.н., доцент Макаренко Дмитро Олександрович

Продовження додатку А

Мета і завдання дослідження. Основною метою роботи є наукове обґрунтування та розробка конструкції деталей рухомих з'єднань із використанням полімерно-композитних матеріалів, які забезпечать підвищення ефективності й надійності сільськогосподарської техніки. Для досягнення цієї мети виконували такі завдання:

- Провести аналіз експлуатаційних умов і основних факторів, що впливають на знос рухомих з'єднань у сільськогосподарській техніці.
- Вивчити фізико-механічні властивості ПКМ та їх адаптивність до умов роботи вузлів тертя.
- Розробити конструкції рухомих з'єднань із застосуванням ПКМ, включаючи варіанти з армованими вставками.
- Виконати чисельне моделювання навантажень і напружень у деталях рухомих з'єднань із ПКМ за допомогою сучасного програмного забезпечення.
- Провести експериментальні дослідження розроблених конструкцій і порівняти їхні характеристики з традиційними рішеннями.
- Навести вимоги безпеки при роботі з полімерними матеріалами.
- Виконати економічну оцінку роботи.

Продовження додатку А

Вплив робочого середовища на спрацювання рухомих з'єднань

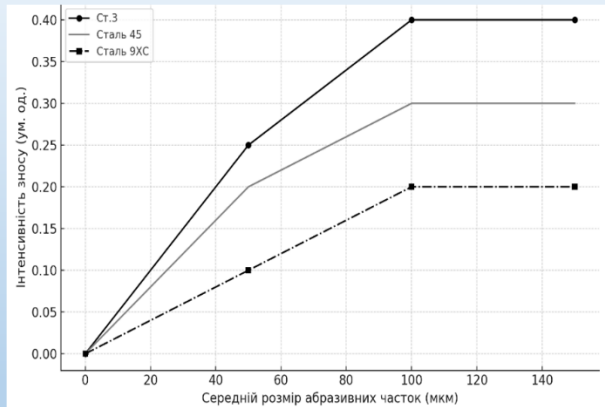
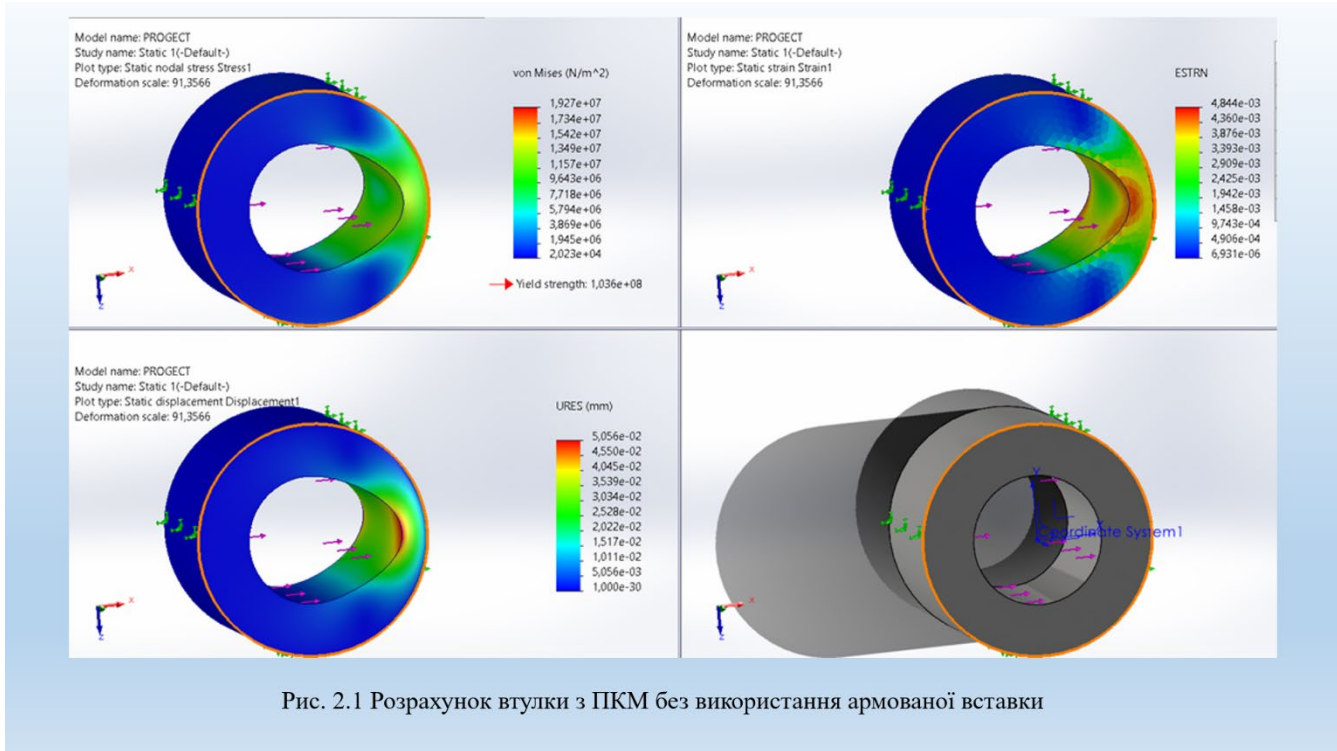


Рис. 1.1. Залежність зносу сталі від розміру абразивних частинок

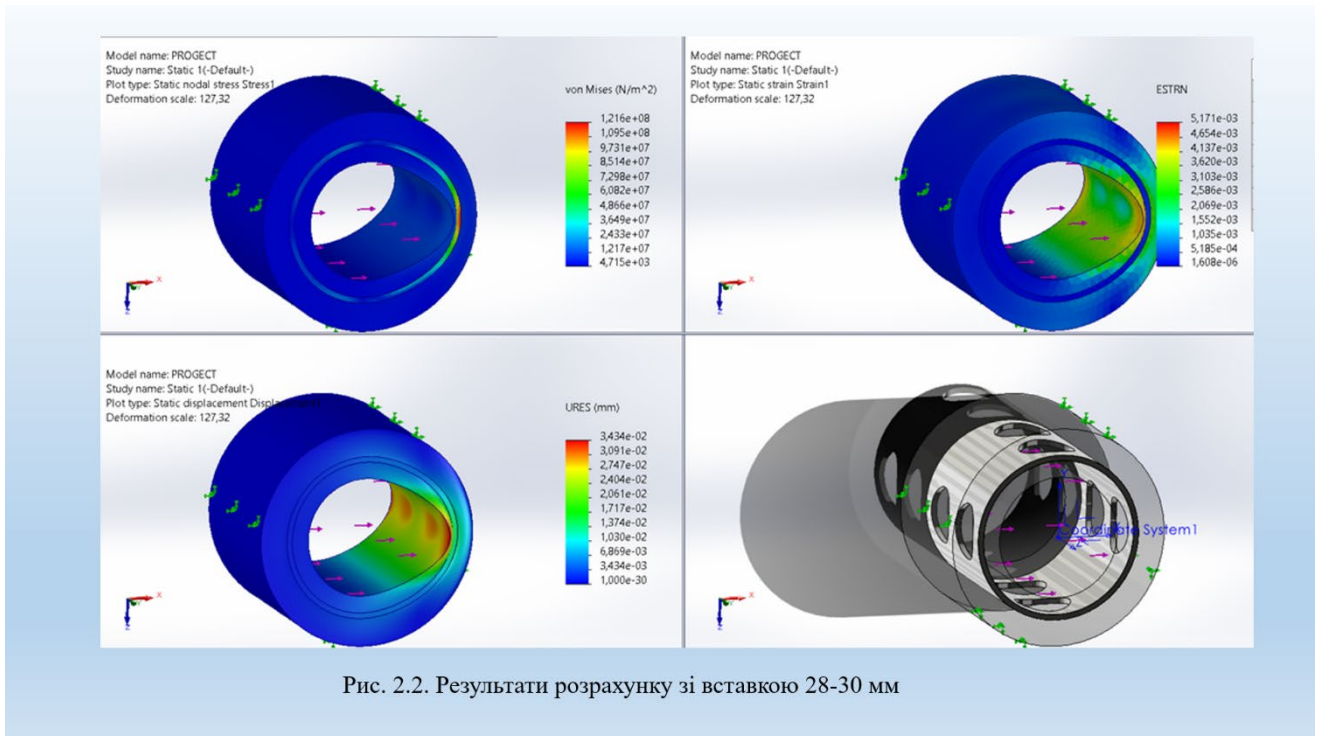


Рис. 1.2. Групи факторів зносу деталей та вузлів сільськогосподарської техніки

Продовження додатку А



Продовження додатку А



Продовження додатку А

Табл.1 Результати дослідження втулок ПКМ зі змінними вставками

Номер досліду	1	2	3	4	5	6	7
	Суцільна втулка 22-39,5мм	З перфорованою вставкою 28-30 мм, 30-32 мм, 28-32мм			З суцільною вставкою 28-30 мм, 30-32 мм, 28-32мм		
Напруження, (МПа)	19,27	121,6	120,3	98,07	95,36	90,9	68,38
Статичне деформування, (%)	0,004844	0,005171	0,00578	0,005262	0,00554	0,005739	0,005591
Переміщення, (мм)	0,05056	0,03434	0,03824	0,03022	0,03563	0,0392	0,03138
Коефіцієнт запасу міцності	-	-	-	-	2,3	2,4	3,2



Рис. 3.2 Діаграма напружень до номеру досліду



Рис. 3.1 Діаграма переміщень



Рис. 3.3 Діаграма статичного деформування

Продовження додатку А

Параметр	Константа (β_0)	Коефіцієнт типу (β_1)	R ²	P-value (β_1)
Напруження (МПа)	62,206	17,493	0,141	0,407
Деформація (%)	0,004972	0,000347	0,595	0,042
Переміщення (мм)	0,044024	-0,005400	0,361	0,153

Табл.2 Результати аналізу рівнянь регресії

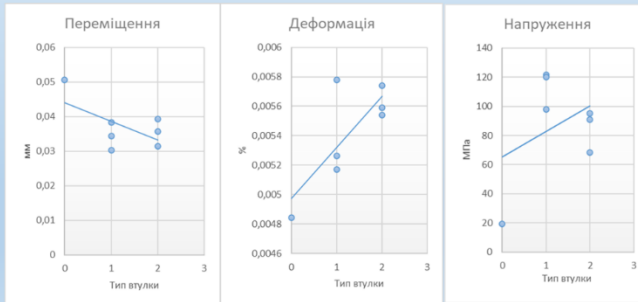


Рис. 4.1 Графіки отримані відповідно до рівнянь регресії

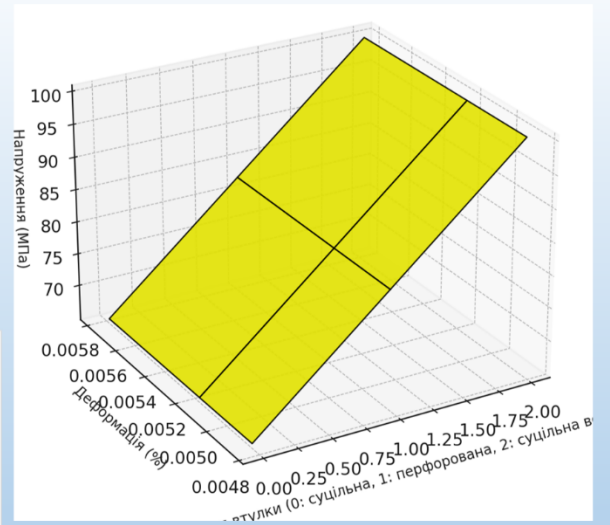


Рис. 4.2. Поверхня рівняння регресії – напруження від типу втулки та деформації

Продовження додатку А

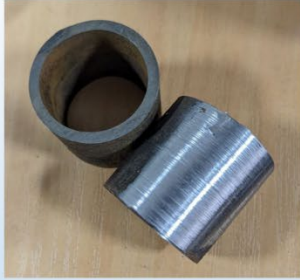


Рис.5.1 Підготовлена металева вставка



Рис. 5.2. Проточування металевої вставки



Рис. 5.3 Металева вставка з перфорованими отворами

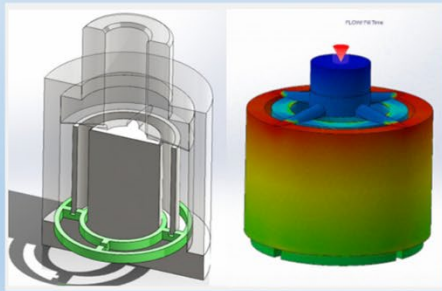


Рис. 5.4 Моделювання в САМ системі процесу виготовлення деталі через відлив прес-форму



Рис. 5.5. Прес-форма для виготовлення втулки литтям під тисом



Рис. 5.6. Готові втулки з ПКМ з варіаціями внутрішніх вставок

Продовження додатку А



Рис. 6.1. Лабораторна прес-установка для проведення досліджень навантажень на виготовлені зразки втулок



Рис. 6.2. Результати граничних навантажень для суцільної втулки без армування

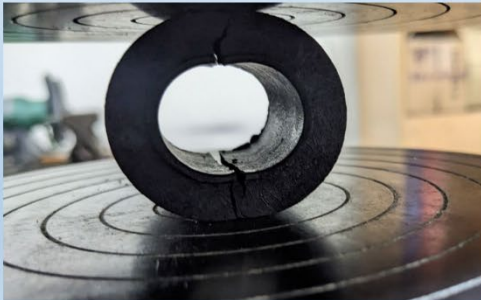


Рис. 6.3 Дослідження суцільної втулки на лабораторному стенді

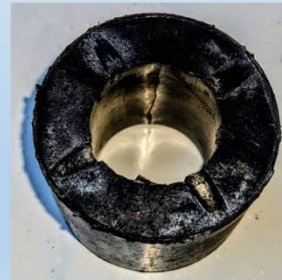


Рис. 6.4 Візуальні пошкодження втулки з перфорованою вставкою при граничних навантаженнях

Продовження додатку А

Табл.3 Результати лабораторних досліджень випробування втулок

Номер досліджу	Тип втулки	Навантаження (кН)	Статичне деформування (%)	Переміщення (мм)
1	Суцільна	6,35	0,00512	0,04852
2	Суцільна	6,41	0,00496	0,0498
3	Суцільна	6,44	0,00518	0,05011
Середнє		6,4	0,00509	0,04948
4	З перфорованою вставкою	8,95	0,00534	0,03451
5	З перфорованою вставкою	8,98	0,00521	0,03472
6	З перфорованою вставкою	8,99	0,00529	0,03483
Середнє		8,973	0,00528	0,03469
7	З суцільною вставкою	9,43	0,00539	0,03118
8	З суцільною вставкою	9,45	0,00542	0,03125
9	З суцільною вставкою	9,47	0,00537	0,03111
Середнє		9,45	0,00539	0,03118



Рис. 7.1. Діаграма залежності міцності від досліджу



Рис. 7.2. Діаграма статичного деформування деталі відповідно до номеру досліджу

Продовження додатку А

Витрати	Суцільна деталь, грн	Деталь з вставкою, грн	Різниця, грн
Матеріали	21,28	15,18	-6,1
Виготовлення вставки	-	19,88	+19,88
Зарплата	12,73	12,73	0
Енерговитрати	3,46	6,13	+ 2,67
Загальна вартість	37,47	53,92	+16,45

Табл. 4. Результати розрахунку собівартості базової та проектної втулки

Витрати	Суцільна деталь, грн	Деталь з армуванням, грн	Різниця, грн
Зарплата	62,4	15,6	-46,8
Енерговитрати	4,32	1,08	-3,24
Загальна вартість	66,72	16,68	-50,04

Табл. 5. Результати розрахунків на модернізацію посадочних місць для сільськогосподарських машин

Витрати	Суцільна деталь, грн	Деталь з армуванням, грн	Різниця, грн
Виготовлення	37,47	53,92	+16,45
Модернізація	62,4	16,68	-45,72
Загальні витрати	99,87	70,6	-29,27

Табл. 6. Порівняння загальних витрат на впровадження вдосконаленої деталі

Висновки

- Використання деталей із металевими вставками дозволяє зменшити загальні витрати на 29,27 грн на кожній одиниці.
- Втулки з армуванням є більш економічно ефективними завдяки меншій потребі в модернізації посадкових місць.
- Додатковою перевагою деталей із армуванням є їхня вища міцність і довговічність, що скорочує витрати на ремонт у довгостроковій перспективі.

Продовження додатку А

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У проведеній роботі було досліджено застосування полімерно-композитних матеріалів (ПКМ) для виготовлення втулок та інших рухомих з'єднань сільськогосподарської техніки, а також ефективність використання армованих вставок. Метою дослідження було оцінити переваги цих матеріалів у порівнянні з традиційними сталевими конструкціями, а також визначити їх експлуатаційні характеристики в умовах агресивного середовища, таких як ґрунтові операції з високою запиленістю та великою кількістю абразивних часток.

Результати показали, що застосування втулок з ПКМ дозволяє знизити знос деталей на 35% у порівнянні з традиційними сталевими матеріалами. Це забезпечує значне підвищення довговічності і надійності рухомих з'єднань сільськогосподарської техніки, що працює в умовах високих навантажень і агресивного середовища. Зокрема, втулки з армованими вставками продемонстрували значення напружень відмінне на 30% (з 121,6 МПа до 90,9 МПа) та зменшення деформації на 12%. Це також сприяло підвищенню стійкості конструкції до змін температурних і механічних навантажень, що зменшує кількість поломок і знижує витрати на ремонт.

Втулки з суцільними армованими вставками розміром 28–32 мм показали зниження переміщення на 15%, з 0,05056 мм до 0,0392 мм, що свідчить про значне покращення жорсткості конструкції. Це забезпечує стабільність роботи техніки в умовах високих навантажень та знижує ймовірність поломок.

Економічні розрахунки показали, що витрати на виготовлення суцільної деталі складають 37,47 грн на одиницю, тоді як для деталі з металевою вставкою — 53,92 грн, що дає різницю в 16,45 грн на деталь. Проте, з огляду на знижені витрати на модернізацію посадкових місць для втулок з армуванням, загальні витрати на одну деталь з армуванням становлять 70,6 грн, що на 29,27 грн менше, ніж для суцільної втулки (99,87 грн). Загальна економічна вигода від використання втулок з армованими вставками проявляється не лише у зниженні витрат на виготовлення, а й у зменшенні витрат на модернізацію посадкових місць. Це дозволяє знизити витрати на модернізацію посадкових місць на 29,27 грн на деталь, що робить технологію вигідною для впровадження в серійне виробництво.

Крім того, використання ПКМ знижує потребу в мастильних матеріалах, що позитивно впливає на навколишнє середовище. Зменшення зношування та кількості відходів сприяє більш екологічному використанню сільськогосподарської техніки, знижуючи витрати на утилізацію.

Продовження додатку А

Дякую за увагу!