

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**Кунашенко Ростислав Володимирович**

**УДК 631.3**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЕТАЛЕЙ**  
**ТРИБОСПРЯЖЕНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ**  
**СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ АПК**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Кунашенко Р.В.

**Керівник роботи**  
кандидат технічних наук, ст. викладач  
Р. С. Грудовий

**Житомир – 2024**

## АНОТАЦІЯ

**Кунашенко Ростислав Володимирович. Наукове обґрунтування параметрів деталей трибоспряжень для підвищення ефективності сільськогосподарської техніки АПК. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

В магістерській роботі дослідження було спрямоване на аналіз умов роботи рухомих з'єднань сільськогосподарської техніки, що характеризуються підвищеним зносом через агресивні фактори середовища, зокрема запиленість та недостатнє змащування. Основною проблемою є зниження надійності механізмів через швидкий знос, спричинений недотриманням умов технічного обслуговування. Впровадження полімерно-композитних матеріалів (ПКМ) для рухомих з'єднань розглядається як перспективний напрямок підвищення довговічності механізмів, завдяки зниженню зносу та зменшенню необхідності частого обслуговування.

Метою дослідження було визначення фізико-механічних і триботехнічних характеристик ПКМ для використання у сільськогосподарській техніці. Зразки виготовляли методом лиття під тиском, і випробування проводили на сертифікованих машинах для оцінки їх міцності, ударної в'язкості та зносостійкості. Триботехнічні властивості досліджували на машині тертя СМЦ-2, а для оцінки зносу використовували спеціальні деталі-калібри з різними зазорами.

Отримані результати підтвердили відповідність ПКМ заявленим технічним параметрам. Виявлено, що при дотриманні оптимальних параметрів експлуатації (зазор 300...350 мкм і навантаження до 250 Н) знос матеріалу мінімальний. Однак при перевищенні навантаження понад 250 Н знос значно зростає, що вимагає врахування температурної компенсації. Правильний вибір зазору та контроль умов експлуатації дозволяють значно продовжити термін служби трибоспряжень із ПКМ.

Проведені експерименти підтвердили ефективність застосування полімерно-композитних матеріалів у рухомих з'єднаннях сільськогосподарської техніки за умов дотримання оптимальних режимів експлуатації.

*Ключові слова:* дослідження, зношування, сільськогосподарська техніка, композитні матеріали, трибоспряження, експеримент.

## ANNOTATION

**Rostyslav Volodymyrovych Kunashenko. Scientific substantiation of the parameters of the parts of tribocouplers for increasing the efficiency of agricultural machinery of the APK. - Qualification work on manuscript rights.**

Qualification work for obtaining a master's degree in the specialty 208 Agricultural engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

In the master's thesis, the research was aimed at analyzing the working conditions of moving joints of agricultural machinery, which are characterized by increased wear due to aggressive environmental factors, in particular, dustiness and insufficient lubrication. The main problem is a decrease in the reliability of mechanisms due to rapid wear caused by non-compliance with maintenance conditions. The introduction of polymer-composite materials (PCM) for moving joints is considered as a promising direction of increasing the durability of mechanisms, thanks to the reduction of wear and the reduction of the need for frequent maintenance.

The purpose of the study was to determine the physical, mechanical and tribotechnical characteristics of PCM for use in agricultural machinery. The samples were produced by injection molding and tested on certified machines to evaluate their strength, impact toughness and wear resistance. The tribotechnical properties were studied on the SMC-2 friction machine, and special gauge parts with different clearances were used to assess wear.

The obtained results confirmed the compliance of PCM with the declared technical parameters. It was found that when optimal operating parameters are observed (gap 300...350  $\mu\text{m}$  and load up to 250 N), wear of the material is minimal. However, when the load exceeds 250 N, the wear increases significantly, which requires consideration of temperature compensation. Correct selection of the gap and control of operating conditions allow to significantly extend the service life of tribocouplers with PCM.

The conducted experiments confirmed the effectiveness of the use of polymer-composite materials in moving joints of agricultural machinery under conditions of compliance with optimal operating conditions.

*Key words:* research, wear, agricultural machinery, composite materials, tribocoupling, experiment.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ВСТУП.....</b>                                                                                                                          | <b>5</b>  |
| <b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТРИБОСПРЯЖЕНЬ У СІЛЬСЬКО-ГОСПОДАРСЬКІЙ ТЕХНІЦІ.....</b> | <b>8</b>  |
| 1.1. Аналіз умов роботи рухомих з'єднань сільськогосподарської техніки.....                                                                | 8         |
| 1.2. Шляхи підвищення довговічності трибоспряжень аграрної техніки.....                                                                    | 14        |
| <b>Висновки до 1-го розділу.....</b>                                                                                                       | <b>24</b> |
| <b>РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМА ТА МЕТОДОЛОГІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>                                                                 | <b>26</b> |
| 2.1. Планування та мета досліджень.....                                                                                                    | 26        |
| 2.2. Процес виготовлення зразків і деталей для експериментальних досліджень.....                                                           | 28        |
| 2.3. Методологія дослідження фізико-механічних властивостей експериментальних зразків.....                                                 | 32        |
| 2.4. Методи оцінки триботехнічних властивостей матеріалів і рівня зносу експериментальних деталей.....                                     | 35        |
| <b>Висновки до 2-го розділу.....</b>                                                                                                       | <b>38</b> |
| <b>РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ.....</b>                                                                                             | <b>39</b> |
| 3.1. Результати досліджень фізико-механічних характеристик зразків.....                                                                    | 39        |
| 3.2. Оцінка триботехнічних властивостей матеріалу і рівня зносу експериментальних деталей.....                                             | 42        |
| <b>Висновки до 3-го розділу.....</b>                                                                                                       | <b>45</b> |
| <b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>                                                                                                              | <b>46</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>                                                                                                     | <b>48</b> |

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження** обумовлена важливою роллю сільськогосподарської техніки в агропромисловому комплексі (АПК). Зростаючі вимоги до ефективності та надійності техніки спонукають до пошуку нових рішень, спрямованих на зменшення зносу та підвищення тривалості експлуатації машин і агрегатів.

Удосконалення існуючих конструкцій агротехніки дозволяє підвищити ефективність виконання технологічних операцій, що позитивно впливає на розвиток культурних рослин і, як наслідок, призводить до зростання врожайності. Одним із ключових напрямів вдосконалення конструкцій сільськогосподарської техніки є збільшення робочої ширини та розробка комбінованих агрегатів. Це сприяє зменшенню кількості машин, необхідних для вчасного виконання технологічних завдань, та підвищує вимоги до їх надійності. Одними з основних елементів, що впливають на довговічність техніки, є рухомі з'єднання.

Один зі шляхів підвищення довговічності трибосполучень полягає у регулярному технічному обслуговуванні. Проте це потребує додаткового часу, що для деяких агрегатів може займати кілька годин. Відомо про позитивний вплив застосування в конструкції трибосполучень самозмащувальних полімерно-композитних матеріалів. Водночас необхідно точно визначати режими роботи і параметри деталей трибосполучень для кожної конкретної сільськогосподарської машини.

Одним із ключових аспектів, що впливають на функціонування сільськогосподарської техніки, є трибоспрямлення - механічні пари поверхонь, що працюють у контакті та піддаються тертю. Оптимізація параметрів трибоспрямлень дозволяє знизити витрати на обслуговування та ремонт техніки, забезпечуючи тим самим підвищення її продуктивності та зниження експлуатаційних витрат.

У контексті зростаючих обсягів виробництва в АПК, використання науково обґрунтованих методів для вибору матеріалів і параметрів трибоспрямижень сприятиме підвищенню енергоефективності та збільшенню ресурсу експлуатації техніки. Це, в свою чергу, дозволить зменшити загальну вартість виробничого процесу і зробить сільське господарство більш конкурентоспроможним.

Отже, дослідження, спрямоване на вдосконалення параметрів трибоспрямижень, є необхідним кроком до підвищення ефективності сільськогосподарської техніки, що має прямий вплив на економічні показники аграрного сектору.

**Об'єктом дослідження** є процес зміни інтенсивності зношування залежно від режиму роботи та параметрів трибосполучень.

**Предметом дослідження** є закономірності зміни ступеня зносу деталей, виготовлених із полімерно - композитних матеріалів, залежно від параметрів трибосполучень.

**Метою роботи** є наукове обґрунтування параметрів деталей трибоспрямижень, що використовуються у сільськогосподарській техніці. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз умов експлуатації трибоспрямижень у сільськогосподарській техніці.
2. Визначити навантаження в рухомих з'єднаннях та дослідити режими їхньої роботи.
3. Розробити програму досліджень та описати методики проведення експериментальних робіт.
4. Виявити залежність зносу експериментальних деталей від параметрів трибоспрямижень.

**Методи дослідження.** Дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів та рівня зносу здійснювались відповідно до стандартних методик (ДСТУ 10073:2021 та ДСТУ EN ISO 527-1:2020), а також за авторськими

підходами. Обробка результатів експериментів та їхня інтерпретація виконувалась з використанням програмного забезпечення.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що отримані дані надають змогу розробити рекомендації щодо параметрів трибоспряжень, виготовлених із полімерно-композитних матеріалів. Результати можуть бути застосовані під час проєктування нових або модернізації вже існуючих сільськогосподарських машин АПК.

**Обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 20 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 50 сторінок комп'ютерного тексту, містить 25 рисунки і 3 таблиці.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТРИБОСПРЯЖЕНЬ У СІЛЬСЬКО-ГОСПОДАРСЬКІЙ ТЕХНІЦІ**

### **1.1. Аналіз умов роботи рухомих з'єднань сільськогосподарської техніки**

Рухомі з'єднання у сільськогосподарських машинах працюють в умовах високих механічних навантажень, постійного тертя та дії агресивних зовнішніх факторів, таких як пил, волога, бруд та агрохімікати. Ці умови значно впливають на знос і довговічність трибосполучень, що, у свою чергу, відображається на ефективності роботи всієї техніки [1].

Сільськогосподарські машини зазвичай працюють у відкритих умовах протягом тривалих періодів часу, що також сприяє підвищеному навантаженню на рухомі з'єднання. Крім того, через циклічність навантажень (чергування роботи і простою), матеріали, з яких виготовлені трибоспряження, піддаються впливу змінних температур, що може спричиняти термічні деформації та прискорений знос.

Щоб забезпечити довговічність і надійність цих з'єднань, важливо вибрати матеріали з високими антифрикційними властивостями, стійкі до корозії та здатні витримувати динамічні навантаження. Використання полімерно-композитних матеріалів та регулярне технічне обслуговування є важливими заходами для зменшення зношування і продовження терміну служби рухомих з'єднань сільськогосподарської техніки [1].

Основним способом підвищення ефективності вирощування сільськогосподарських культур є збільшення продуктивності машинно-тракторних агрегатів (МТА). Це зумовлює розробку складних механізмів і обладнання, а також ускладнює їх технічне обслуговування. Вчасне та якісне обслуговування техніки є ключовим чинником для забезпечення тривалого терміну служби сучасних машин. Тертя відіграє важливу роль у нашій життєдіяльності - від створення тепла, виробництва товарів до руху в просторі. Однак, будь-яке тертя супроводжується процесами зношування взаємодіючих

поверхонь. Зношування, у свою чергу, змінює геометричні параметри деталей трибосполучень, що з часом, при досягненні критичних значень, призводить до втрати працездатності рухомих з'єднань.

Зношування можна класифікувати на кілька типів: механічне, гідроабразивне, кавітаційне та інші. Механічне або абразивне зношування є одним із найінтенсивніших видів тертя, що значно зменшує термін служби трибосполучень. Деякі дослідники стверджують, що абразивний знос є основною проблемою для забезпечення довговічності рухомих пар і становить близько 55 % випадків втрати їх працездатності [1].

Умови роботи сільськогосподарської техніки характеризуються високим вмістом абразивних частинок у робочій зоні. Основними джерелами абразивних частинок під час виконання технологічних операцій є ґрунт і його складові.

Аналізуючи роботу ґрунтообробного або посівного машинно-тракторного агрегату (МТА), можна помітити значну кількість ґрунтових частинок, які знаходяться в зоні роботи агрегату (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Наявність частинок ґрунту в робочій зоні МТА при виконанні обробітку ґрунту та сівби

Основні аспекти трибосполучень у сільськогосподарській техніці:

1. Типи трибосполучень:

- Ковзання: Наприклад, підшипники ковзання, напрямні плити.

- Качення: Кулькові та роликові підшипники.
- Змішаного тертя: Наприклад, шарнірні з'єднання.

## 2. Матеріали для трибосполучень:

- Металеві матеріали: сталь, бронза, чавун, алюмінієві сплави.
- Полімери та композити: текстоліт, капролон, поліамід.
- Комбіновані: металополімерні матеріали для зменшення маси та поліпшення зносостійкості.

## 3. Змащувальні матеріали:

- Використання мастил (густих, рідких або сухих).
- Спеціальні добавки для зменшення тертя та підвищення зносостійкості.

## 4. Умови експлуатації:

- Робота в умовах пилу, вологи, бруду.
- Температурні коливання (від  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ ).
- Динамічні навантаження.

## 5. Проблеми трибосполучень:

- Зношування (абразивне, адгезійне, корозійне).
- Нестабільність змащувального шару.
- Поломка деталей через втомленість матеріалу.

## Методи підвищення довговічності трибосполучень:

### 1. Матеріалознавчі підходи:

- Використання спеціальних сплавів із високою зносостійкістю.
- Нанесення зносостійких покриттів (нітридування, хромування, плазмове напилення).

### 2. Оптимізація конструкції:

- Розробка вузлів із мінімальними втратами на тертя.
- Вибір відповідних геометричних параметрів.

### 3. Удосконалення змащування:

- Використання автоматичних систем змащування.
- Застосування мастил із наночастинками.

4. Моніторинг стану трибосполучень:
  - Вібраційна діагностика.
  - Аналіз мастил на предмет металевих домішок.
5. Використання композитних матеріалів:
  - Наприклад, полімерів із добавками, що зменшують тертя.

Приклади трибосполучень у сільськогосподарській техніці:

- Підшипники в осевих з'єднаннях тракторів.
- Шарніри в гідравлічних системах.
- Напрямні плити в зернових комбайнах.
- Трансмісійні вузли в культиваторах та сівалках.
- 

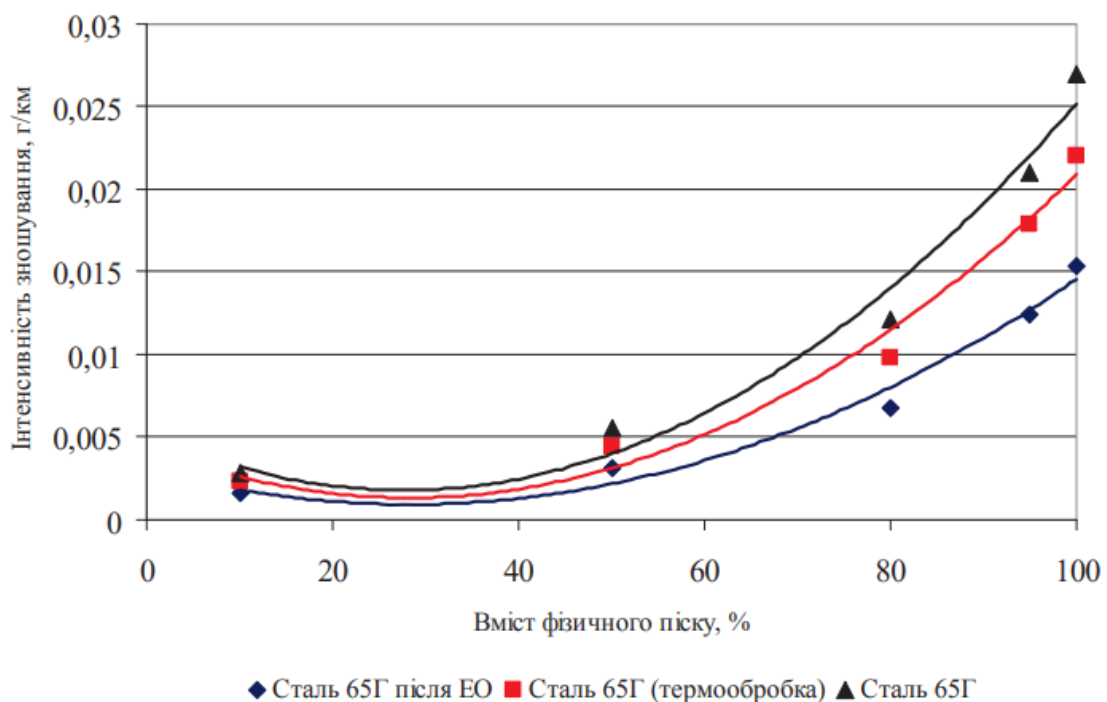


Рис. 1.2. Інтенсивність зношування від вмісту піску у ґрунті [7]

У дослідженні [7] детально розглянуто знос металів під дією абразивних частинок різних типів ґрунтів (рис. 1.2).

На основі представлених даних можна сказати, що вміст піску в ґрунті до 45-50% не має значного впливу на швидкість зношування. Однак, у цьому

дослідженні не було достатньо приділено уваги вологості ґрунту, оскільки при високих показниках вологи глина і мул здатні зв'язувати пісок, утворюючи абразивну "пасту". Така суміш змінює режим тертя від незакріплених абразивних частинок до частково або повністю закріпленого.

Згідно з інструкціями з експлуатації сільськогосподарської техніки, машини можуть зберігатися на відкритих майданчиках протягом коротких періодів між змінами. Це призводить до потрапляння вологи від опадів або з повітря у рухомі з'єднання. Як результат, прискорюються процеси корозії металів і сплавів, а також відбувається зволоження ґрунту, що потрапив у трибосполучення під час виконання технологічних операцій.

Простій техніки, спричинений необхідністю усунення поломок або проведенням технічного обслуговування (ТО), може стати причиною порушення агротехнічних строків виконання операцій, таких як сівба, що в кінцевому підсумку призводить до втрати 15-20% врожаю сільськогосподарських культур [15].

У більшості посівних комплексів застосовуються такі рухомі з'єднання, які потребують регулярного технічного обслуговування під час експлуатації:

- шарнірні з'єднання механізмів для копіювання рельєфу поля;
- підшипники, що використовуються в секціях механізмів копіювання, колесах, дисках сошників, а також на різних валах і шнеках;
- копіювальні колеса, системи захисту сошників, напрямні маркери.

Як свідчать дані (табл. 1.1), системи технічного обслуговування сучасних посівних машин, запропоновані виробниками, є досить трудомісткими. Вони потребують зупинки техніки на 3–5 годин після кожних 40–50 годин роботи. Основною причиною цього є використання в шарнірних з'єднаннях посівних машин металевих трибосполучень типу «вал-втулка», які здатні витримувати значні навантаження лише за умови регулярного змащування пластичними мастилами [15].

Таблиця 1.1

Кількість рухомих з'єднань у посівних машинах, які вимагають технічного обслуговування під час їх використання, а також частота проведення цього обслуговування [15]

| №  | Виробник посівної техніки | Марка машини                 | Робоча ширина захвату, м | Кількість точок змащування з періодичністю |            |            |
|----|---------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|------------|------------|
|    |                           |                              |                          | 8-12 год.                                  | 15-25 год. | 40-50 год. |
| 1  | 2                         | 3                            | 4                        | 5                                          | 6          | 7          |
| 1  | Great Plains              | 3S-4010 HD (HDF)             | 12                       | 94(115)                                    | 9          | 7          |
| 2  | Great Plains              | 3S-4000 HD                   | 12                       |                                            | 6          | 14         |
| 3  | Great Plains              | Yield-Pro YP2425A - 2470     | 16,8                     | 82                                         | 48         | 68         |
| 4  | Great Plains              | Centurion CDA600             | 6                        | -                                          | -          | 68         |
| 5  | Horsch                    | Pronto 7/8/9 DC (8 DC PPF)   | 7,5/89(8)                | 24                                         | -          | 29 (27)    |
| 6  | Horsch                    | Maestro 12/24SW              | 8,4/16,8                 | -                                          | -          | 79/127     |
| 7  | Агро-Союз                 | Агро-Союз Turbosem II 19 -60 | 11,4                     |                                            |            | 270        |
| 8  | John Deere                | Deere Bauer 44/58/60         | 16,8/22,4/2<br>5,2       | 72/96.10<br>8                              | 72/96 108  | 48 64/72   |
| 9  | John Deere                | JD 1710/1740                 | 8.4                      | 36                                         | 36         | 24         |
| 10 | Amity Technology          | Till Drill 4010              | 12,2                     | 68                                         | -          | 18         |
| 11 | Amity Technology          | Till Drill 6015              | 183                      | 100                                        | -          | 36         |
| 12 | Vaderstad                 | Rapid RDA 600J(800J)         | 6(8)                     | -                                          | -          | 85 (101)   |
| 13 | Vaderstad                 | Spirit ST 600C(800C)         | 6(8)                     | -                                          | -          | 66 (500ra) |
| 14 | KINZE                     | KINZE 3600                   | 11.2                     | 106                                        | -          | 223        |

За результатами виконаного аналізу, що представлено у табл. 1.1 було виявлено, що виробники посівних машин застосовують експлуатаційний підхід для збільшення тривалості служби рухомих з'єднань.

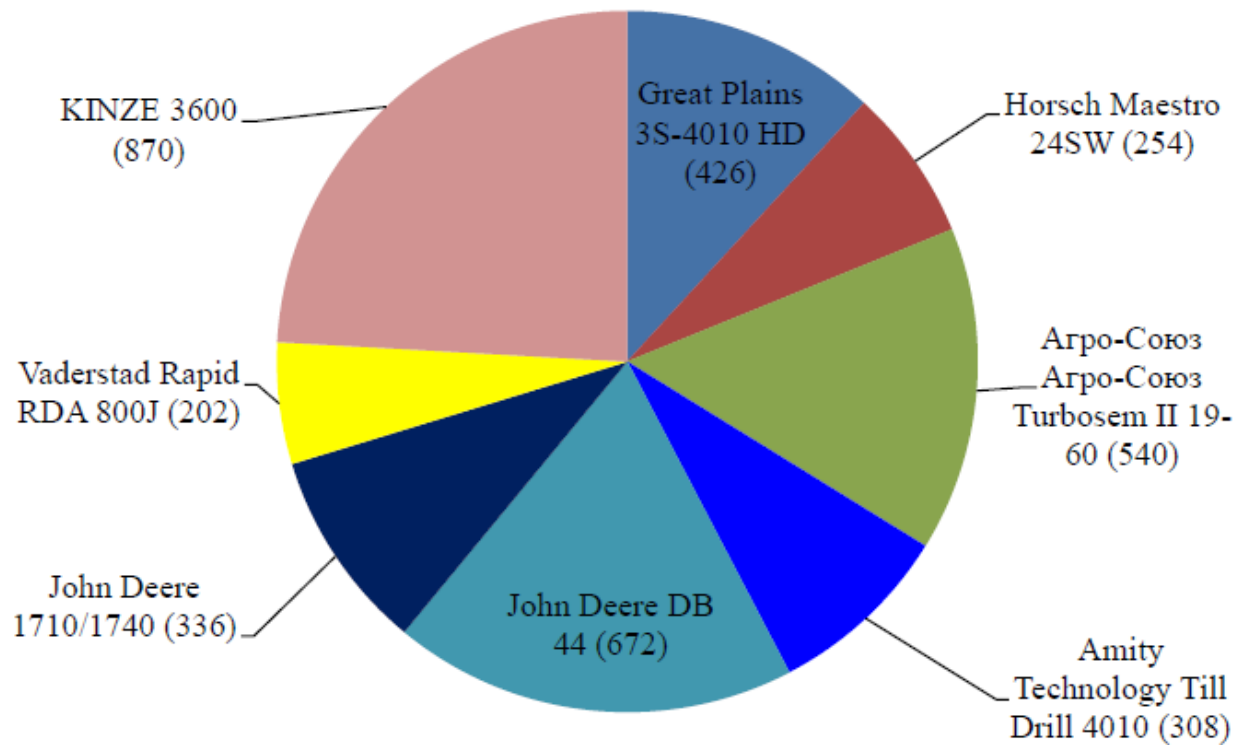


Рис. 1.3. Кількість точок технічного обслуговування рухомих з'єднань різних моделей посівних машин при 100 годинах експлуатації [15]

Тривалість служби деталей рухомих з'єднань паралелограмного механізму копіювання в посівному комплексі визначається їх здатністю протистояти зносу. Зносостійкість залежить від умов експлуатації, хімічного складу та структури матеріалів, а також фізико-механічних і триботехнічних властивостей поверхонь деталей, які контактують одна з одною. Відповідно, основні способи підвищення довговічності включають зменшення тиску на зони тертя та оптимальний підбір матеріалів з відповідною структурою.

## 1.2. Шляхи підвищення довговічності трибоспряжень аграрної техніки

Довговічність трибоспряжень (систем тертя) в аграрній техніці є важливим аспектом, який впливає на загальну ефективність і надійність роботи техніки.

Підвищення цього показника може бути досягнуто за рахунок впровадження різноманітних технічних, технологічних та організаційних рішень. Нижче наведено кілька основних шляхів:

### 1. Вибір якісних матеріалів

- Використання високоякісних сплавів та матеріалів: Застосування зносостійких матеріалів для виготовлення трибоспряжень допоможе зменшити знос і продовжити термін служби.

- Нанесення захисних покриттів: Використання покриттів на основі полімерів або металевих сплавів для зниження тертя та підвищення корозійної стійкості.

### 2. Оптимізація конструкцій

- Розробка нових конструкцій: Впровадження конструктивних змін, що знижують навантаження на трибоспряження і покращують їх геометрію.

- Системи автоматичного регулювання: Використання технологій, що дозволяють автоматично регулювати параметри тертя під час роботи.

### 3. Підбір та контроль мастильних матеріалів

- Використання сучасних мастил: Використання високоякісних мастильних матеріалів з покращеними властивостями, які забезпечують ефективне змащення і знижують тертя.

- Регулярний контроль та заміна мастила: Проводити регулярні перевірки стану мастила та своєчасну його заміну для запобігання зношенню трибоспряжень.

### 4. Організація технічного обслуговування

- Систематичний контроль стану техніки: Впровадження планового обслуговування з періодичними перевірками стану трибоспряжень.

- Навчання персоналу: Підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу з метою ефективного виявлення та усунення проблем.

## 5. Впровадження нових технологій

- Системи моніторингу: Використання систем моніторингу, які дозволяють в реальному часі стежити за станом трибоспряжень і виявляти несправності на ранніх стадіях.

- Використання матеріалів зі спеціальними властивостями: Наприклад, матеріали з функцією самозмащування або з підвищеною зносостійкістю.

Усі методи підвищення довговічності рухомих з'єднань можна поділити на три основні категорії: конструктивні, технологічні та експлуатаційні. Конструктивні підходи спрямовані на використання матеріалів з високою довговічністю та їх оптимальне поєднання в трибоспряженнях; створення сприятливих умов для змащення контактуючих поверхонь; розробку і вдосконалення конструкцій та матеріалів ущільнювачів для трибоспряжень. Також важливо забезпечити високу технологічність процесу виготовлення машин загалом.

Зазначені методи застосовуються на етапі проектування (створення) конструкцій рухомих з'єднань або при їх модернізації. Технологічні підходи до підвищення довговічності базуються на виготовленні деталей трибоспряжень з високою точністю розмірів, а також на зміцненні їх поверхневих шарів або нанесенні спеціальних зносостійких покриттів. Ці методи активно використовуються для відновлення зношених компонентів трибоспряжень у різноманітній сільськогосподарській техніці [3-6].

Однак забезпечення високої довговічності виключно завдяки технологічним та конструктивним методам не гарантує тривалий термін служби машини або агрегату. Необхідно також дотримуватись високих стандартів технічної експлуатації, включаючи технічне обслуговування та ремонт. Крім обов'язкових вимог планово-запобіжної системи техобслуговування та правильного зберігання, важливо здійснювати якісне обкатування нових або відновлених вузлів та механізмів. Основним недоліком експлуатаційних методів є значні енергетичні витрати, необхідні для їх виконання.

До експлуатаційних способів підвищення довговічності належать: обкатування нових або відремонтованих механізмів, дотримання планово-запобіжних заходів технічного обслуговування та правильного зберігання, а також експлуатація обладнання згідно з інструкціями.

Умови експлуатації трибоспряжень машин і механізмів відіграють вирішальну роль у їх довговічності, за умови достатньої міцності та якості рухомих з'єднань. Одними з найефективніших способів підвищення довговічності є захист тертьових зон від впливу зовнішнього середовища (абразивних частинок та хімічних речовин) і розробка нових конструкцій рухомих з'єднань.

Для збільшення терміну служби трибоспряжень у паралелограмному механізмі копіювання посівних комплексів необхідно розглядати кілька напрямків одночасно. Насамперед, це оптимізація конструктивних рішень і впровадження технологічних методів для підвищення зносостійкості. Такий комплексний підхід дозволяє знизити негативний вплив умов експлуатації на довговічність рухомих з'єднань деталей.

У сільськогосподарських машинах, як правило, трибоспряження працюють в умовах обмеженого змащування, сухого тертя або зовсім без нього, а також у присутності абразивних частинок. Найбільш уразливими з точки зору довговічності є трибоспряження, що експлуатуються в умовах сухого тертя та під дією абразиву. У сільськогосподарському машинобудуванні широко застосовуються різноманітні композиційні матеріали (рис. 1.4).

Переваги застосування полімерно-композитних матеріалів (термопластів та реактопластів) у трибоспряженнях сільськогосподарських машин порівняно з традиційними матеріалами, такими як сталь і сплави, включають:

- Відсутність потреби в обслуговуванні;
- Виключення ефекту «клину» завдяки особливим трибологічним та міцнісним характеристикам полімерних матеріалів;
- Ефект перенесення, що зменшує тертя;

- Мінімальний знос металевих деталей, що працюють у парі з полімерно-композитними матеріалами.

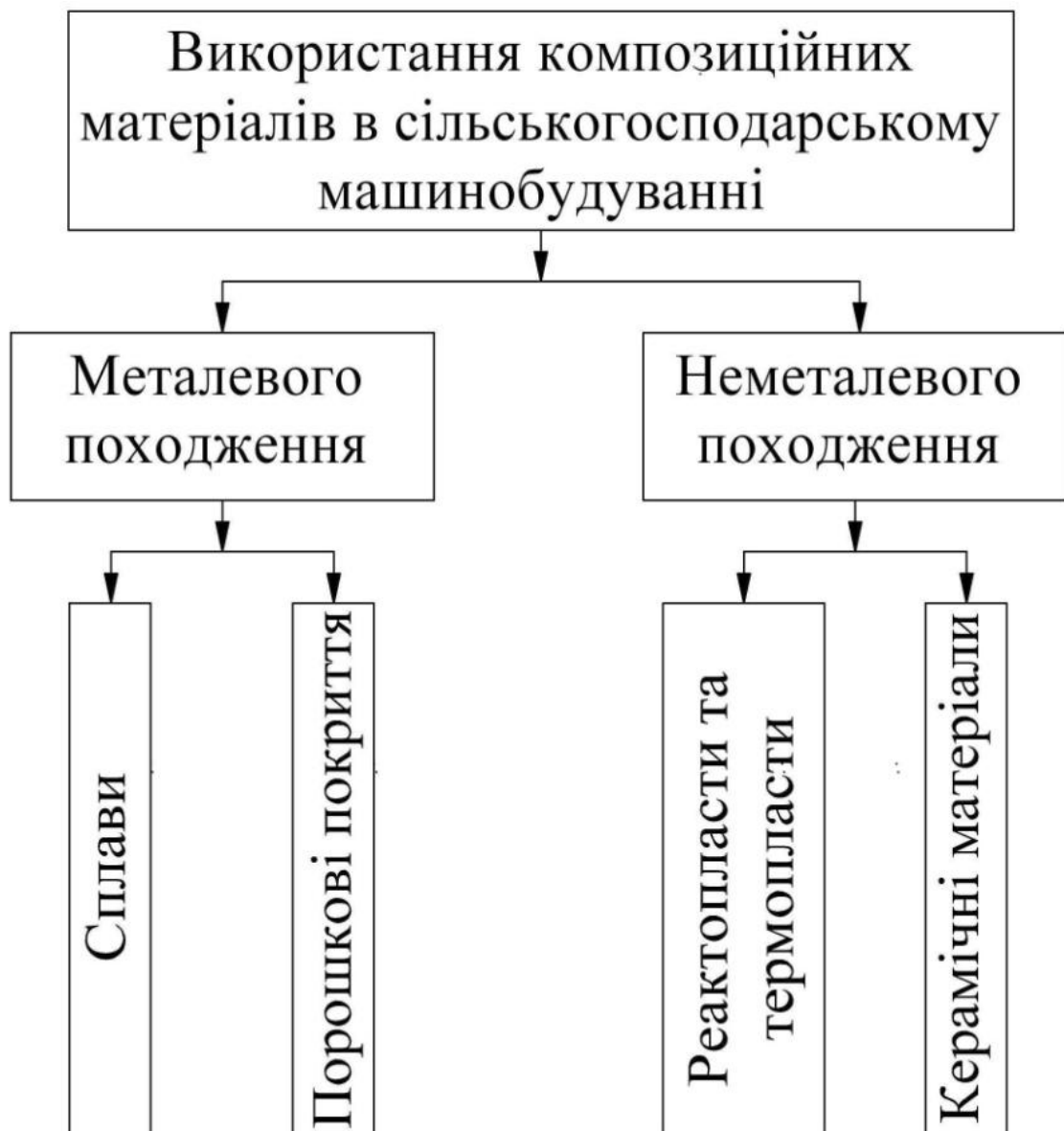


Рис. 1.4. Використання композиційних матеріалів в сільськогосподарському машинобудуванні

Для захисту трибосполучень від шкідливого впливу зовнішніх факторів у конструкціях рухомих з'єднань машин і механізмів застосовують ущільнювальні елементи або мастильні матеріали, які забезпечують постійне змащування. Ущільнювачі поділяються на три основні групи:

- Безконтактні ущільнювачі;

- Контактні ущільнювачі;
- Статичні ущільнювачі.

Безконтактні ущільнювачі, наприклад манжети, створюють невеликий зазор між нерухомими та рухомими деталями (як правило, обертальними). Вони можуть мати як просту конструкцію, так і багатоступеневі лабіринти для покращеного захисту в умовах високої запиленості. Контактні ущільнювачі використовуються для трибоспряжень з лінійним рухом однієї деталі відносно іншої, іноді – для валів. Статичні ущільнювачі застосовуються для забезпечення герметичності між компонентами або для зменшення вібрацій. Одними з найпоширеніших є ущільнюючі прокладки.

У сільськогосподарських машинах широко використовуються підшипники кочення та ковзання. Для підвищення їхньої довговічності застосовуються різні конструкції, що забезпечують ефективний захист від зовнішніх факторів та оптимальні умови роботи. Конструкція ущільнювальних елементів для підшипників кочення варіюється залежно від типу машин і необхідного рівня захисту (рис. 1.5) [8].

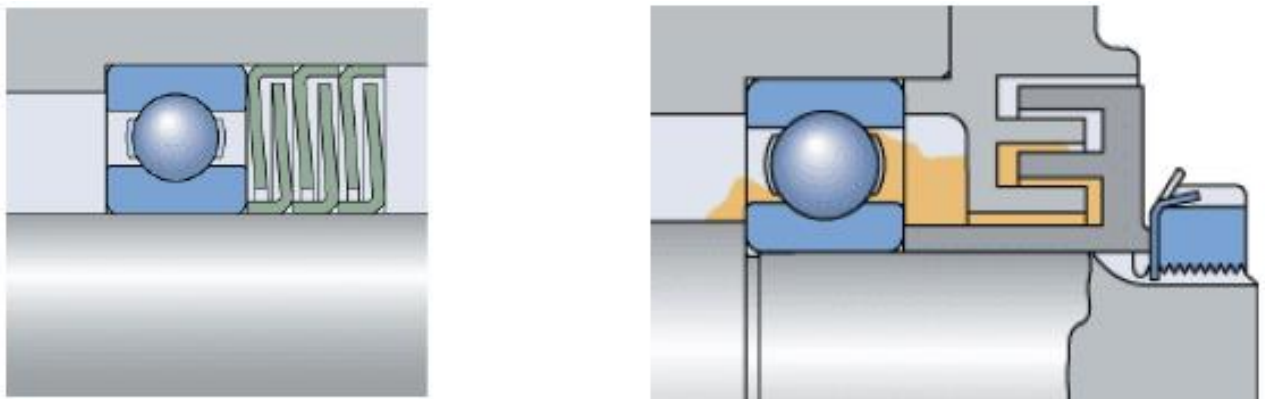


Рис. 1.5. Варіанти лабіринтів для ущільнення підшипників кочення

Підшипники типу Y від SKF мають особливість, що не потребує технічного обслуговування протягом усього періоду експлуатації, оскільки вони захищені від впливу зовнішнього середовища за допомогою спеціальних ущільнювачів.



Рис. 1.6. Підшипники виробництва SKF тип Y: а – YSPAG; б – YELAG

Компанія SKF радить використовувати підшипники типу Y для сільськогосподарської техніки, оскільки вони забезпечують ефективний захист навіть у сильно запиленому середовищі. Ця технологія включає застосування п'ятиступневих ущільнювачів для підшипників (рис. 1.7).

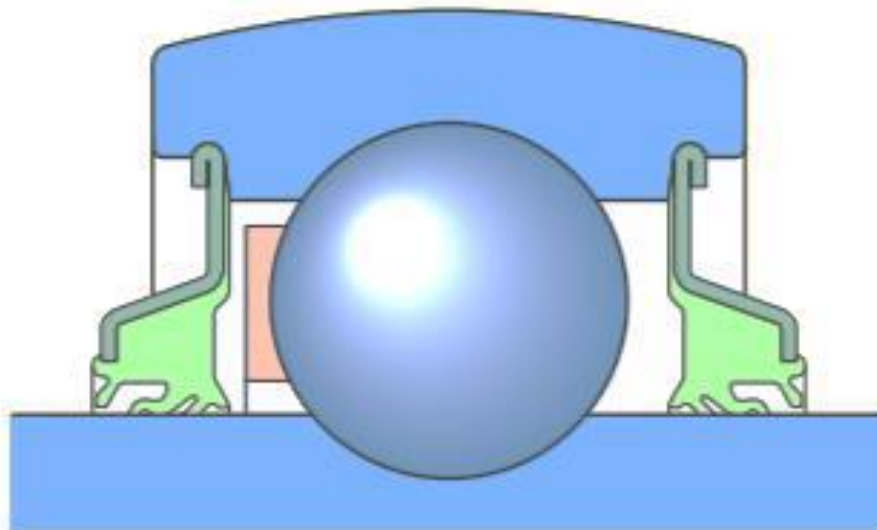


Рис. 1.7. Підшипник кочення виробництва SKF типу Y з п'яти точковими ущільнювачами

Для підшипникових вузлів сільськогосподарської техніки була розроблена спеціальна серія HARP AGRO [8], яка оснащена новими системами ущільнювачів X-SHIELD (рис. 1.8).

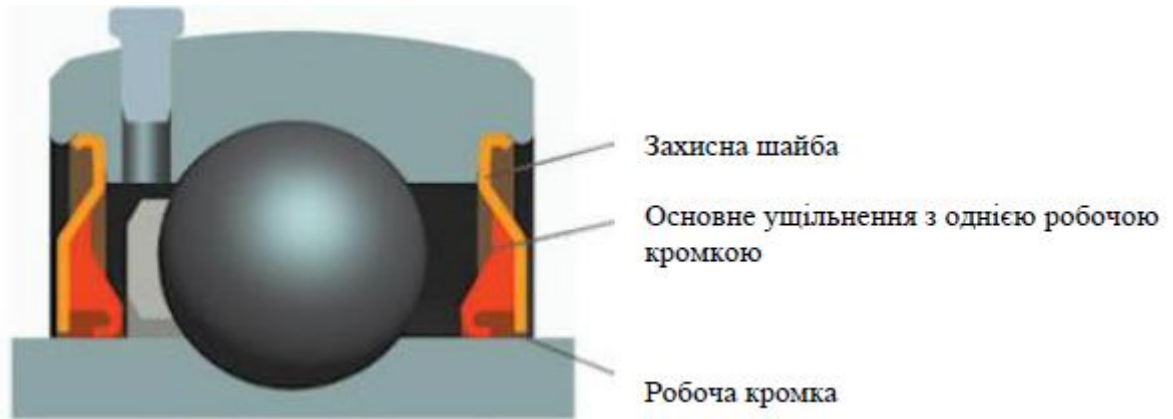


Рис. 1.8. Конструкція системи ущільнювача X-SHIELD підшипника HARP AGRO

Залежно від умов роботи та рівня агресивності середовища, виробник пропонує широкий асортимент підшипників. Найбільш захищеною версією підшипника серії HARP AGRO є система ущільнення X-SHIELD-6 (рис. 1.9), яка, згідно з даними виробника, має в чотири рази більший ресурс порівняно зі стандартними ущільнювачами.

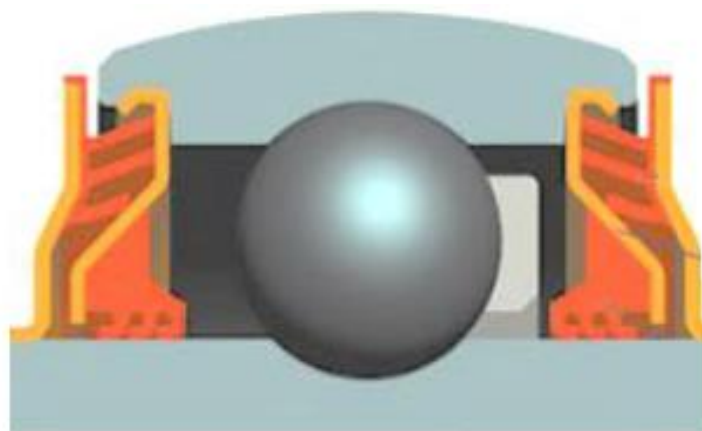


Рис. 1.9. Конструкція системи ущільнювача X-SHIELD-6 підшипника HARP AGRO

Не до кінця зрозуміло, чи є необхідність у таких високих показниках довговічності для підшипникових вузлів. Створення та виробництво таких конструкцій (рис. 1.9) вимагає значних витрат енергоресурсів, що значно підвищує їх собівартість. Як видно з представлених результатів, виробник розробив якісні підшипники та системи їх захисту від зовнішніх впливів, що дозволяє уникнути технічного обслуговування (змащування) протягом усього терміну служби. Однак, досягнення подібного ефекту у підшипниках ковзання за незначних додаткових витрат є досить складним завданням.

Одним із ключових підходів до вирішення цієї проблеми є введення мастильних матеріалів, включаючи спеціально оброблені, у зону тертя або застосування самозмащувальних конструкційних матеріалів. У конструкціях трибоспряжень, де використовуються підшипники ковзання, передбачені точки для обслуговування та змащування (рис. 1.10) [8].



Рис. 1.10. Точки змащування трибоспряження з підшипником ковзання (стрілка вказує на точку обслуговування рухомого з'єднання висівної секції) [8]

Деякі рухомі з'єднання сільськогосподарської техніки функціонують в умовах сухого тертя, і їх конструкція не передбачає змащування (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Трибосполучення, які працюють в режимі сухого тертя

Введення змащувальних матеріалів, здебільшого консистентних мастил, у зону тертя підшипників ковзання дозволяє вирішити кілька завдань:

- зниження інтенсивності зношування;
- ефективніше відведення тепла з зони тертя;
- захист рухомих з'єднань від впливу абразивних частинок і агресивних речовин.

Однак використання консистентних мастил у трибоспряженнях має й певні недоліки, зокрема:

- збільшення внутрішнього тертя;
- обмежений температурний діапазон експлуатації;

- суттєва зміна властивостей мастил залежно від температури навколишнього середовища.

Введення змащувальних матеріалів у зону тертя не тільки знижує тертя та знос трибоспрямижень, але й виконує додаткові функції: запобігає локальним пошкодженням, відводить тепло, захищає від проникнення агресивних рідин та абразивних частинок, а також пригнічує корозійні процеси. Однак це ефективно лише за умови повного заповнення простору між компонентами трибоспрямижень, що вимагає періодичного технічного обслуговування або застосування спеціальних ущільнювачів.

Спроби вирішити цю проблему через використання різних металевих сплавів і композитів не дали бажаних результатів.

Один з перспективних підходів до підвищення довговічності підшипників ковзання полягає у використанні самозмащувальних полімерно-композитних матеріалів неметалевого походження, таких як пластики. Деякі з цих матеріалів здатні працювати під великим навантаженням і в широкому діапазоні температур [17-18].

Позитивні результати застосування полімерно-композитних матеріалів (ПКМ) були зафіксовані у рухомих з'єднаннях сільськогосподарської техніки, промислового обладнання та установок [17-18]. У дослідженнях використовувалися матеріали на основі поліаміду з наповнювачем з вуглецевого волокна. Переваги цих матеріалів включають здатність працювати без змащувальних середовищ, відсутність заклинювання при частковому руйнуванні деталей з ПКМ, а також мінімальний знос сталевих деталей, що взаємодіють з ними.

Отже, одним із перспективних напрямків підвищення довговічності трибоспрямижень сільськогосподарської техніки є впровадження самозмащувальних матеріалів неметалевого походження для створення рухомих з'єднань.

## Висновки до 1-го розділу

Умови роботи рухомих з'єднань у сільськогосподарській техніці характеризуються підвищеним зносом через агресивні фактори навколишнього середовища, зокрема запиленість, наявність абразивних частинок та відсутність належного змащування.

Багато механізмів працюють в умовах сухого тертя або з обмеженим змащенням, що негативно впливає на їхню довговічність.

Основною причиною зниження надійності рухомих з'єднань є недотримання умов технічного обслуговування, що сприяє швидкому зносу деталей через абразивне середовище.

Часте технічне обслуговування є необхідним для підтримки працездатності трибоспряджень, але це знижує загальну ефективність техніки, затягуючи строки виконання робіт.

Впровадження полімерно-композитних матеріалів у рухомі з'єднання аграрної техніки є перспективним напрямом для підвищення їхньої довговічності.

Використання самозмащувальних матеріалів дозволяє зменшити знос трибоспряджень, знизити вплив агресивного середовища та відмовитися від частого технічного обслуговування.

Застосування спеціальних конструкцій ущільнювачів і мастильних матеріалів також сприяє зниженню інтенсивності зношування та підвищенню продуктивності техніки.

Дослідження ефективності полімерно-композитних матеріалів, моделювання динаміки навантажень та експериментальні перевірки доцільності їх використання є необхідними для впровадження цих рішень у практику.

## РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМА ТА МЕТОДОЛОГІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Планування та мета досліджень

На основі встановлених навантажень, які впливають на трибосполучення механізму копіювання, необхідно обрати полімерно-композитні матеріали (ПКМ), здатні забезпечити потрібний рівень міцності. Для конструкційних пластиків ключовими факторами, що впливають на їхню довговічність, є навантаження (тиск) і лінійна швидкість ковзання. Водночас інтенсивність зносу значною мірою залежить від точності допусків і посадок деталей з ПКМ.

Основним завданням досліджень є перевірка фізико-механічних і триботехнічних характеристик ПКМ, обґрунтування їхніх параметрів і надання рекомендацій щодо ефективного використання цих матеріалів.

Підвищення довговічності рухомих з'єднань деталей досягається шляхом використання полімерно-композитних матеріалів (ПКМ) з оптимізованим складом, що дозволяє зменшити їх зношування та змінити режим експлуатації. Етапи експериментального дослідження зображені на рис. 2.1.

Для вирішення завдань, пов'язаних із розробкою та дослідженням властивостей ПКМ для елементів рухомих з'єднань посівних комплексів, було проведено наступні дослідження:

- визначено основні недоліки, притаманні рухомих з'єднанням, виготовленим зі сталевих матеріалів;
- обґрунтовано теоретичну доцільність застосування ПКМ для рухомих з'єднань;
- оцінено перспективність використання ПКМ у таких вузлах;
- проведено комплекс лабораторних та експлуатаційних випробувань зразків і деталей для виявлення їх характеристик, властивостей та показників довговічності.



Рис. 2.1. Варіанти етапів експериментальних досліджень

Аналіз проблемних рухомих з'єднань у паралелограмному механізмі здійснювався через дослідження літературних джерел та аналіз виробничих ситуацій під час експлуатації та технічного обслуговування посівних комплексів. Закономірності зношування серійних та розроблених елементів рухомих з'єднань механізму копіювання вивчалися на основі статистичних даних, накопичених у процесі експлуатації техніки.

Забезпечення належного технічного стану рухомих з'єднань деталей посівних комплексів залежить, насамперед, від їх високих триботехнічних характеристик. Для обґрунтування доцільності застосування полімерно-композитних матеріалів (ПКМ) були проведені випробування на машині тертя, в ході яких досліджували їх характеристики та властивості.

Для підтвердження результатів, отриманих в експерименті, і раціонального використання розроблених ПКМ було проведено випробування рухомих з'єднань механізму копіювання посівних комплексів.

## 2.2. Процес виготовлення зразків і деталей для експериментальних досліджень

Для проведення досліджень матеріалів деталей з ПКМ було розглянуто шість марок високомолекулярних сполук, усі в формі гранул, що використовувалися як вихідна сировина для виготовлення виробів. Зразки створювали з матеріалів, що мали вигляд гранул або кульок (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Загальний вигляд ПКМ обраних для досліджень:

- 1 – Nylon 66; 2 – ПА-6-210КС; 3 – ПА6/6.6 R196-GF30; 4 – Kocetal GF705;  
5 – Kocetal K300; 6 – УПА-6-30

Але всі шість зразків ми не будемо розглядати детально.

Для дослідження характеристик і властивостей нами було обрано полімерно-композитний матеріал, що представлено під №6 - УПА-6-30. Цей матеріал належить до поліамідної групи, яка є однією з найпоширеніших для виготовлення елементів та деталей сільськогосподарської техніки. Вихідний матеріал був у формі гранул діаметром 2-3 мм і довжиною 4-5 мм, зовнішній вигляд яких зображено на рис. 2.3.



Рис.2.3. Вугленаповнений поліамід, гранули чорного кольору, частка наповнювача 30% УПА-6-30

Полімерно-композитні матеріали на основі поліамідів здатні поглинати вологу з повітря [10, 11], тому перед процесом лиття вологу видаляли шляхом нагрівання матеріалу до 80–90 °С і витримували його при цій температурі протягом 3 годин у спеціальній термошафі SNOL 67/350 (рис. 2.4).

Присутність води в початковому матеріалі негативно впливає на якість отриманих деталей з ПКМ через утворення великої кількості порожнин. Вода, яка випаровується, не встигає повністю вийти з розплаву ПКМ, що призводить до збільшення об'єму під час випаровування і формування порожнин (раковин).



Рис.2.4. Термошафа SNOL 67/350

Зразки та деталі для проведення експериментальних досліджень виготовляли методом лиття під тиском на машині «PlastMassor» (рис. 2.5).



Рис.2.5. Ливарна машина «PlastMassor»

Таблиця 2.1

Підготовлення спеціального матеріалу та виготовлення досліджуваного зразка

| №<br>п/п | Повна назва матеріалу                | Підготовка матеріалу<br>(режим сушіння) |        | Виготовлення |        |
|----------|--------------------------------------|-----------------------------------------|--------|--------------|--------|
|          |                                      | T, °C                                   | t, год | T, °C        | P, МПа |
| 1        | Вугленаповнений поліамід<br>УПА-6-30 | 80                                      | 3      | 250-260      | 12     |

Вихідний матеріал завантажували в нагрівальну камеру (поз. 4), нагріту до необхідної температури, необхідної для його розплавлення. Контроль температури в камері здійснювався за допомогою термopар. Тиск лиття вимірювали манометром (поз. 1), встановленим у гідроциліндрі (поз. 2). Процес керувався через панель управління (поз. 6), забезпечуючи підтримання температури з точністю до  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Розплавлений матеріал впорскували в прес-форму, розміщену на платформі (поз. 5), через литникову систему з отвором діаметром 4 мм. Отримані зразки мали однорідну структуру та циліндричну форму з такими розмірами: висота — 15 мм, діаметр — 10 мм.

Зразки, призначені для вивчення характеристик, властивостей і ступеня зносу, наведено на рис. 2.6.



Рис. 2.6. Зразки для експериментальних дослідження: а) міцнісних та триботехнічних характеристик та властивостей; б) величини зносу (з внутрішньою вставкою)

### 2.3. Методологія дослідження фізико-механічних властивостей експериментальних зразків

Виконання спеціальних досліджень міцнісних характеристик проводили на випробувальній сервопривідній машині UIT STM 050/300 (рис. 2.7) відповідно до стандарту ДСТУ ISO 604:2004.



Рис.2.7. Випробувальна сервопривідна машина UIT STM 050/300

Для проведення дослідів межі міцності при стисканні використовували зразки діаметром 10 мм і висотою 15 мм, застосовуючи відповідне обладнання 2. При цьому опорні поверхні зразків повинні бути паралельними з точністю до 0,1% у напрямку, перпендикулярному до навантаження.

Межу плинності при стисканні ( $\sigma_p$ ) обчислювали за формулою [19, 20]:

$$\sigma = P / F, \quad (2.1)$$

де  $P$  – навантаження, МПа;

$F$  – мінімальна площа поперечного перерізу зразка,  $\text{мм}^2$ .

$$F = \pi d^2 / 4, \quad (2.2)$$

де  $d$  – діаметр зразка, мм.

Відносну деформацію при стисканні ( $\varepsilon$ ) розраховували за формулою:

$$\varepsilon = \Delta h_{p.c.} \cdot 100 / h_0, \quad (2.3)$$

де  $\Delta h_{p.c.}$  – величина зменшення висоти зразка при руйнуванні, мм;

$h_0$  – початкова висота зразка, мм.

Ударну в'язкість визначали на маятниковому копрі КМ-0,4 (рис. 2.8) за методом Шарпі відповідно до ДСТУ ISO 179-1:2001 при температурі  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  та відносній вологості повітря  $50 \pm 5\%$  [19].



Рис.2.8. Маятниковий копер КМ-0,4

Метод базується на руйнуванні зразка, розміщеного на двох опорах з відстанню між ними 40 мм, під дією удару маятника, причому удар припадає на середину між опорами.

Перед проведенням випробувань зразки піддають кондиціюванню за стандартних умов згідно з вимогами ДСТУ ISO 291:2005, якщо інше не передбачено технічною документацією для матеріалу.

Перед тестуванням вимірюють ширину і товщину зразка в середній частині за допомогою приладів із точністю до 0,02 мм. Якщо зразки виготовлені методом лиття під тиском, дозволяється провести вимірювання лише одного зразка з партії, що тестується. У разі, якщо розміри відповідають значенням, наведеним у таблиці 1 ДСТУ ISO 179-1:2001, використовують номінальні значення ширини та товщини як результат.

Для зразків із надрізом товщину в зоні надрізу визначають мікрометром із наконечником, який відповідає профілю надрізу. Для перевірки якості надрізу вимірюють товщину зразка на обох кінцях надрізу та обчислюють середнє арифметичне значення.

Ударну в'язкість зразків обчислюють за формулою, вираженою в кДж:

де  $A_n$  – енергія удару, затрачена на руйнування зразка, кДж/(кг/см<sup>2</sup>), фіксується на цифровому табло приладу;

$b$  – ширина зразка по його середині, мм;

$s$  – товщина зразка по його середині, мм.

#### **2.4. Методи оцінки триботехнічних властивостей матеріалів і рівня зносу експериментальних деталей**

Дослідження впливу величини зазору у з'єднаннях та властивостей експериментальних зразків з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) здійснювали з використанням як розроблених, так і стандартних методик. Триботехнічні характеристики зразків із ПКМ при сухому терті визначали на

установці СМЦ-2 для випробувань тертя і зношування (рис. 2.9) відповідно до методики, описаної у джерелі [19]. Тестування виконували за схемою «диск – колодка», при цьому радіус зразка дорівнював  $R = 0,025$  м.



Рис. 2.9. Спеціальна машина для проведення дослідження тертя та зношування  
С М Ц - 2

Пристрій для проведення досліджень тертя та зношування СМЦ-2 (рис.2.9) - це спеціалізоване обладнання, призначене для вивчення триботехнічних характеристик матеріалів, таких як коефіцієнт тертя і зносостійкість. Випробування проводяться за різними схемами тертя, наприклад, «диск – колодка» або «вал – втулка», як зі змащуванням, так і без нього.

СМЦ-2 використовується для оцінки матеріалів у умовах, що моделюють реальні експлуатаційні навантаження. Ця машина дозволяє отримувати точні дані про знос і поведінку матеріалів у процесі тертя, що є важливим для підбору матеріалів у різних галузях промисловості, зокрема в сільськогосподарському машинобудуванні.

Перед кожним випробуванням обов'язково проводили притирання експериментального зразка до контртіла. Це було необхідно для формування

сферичної поверхні зразка, що забезпечувала максимальний контакт з робочою поверхнею диска (площа контакту мала складати щонайменше 85 %).

Коефіцієнт тертя розраховували за такою формулою:

$$f = \frac{M_{кр}}{N \cdot \Delta}, \quad (2.5)$$

де  $M_{кр}$  – крутний момент, що виникає на окружності диска, Н·м;

$N$  – навантаження на зразок, Н;

$\Delta$  – крок паперу, м (для всіх експериментів постійний,  $\Delta = 0,0025$  м).

Для вивчення залежності зносу від величини зазору в трибоспряженні полімерно-композитного матеріалу (ПКМ) зі сталлю використовували спеціально виготовлені сталеві деталі-калібри (рис. 2.10).



Рис.2.10. Спеціальне кільце для виміру зносу деталей з композитних матеріалів

Відповідно до описаних методик і програми було проведено дослідження триботехнічних характеристик, фізико-механічних властивостей і стану поверхонь тертя отриманих матеріалів. Результати цих досліджень будуть нами представлені в наступному розділі магістерської роботи.

## Висновки до 2-го розділу

Основною метою проведених досліджень було визначення фізико-механічних і триботехнічних властивостей полімерно-композитних матеріалів (ПКМ) для застосування у рухомих з'єднаннях сільськогосподарської техніки.

Планування досліджень базувалося на використанні стандартних методик випробувань для визначення показників міцності, зношуваності та довговічності матеріалів.

Виготовлення зразків проводилось методом лиття під тиском, що дозволило отримати матеріали з однорідною структурою. Під час виготовлення використовувались високомолекулярні сполуки у вигляді гранул, які перед процесом лиття були підготовлені шляхом видалення вологи для запобігання утворенню дефектів у матеріалах.

Для дослідження фізико-механічних властивостей зразків було використано випробувальні машини, що відповідали нормативним вимогам. Було проведено випробування зразків на міцність, ударну в'язкість та стискання відповідно до стандартів. Це дозволило оцінити здатність матеріалів витримувати різні навантаження в умовах експлуатації.

Триботехнічні властивості матеріалів досліджувалися на машині тертя СМЦ-2 за схемою «диск – колодка», де оцінювались показники коефіцієнта тертя та зносу. Експериментальні зразки піддавались тестуванню без змащування, що дозволило виявити їх зносостійкість у суворих умовах експлуатації. Також використовувались спеціально виготовлені деталі-калібри для оцінки зносу в трибоспряженнях з різними величинами зазорів.

Програма досліджень охоплювала весь цикл від виготовлення зразків до оцінки їх триботехнічних і фізико-механічних характеристик. Отримані результати забезпечили комплексне уявлення про експлуатаційні властивості ПКМ, що дозволяє зробити висновки про можливість їх ефективного застосування в рухомих з'єднаннях сільськогосподарської техніки.

## РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

### 3.1. Результати досліджень фізико-механічних характеристик зразків

Характеристики та властивості ПКМ УПА – 6 - 30 були предметом багатьох досліджень відомих науковців України. Однак, при використанні різних партій матеріалу важливо перевіряти відповідність заявлених показників технічній документації. Тому одним із основних завдань цієї роботи було проведення перевірки відповідності характеристик ПКМ, вказаних у технічній документації, які будуть використовуватися для виготовлення експериментальних деталей.

Результати досліджень щодо межі текучості та модуля пружності представлені на рис. 3.1.

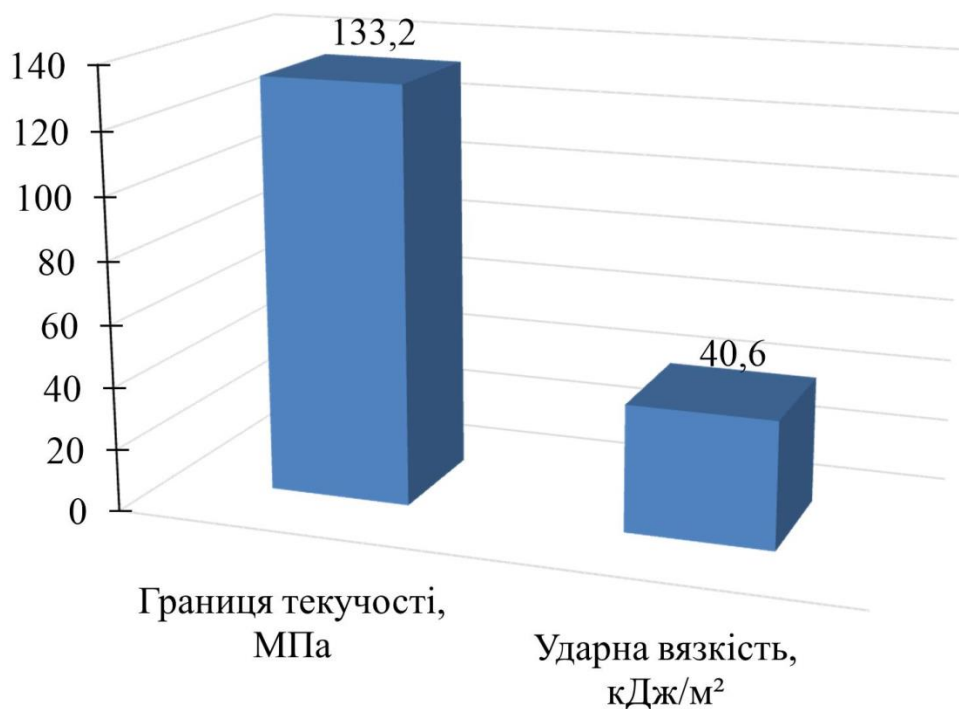


Рис. 3.1. Фізико-механічні характеристики вуглеонаповненого поліаміду ПКМ УПА-6-30

Результати дослідження фізико-механічних властивостей ПКМ, обраного для використання як конструкційного матеріалу в трибосполученнях, підтвердили відповідність технічній документації. Це свідчить про доцільність вибору цієї партії матеріалу для виготовлення експериментальних деталей, призначених для подальшого дослідження зносостійкості за різних режимів експлуатації.

Для спеціального полімерного композиційного матеріалу (ПКМ) УПА-6-30 встановлено, що допустиме значення фактора  $p_v$  не перевищує 3 МПа·м/с. На основі результатів, отриманих у попередніх розділах роботи, були визначені навантаження у трибосполученнях і швидкість ковзання, що дозволило обчислити робочий режим у 0,23 МПа·м/с. Це свідчить, що обраний матеріал задовольняє вимоги щодо міцності та триботехнічних характеристик, необхідних для експлуатації у рухомих з'єднаннях.

Для оцінки довговічності елементів рухомих з'єднань, виготовлених із ПКМ УПА-6-30, проведено ресурсні випробування. Це обумовлено нижчою теплопровідністю матеріалу порівняно зі сталлю, що могло спричинити теплове накопичення у зоні тертя та зміни властивостей матеріалу.

Під час випробувань здійснювали реєстрацію таких параметрів: зміни маси зразків, температури в зоні тертя та відносної вологості повітря. Тести проводили в умовах, що максимально імітують роботу елементів у рухомих з'єднаннях за екстремальних режимів. Швидкість ковзання становила 0,03 м/с, навантаження — 600 Н, а загальна тривалість випробувань — 75 годин. Оскільки період припрацювання поверхонь трибосполучень є найбільш критичним етапом, протягом перших 10 годин зміни маси фіксували двічі, а далі — через кожні 25 годин роботи.

Як видно з графіка (рис. 3.2), процес зношування зразків із ПКМ протягом 75 годин був стабільним і характеризувався лінійною залежністю. Швидкість зношування склала 0,00307 г/год.

Протягом перших 8 годин спостерігалось підвищення температури в зоні контакту до 353 К, що пов'язано з припрацюванням поверхонь. У період між 5 та

25 годинами температура знизилася до 313 К, що свідчить про завершення припрацювання та перехід до стабільного режиму роботи.

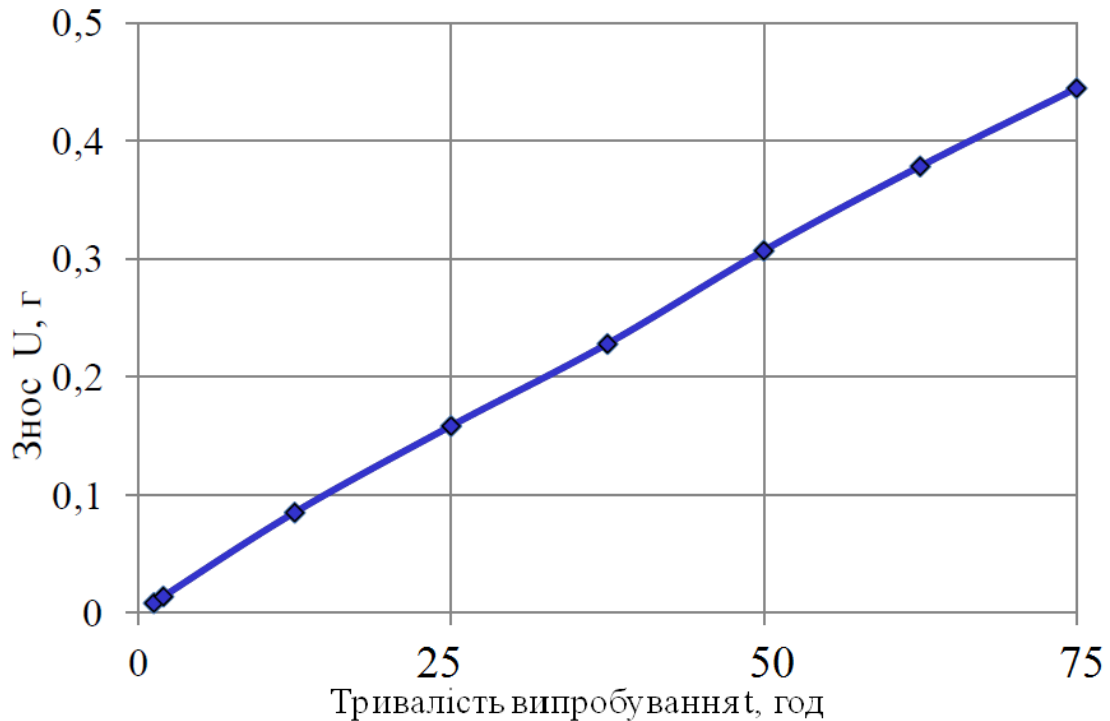


Рис.3.2. Зношування експериментальних зразків з УПА-6-30

Температурна динаміка у зоні тертя (рис. 3.3) після 15 годин роботи, коли встановлюється стабільний режим, демонструє залежність від відносної вологості повітря. Це пов'язано з тим, що матеріал ПКМ УПА-6-30 поступово вбирає вологу з навколишнього середовища, що впливає на його експлуатаційні властивості.

Результати ресурсних випробувань підтвердили стабільну роботу елементів рухомих з'єднань, виготовлених з ПКМ УПА-6-30, при експлуатації в умовах тертя без змащування.

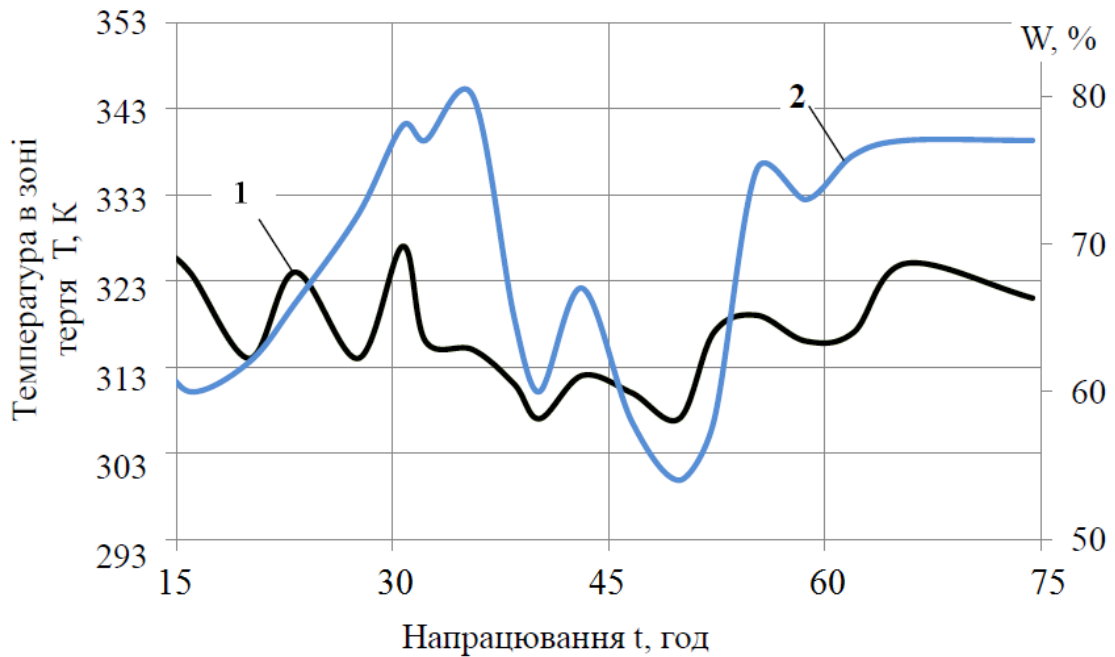


Рис. 3.3. Залежність  $t^{\circ}\text{C}$  в зоні тертя від вологості повітря та напрацювання:  
1 – температура в зоні тертя; 2 – вологість повітря

### 3.2. Оцінка триботехнічних властивостей матеріалу і рівня зносу експериментальних деталей

Тривалість служби трибосполучень значною мірою визначається величиною зазору після їх складання. Як надмірне збільшення, так і надто малий зазор призводять до підвищення інтенсивності зношування, що скорочує термін служби шарнірних з'єднань.

Навантаження є одним із ключових факторів, що впливають на інтенсивність зношування деталей із ПКМ. Оскільки навантаження в трибосполученні залежить від умов експлуатації (наприклад, реакції ґрунту для механізму копіювання) і може змінюватися, для випробувань було запропоновано взяти кілька фіксованих значень навантаження. Відомо, що швидкість ковзання становить 0,1 м/с. У рамках досліджень передбачається варіювати величину зазору в трибосполученні з метою оптимізації параметрів рухомих з'єднань.

На основі зазначеного були визначені відповідні параметри для дослідження зношування експериментальної деталі з ПКМ УПА-6-3, які наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Значення параметрів при дослідженні величини зносу та отримані результати

| № з/п | Значення параметрів |        | $I_T, \times 10^{-3} \text{ г}$ |
|-------|---------------------|--------|---------------------------------|
|       | N, Н                | S, мкм |                                 |
| 1     | 200                 | 200    | 12,5                            |
| 2     | 200                 | 250    | 8,65                            |
| 3     | 200                 | 300    | 6,8                             |
| 4     | 200                 | 350    | 7,4                             |
| 5     | 250                 | 200    | 15,0                            |
| 6     | 250                 | 250    | 10,0                            |
| 7     | 250                 | 300    | 7,35                            |
| 8     | 250                 | 350    | 8,25                            |
| 9     | 300                 | 200    | 22,9                            |
| 10    | 300                 | 250    | 16,84                           |
| 11    | 300                 | 300    | 12,8                            |
| 12    | 300                 | 350    | 10,65                           |
| 13    | 350                 | 200    | 36,2                            |
| 14    | 350                 | 250    | 28,9                            |
| 15    | 350                 | 300    | 23,7                            |
| 16    | 350                 | 350    | 20,5                            |

Для зручнішого аналізу отриманих експериментальних даних результати досліджень представлені у вигляді залежності величини вагового зносу від зазору за умов сталого значення навантаження в трибоспряженні (рис. 3.4). На основі отриманих результатів (табл. 3.1, рис. 3.4) можна зробити висновок, що при навантаженні понад 250 Н спостерігається різке зростання величини зносу.

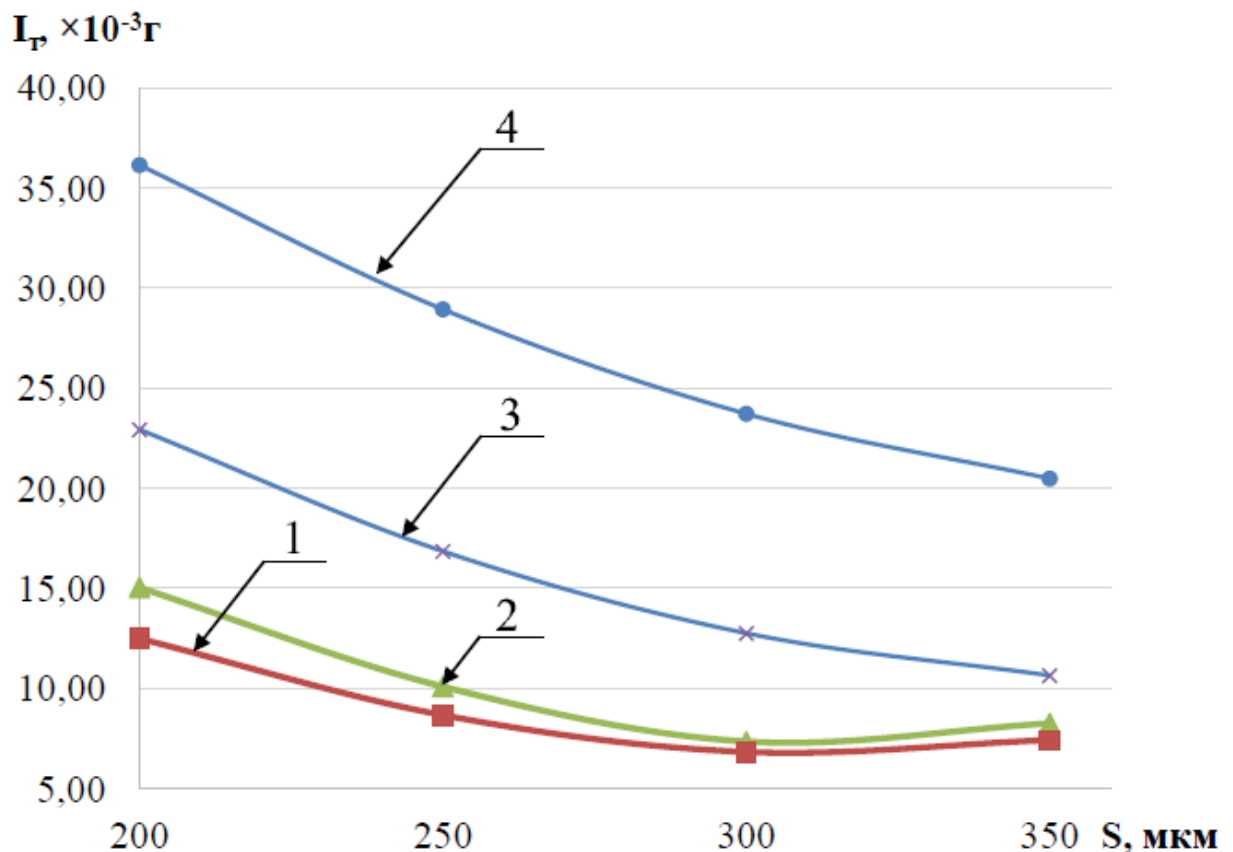


Рис.3.4. Залежність величини вагового зносу від зазору в трибоспряженні за навантаження: 1 – 200 Н; 2 – 250 Н; 3 – 300 Н; 4 – 350 Н

Для зниження зношування та продовження терміну служби трибо сполучень необхідно, щоб зазор у рухомих з'єднаннях, виготовлених з ПКМ, не перевищував 300...350 мкм. Це дозволяє забезпечити оптимальні умови експлуатації. При збільшенні навантаження понад 250 Н відбувається нагрів деталей, що спричиняє розширення їх геометричних розмірів, і разом зі зменшенням зазору це призводить до підвищеного зношування. Тому, при навантаженні понад 250 Н слід обов'язково враховувати температурну компенсацію розмірів деталей з ПКМ.

Таким чином, рекомендуються наступні режими експлуатації трибоспряжень з рухомими з'єднаннями, виготовленими з ПКМ: величина зазору - 300...350 мкм.

### Висновки до 3-го розділу

Проведені дослідження фізико-механічних характеристик зразків з полімерно-композитного матеріалу УПА-6-30 підтвердили їх відповідність заявленим технічним параметрам. Зразки показали високі показники міцності та стійкості до деформацій, що робить матеріал придатним для використання у рухомих з'єднаннях сільськогосподарської техніки. Отримані дані свідчать про надійність матеріалу під час експлуатації в умовах високих навантажень.

Результати досліджень триботехнічних властивостей матеріалу УПА-6-30 показали, що за умови дотримання оптимальних параметрів експлуатації (зазору 300...350 мкм і навантаження до 250 Н) знос матеріалу є мінімальним. При збільшенні навантаження понад 250 Н спостерігається значне зростання зношування деталей, що вказує на необхідність врахування температурних змін і компенсації розмірів. Дослідження також показали, що правильний вибір зазору та контроль за умовами експлуатації можуть суттєво продовжити термін служби трибоспряжень із ПКМ.

Проведені експерименти довели ефективність застосування полімерно-композитних матеріалів у рухомих з'єднаннях сільськогосподарської техніки за умов дотримання оптимальних режимів експлуатації.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В ході проведеного дослідження на тему: «Наукове обґрунтування параметрів деталей трибоспрямижень для підвищення ефективності сільськогосподарської техніки АПК» можемо зробити наступні висновки по роботі:

1. Умови роботи рухомих з'єднань сільськогосподарської техніки характеризуються підвищеним зносом через агресивні фактори, такі як запиленість, абразивні частинки та недостатнє змащування. Механізми часто працюють в умовах сухого тертя, що негативно впливає на їхню довговічність. Основною причиною зниження надійності є недотримання умов технічного обслуговування, що призводить до швидкого зносу. Хоча часте технічне обслуговування необхідне, воно знижує ефективність техніки.

2. Впровадження полімерно-композитних матеріалів є перспективним для підвищення довговічності з'єднань. Самозмащувальні матеріали знижують знос і вплив агресивного середовища, дозволяючи відмовитися від частого обслуговування. Використання спеціальних ущільнювачів і мастильних матеріалів також сприяє зменшенню зношування та підвищенню продуктивності.

3. Основна мета досліджень полягала у визначенні фізико-механічних та триботехнічних властивостей полімерно-композитних матеріалів (ПКМ) для використання в рухомих з'єднаннях сільськогосподарської техніки. Зразки виготовляли методом лиття під тиском із попередньою підготовкою матеріалу для запобігання дефектам.

4. Випробування фізико-механічних властивостей, таких як міцність, ударна в'язкість і стискання, проводили на сертифікованих машинах. Триботехнічні властивості досліджували на машині тертя СМЦ-2 за схемою «диск – колодка», що дозволило оцінити зносостійкість матеріалів без змащування. Також застосовували спеціальні деталі-калібри для вивчення зносу при різних величинах зазорів.

5. Отримані результати дали комплексне уявлення про властивості ПКМ і їхню придатність для використання у рухомих з'єднаннях сільськогосподарської техніки.

6. Дослідження фізико-механічних характеристик зразків з полімерно-композитного матеріалу УПА-6-30 підтвердили відповідність заявленим технічним параметрам. Матеріал продемонстрував високу міцність і стійкість до деформацій,

що робить його придатним для використання в рухомих з'єднаннях сільськогосподарської техніки, особливо в умовах високих навантажень.

7. Результати триботехнічних випробувань показали, що при дотриманні оптимальних параметрів експлуатації (зазору 300...350 мкм і навантаження до 250 Н) знос матеріалу мінімальний. Однак при навантаженні понад 250 Н спостерігається значне збільшення зносу, що вимагає врахування температурної компенсації розмірів деталей. Правильний вибір зазору та контроль умов експлуатації можуть суттєво продовжити термін служби трибоспряжень із ПКМ.

8. Проведені експерименти підтвердили ефективність використання полімерно-композитних матеріалів у рухомих з'єднаннях сільськогосподарської техніки за умов дотримання оптимальних режимів роботи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закалов, О.В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулля, 2011. – 322 с
2. <https://agrotest.com/article/tekstura-mehanichnyj-sklad-gruntu/>
3. А.В. Захаров, І.М. Рибалко, О.В. Тіхонов, О.В. Сайчук. Дослідження зношуючої здатності ґрунтів та її вплив на довговічність робочих органів ґрунтообробних машин. Науковий вісник ТДАТУ, Вип. 13, том 1.
4. Борак К.В. Підвищення зносостійкості робочих органів дискових ґрунтообробних знарядь методом електроерозійної обробки: дис. канд. тех. наук: 05.02.04 - тертя та зношування в машинах / Борак Костянтин Вікторович. - Харків, 2013. – 217 с
5. Дворук В.І., Борак К.В., Дабранський С.С. Дослідження зносостійкості сталі з різними фізико-механічними властивостями при зношуванні в абразивній масі. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 2016, вип. 46, С. 213-223.
6. Технічний сервіс в АПК : навчально-методичний комплекс : навч. посіб. для студентів інжен. спец. на осв.-кваліф. рівні «Бакалавр» напрямку «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва» / С.М. Грушецький, І.М. Бендера, О.В. Козаченко та ін. за ред. С.М. Грушецького, І.М. Бендери. – Кам'янець-Подільський : ФОП Сисин Я.І., 2014. – 680 с.
7. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / Аулін Віктор Васильович; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2015. – 36 с.
8. Блезнюк В. М. Підвищення строку служби підшипників ковзання гичкозбиральних машин конструкторсько-технологічним методом / В. М. Блезнюк, В. Я. Гладченко, О. П. Лобанов. – С. 275-278.

9. Singh J., Chatha S.S, Sidhu B.S. Effect of Surface Alloying on Wear Behaviour of En-Steel. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 21, Part 2. P. 1340–1350.

10. Мікульонок І. О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини: монографія. – К.: ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2009. – 265 с.: іл. – Бібліогр.: с. 239–262.

11. Михайлова Є. О. Аналіз методів перероблення пластикових відходів / Є. О. Михайлова, Д. М. Дейнека, Г. М. Панчева // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2021. – № 1 (7). – С. 80-89.

12. Тенденції розвитку конструкцій сівалок / В. Ясенецький, Л. Шустік, С. Маринін, О. Панайотова // Пропозиція. – 2011. – № 1. – С. 18–27.

13. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки / В.В. Адамчук, Г.Л. Баранов, О.С. Барановський та ін.; за ред. В.І. Кравчука, М.І. Грицишина, С.М. Ковалю. – К.: Аграрна наука. – 2004. – 396 С.

14. Герук С.М. Тенденції розвитку конструкцій посівних агрегатів / С.М. Герук, Є.А. Петриченко // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2014. – № 1. – С. 31 – 45.

15. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки / [В.В. Адамчук, Г.Л. Баранов, О.С. Барановський та ін.]; за ред. В.І. Кравчука, М.І. Грицишина, С.М. Ковалю. – К.: Аграрна наука, 2004. – 396 с.

16. Адамчук В. В. Формування і розвиток ринку сільськогосподарської техніки в Україні [Текст] / В. В. Адамчук, М. І. Грицишин // Вісник аграрної науки. – 2013. – №7. – С. 5-9.

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

18. Кабат О.С. Науково-технічні основи технології виготовлення термостійких полімерних композиційних матеріалів триботехнічного призначення: Дис. докт. техн. наук: 05.17.06. – Дніпро, 2021. – 350с.

19. Деркач, О.Д. Обґрунтування параметрів обертових елементів робочих органів зернозбиральних комбайнів: Дис. канд. техн. наук: 05.05.11. – Тернопіль, 2006. – 182с.

20. Наукові основи розробки полімерних композиційних матеріалів триботехнічного призначення на основі політетрафторетилену [Текст]: монографія / Х.В. Берладір, О.А. Будник, К.О. Дядюра [та ін.]; За ред. К.О. Дядюри. – Суми: СумДУ, 2017. – 176с.