МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ЯКОВЧУК ЮРІЙ В'ЯЧЕСЛАВОВИЧ

УДК 620.178:539.62

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

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 _____Ю.В. Яковчук

Керівник роботи
Міненко С.В.
к.т.н., доцент

Житомир – 2021

АНОТАЦІЯ

Яковчук Юрій В'ячеславович. Підвищення надійності вузлів тертя сільськогосподарських машин. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

В магістерській роботі виявлено оптимальну концентрацію присадок у пластичних мастильних матеріалах. Дослідження показують, що оптимальною є концентрація присадок у матеріалах на базі кальцієвих мастил від 5 до 10 мас.%. залежно від конкретного гомолога та навантаження на зразки. Для мастильних матеріалів на літієвій основі максимальне покращення триботехнічних характеристик спостерігається при концентраціях присадок від 10 до 20 мас.%.

Стендові випробування представлених мастильних матеріалів доводять перспективність використання їх як у підшипниках ковзання, так і у підшипниках кочення. При цьому інтенсивність зношування елементів приводу ріжучого апарату зернозбирального комбайна знизилася в 1,54-3,47 раза, ресурс підшипників кочення №6206 підвищився у 2,35 раза.

Виробничі випробування розроблених мастильних матеріалів у вузлах тертя ґрунтообробної техніки показали їх ефективність у порівнянні з серійними, що випускаються, що дозволяє рекомендувати їх до подальшого використання у вузлах тертя як сільськогосподарської техніки, так і іншого технологічного обладнання. Застосування мастильного матеріалу дозволило знизити масову інтенсивність зношування підшипників у 2,39 рази.

Ключові слова: знос, мастильний матеріал, присадка, підшипник ковзання.

ANNOTATION

Yakovchuk Yuriy V'yacheslavovich. Improvement of the reliability of universities by grating agricultural machines. – *Qualification work on the rights of the manuscript*.

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

В магістерській роботі виявлено оптимальну концентрацію присадок у пластичних мастильних матеріалах. Дослідження показують, що оптимальною є концентрація присадок у матеріалах на базі кальцієвих мастил від 5 до 10 мас.%. залежно від конкретного гомолога та навантаження на зразки. Для мастильних матеріалів на літієвій основі максимальне покращення триботехнічних характеристик спостерігається при концентраціях присадок від 10 до 20 мас.%.

Стендові випробування представлених мастильних матеріалів доводять перспективність використання їх як у підшипниках ковзання, так і у підшипниках кочення. При цьому інтенсивність зношування елементів приводу ріжучого апарату зернозбирального комбайна знизилася в 1,54-3,47 рази, ресурс підшипників кочення №6206 підвищився у 2,35 рази.

Виробничі випробування розроблених мастильних матеріалів у вузлах тертя ґрунтообробної техніки показали їх ефективність у порівнянні з серійними, що випускаються, що дозволяє рекомендувати їх до подальшого використання у вузлах тертя як сільськогосподарської техніки, так і іншого технологічного обладнання. Застосування мастильного матеріалу дозволило знизити масову інтенсивність зношування підшипників у 2,39 рази.

Ключові слова: знос, мастильний матеріал, присадка, підшипник ковзання.

ЗМІСТ

ВСТУП……..……5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ…….…..…8
РОЗДІЛ 2. ІСНУЮЧІ ВИДИ МАСТИЛА ВУЗЛІВ ТЕРТЯ МАШИН ТА МЕХАНІЗМІВ……..15
РОЗДІЛ 3. СТЕНДОВІ І ВИРОБНИЧІ ВИПРОБУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ ЗМАЩУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ……..……31
ВИСНОВКИ……..…..…….36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……...……...……..…….37

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Актуальність теми. Підвищення ефективності виробництва є найважливішою складовою економічної стратегії країни.

Ефективність ведення сільськогосподарського виробництва визначається переважно економічними показниками, до яких належить собівартість продукції. Собівартість сільськогосподарської продукції, багато в чому залежить від надійності технічних засобів та витрат на їх обслуговування та ремонт.

Відповідно до ДСТУ надійність – властивість готовності і властивості безвідмовності і ремонтопридатності, що впливають на нього, і підтримка технічного обслуговування.

Таким чином, надійність є комплексною властивістю, що визначає ефективність та безпеку використання сільськогосподарської техніки.

У загальному обсязі робіт з виробництва сільськогосподарської продукції трудомісткість робіт з утримання та експлуатації сільськогосподарської техніки у зв'язку із низькою її надійністю становить близько 30-35%.

Дослідження надійності окремих агрегатів, вузлів та деталей сільськогосподарської техніки є актуальним завданням на сучасному етапі.

Надійність техніки багато в чому визначається надійністю та довговічністю вузлів тертя машин. Тривалий термін служби вузлів тертя багато в чому залежить від триботехнічних характеристик мастильних матеріалів.

Одним із шляхів, що дозволяють підвищити надійність елементів пар тертя сільськогосподарської техніки та обладнання, є створення ефективних мастильних матеріалів, що дозволяють забезпечувати гідродинамічний режим змащування за умов експлуатації, що змінюються.

Відповідно до ДСТУ «Тертя, зношування та мастило. Терміни та визначення» однією з основних властивостей мастильного матеріалу є його

мастильна здатність, що визначає властивість матеріалу знижувати знос і силу тертя незалежно від його в'язкості.

Для підвищення мастильної здатності мастильних матеріалів застосовуються різноманітні присадки і наповнювачі.

При цьому згідно з ДСТУ «Забезпечення зносостійкості виробів. Методи випробувань на зносостійкість. Загальні вимоги» випробування на зносостійкість слід проводити для вирішення одного або декількох завдань: отримання триботехнічних характеристик конструкційних та мастильних матеріалів, необхідних для обґрунтованого вибору матеріалів та мастил при проектуванні вузлів тертя; завдання оцінки надійності та безпеки вузлів тертя та їх елементів за параметрами зносостійкості.

Відповідно до ДСТУ «Забезпечення зносостійкості виробів. Методи підтвердження зносостійкості» підтвердження зносостійкості допускається проводити в рамках робіт з підтвердження надійності або безпеки виробу. А підтвердження зносостійкості на стадіях науково-дослідних робіт проводиться з метою обґрунтування вибору оптимального варіанта мастила та мастильних матеріалів.

Таким чином, зносостійкість є елементом надійності і, відповідно, підвищення зносостійкості вузлів тертя сільськогосподарських машин у присутності мастильних матеріалів із присадками дозволяє досліджувати та підвищувати їх надійність. Одними з перспективних матеріалів, що дозволяють по новому вирішувати питання підвищення ефективності мастильних матеріалів, є рідкокристалічні сполуки.

В даний час рідкі кристали широко використовуються при створенні моніторів, оптичних приладів у медицині, сільськогосподарському виробництві, хімічній промисловості і т.п.

Є дані про застосування рідкокристалічних сполук і в машинобудуванні, а також автотракторної техніки як добавки до мастильних матеріалів і мастильно-охолодних технологічних середовищ.

Зважаючи на анізотропію своїх властивостей у рідкокристалічному стані, дані матеріали дозволяють покращувати основні триботехнічні характеристики як рідких, так і пластичних мастильних матеріалів.

Одними з рідкокристалічних сполук, що є перспективними для поліпшення триботехнічних характеристик мастильних матеріалів є дискотичні металмезогени-карбоксілати міді. Проте відсутність в даний час систематичних досліджень триботехнічних властивостей даних хімічних сполук при введенні їх у пластичні мастильні матеріали робить це завдання актуальним і важливим.

Вирішення цього питання неможливе без розгляду питань, пов'язаних із зміною структури, фізико-механічних, триботехнічних та інших властивостей даних матеріалів.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка способу підвищення надійності вузлів тертя сільськогосподарських машин застосуванням мастильних матеріалів із присадками..

Відповідно до мети досліджень передбачено рішення наступних задач:

– проаналізувати існуючі види мастила вузлів тертя машин та механізмів;

- визначити способи підвищення надійності вузлів тертя сільськогосподарських машин та обладнання шляхом покращення мастильних матеріалів;

- провести стендові і виробничі випробування розроблених змащувальних матеріалів.

Об’єкт дослідження: надійність вузлів тертя сільськогосподарських машин.

Предмет дослідження: мастильні матеріали із присадками.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань застосовувалися методи математичної статистики, регресійного аналізу, ИК-спектрофотометрія, метод штучних баз, ваговий метод, оптична мікроскопія, поляризаційна термомікроскопія. Результати експериментальних досліджень

підтверджені стендовими випробуваннями на розроблених лабораторних стендах.

Результати експериментальних та стендових випробувань підтверджено виробничими випробуваннями на сільськогосподарській техніці. Обробка результатів експериментальних досліджень здійснювалася на ПЕОМ із використанням пакетів програм MathCAD, Excel.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Міненко С.В., **Яковчук Ю.В.** Способи підвищення зносостійкості та довговічності підшипників кочення. Матеріали Всеукраїнської наукової конференції молодих учених і науково-педагогічних працівників *«Сільськогосподарські, біологічні, економічні, загальноосвітні та технічні науки»*, 20 травня 2021 р. м. Умань. Умань : ВПЦ «Візаві», 2021. С. 183-186.

2. Ярош Я.Д. **Яковчук Ю.В.** Росковинський Д.О. Механічна обробка наплавлених твердих покриттів**.** «*Сучасні проблеми та перспективи розвитку машинобудування України*», присвяченої 20-й річниці з дня створення факультету конструювання та дизайну Національного університету біоресурсів і природокористування України. м. Київ. 2021. С. 229-232.

3. Міненко С.В., **Яковчук Ю.В.** Способи підвищення зносостійкості та довговічності підшипників кочення. Способи підвищення зносостійкості та довговічності підшипників кочення. Збірник тез VII-ї всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» 31 березня 2021 року. Житомир : ЖАТК. С. 172-177.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані заходи для підвищення надійності вузлів тертя сільськогосподарських машин та обладнання шляхом покращення мастильних матеріалів.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 15 найменувань.

Загальний обсяг роботи становить 38 сторінки комп’ютерного тексту, містить 1 таблицю і 8 рисунків.

РОЗДІЛ 1
ІСНУЮЧІ ВИДИ МАСТИЛА ВУЗЛІВ ТЕРТЯ МАШИН ТА МЕХАНІЗМІВ

Тривалий ресурс деталей, що труться, забезпечується застосуванням зносостійких матеріалів самих деталей, а також застосуванням мастильних матеріалів. При експлуатації шар мастильного матеріалу розділяє поверхні тертя і перешкоджає безпосередньому контакту поверхні підшипника та валу.

Нині існують різні теорії змащування. Найбільше поширення знайшла гідродинамічна теорія мастила, відповідно до якої при обертанні вала тонкий шар мастильного матеріалу, пов'язаний з поверхнею силами сорбції переміщається, захоплює за собою наступні шари і нагнітає їх у звужену частину клиноподібного зазору між валом і підшипником. Внаслідок цього виникає гідродинамічний тиск у шарі мастильного матеріалу, який забезпечує поділ поверхні валу і підшипника. Тертя між поверхнями замінюється внутрішнім тертям шарах мастильного матеріалу. При цьому знос є мінімальним і проявляється внаслідок електростатичних розрядів, що виникають при терті між поверхнями.

Розвиток гідродинамічного режиму значною мірою визначається в'язкістю мастильного матеріалу.

Більш повно враховує умови експлуатації контактногідродинамічна теорія мастила. Вона побудована на обліку пластичної деформації металу в парі тертя та збільшення в'язкості мастила під впливом високих контактних тисків.

У цьому враховується як залежність в'язкості мастильного матеріалу від тиску і температури, так і деформація поверхонь тертя.

Таким чином, мастильні матеріали, що застосовуються повинні відповідати таким вимогам:

– зберігати працездатність у широкому діапазоні температур, тиску та швидкостей;

– легко заповнювати западини та мікронерівності на робочих поверхнях;

– створювати якомога більший опір зсуву в перпендикулярному та менше – у дотичному напрямку до поверхонь тертя;

– не викликати вибухів та пожеж;

– не надавати шкідливого впливу на матеріали, з яких виготовлені деталі машин;

– забезпечувати мащення при найменшій витраті мастильних матеріалів;

– не змінювати властивостей при зберіганні та транспортуванні;

– не утворювати шкідливих та небезпечних відкладень;

– бути стійкими до радіаційного опромінення та хімічно агресивним середовищам;

– не спінюватись і не утворювати емульсій.

Відповідно до ДСТУ розрізняють такі види мастила: газове (мастило, при якому поділ поверхонь тертя деталей здійснюється газовим мастильним матеріалом); рідинне (мастило, при якому повний поділ поверхонь тертя деталей здійснюється рідким мастильним матеріалом); тверде (мастило, у якому поділ поверхонь тертя деталей, що у відносному русі, здійснюється твердим мастильним матеріалом); гідродинамічне (газодинамічне) (рідинна (газова) мастило, при якій повний поділ поверхонь тертя деталей здійснюється в результаті тиску, що самовиникає в шарі рідини (газу) при відносному русі поверхонь); гідростатичне (газостатичне) (рідинна (газова) мастило, при якій повний поділ поверхонь тертя деталей, що знаходяться у відносному русі або спокої, здійснюється в результаті надходження рідини (газу) у зазор між поверхнями тертя під зовнішнім тиском); еласто-гідродинамічне (мастило, при якій характеристики тертя та товщина плівки рідкого мастильного матеріалу між двома поверхнями, що знаходяться у відносному русі визначаються пружними властивостями матеріалів тіл, а також реологічними властивостями останнього); граничне мастило (мастило при якому тертя та знос між поверхнями, що знаходяться у відносному русі, визначаються властивостями поверхонь та властивостями мастильного матеріалу, відмінними від об'ємної в'язкості);

напіврідинне (змішане) (мастило, при якому здійснюються частково гідродинамічне, частково граничне змащування).

Під впливом високої температури масла, збільшення навантаження, полегшення витікання мастильного матеріалу з вузла тертя товщина мастильної плівки потоншується менше критичного значення, внаслідок чого тертя та зношування залежить не від об'ємної в'язкості, а від інших факторів. Такі плівки називаються граничними та тертя при таких плівках граничним.

Мастильну дія граничних плівок оцінюють маслянистістю, здатністю мастильного матеріалу забезпечувати зниження коефіцієнта тертя в умовах, коли дія плівки не визначається лише в'язкістю.

Розрізняють плівки хімічного походження (хемосорбція) та фізичного (адсорбція).

Плівки, хімічно пов'язані з поверхнями, видаляють з великим зусиллям, їх видалення супроводжується пошкодженням приповерхневих шарів. З підвищенням температури хімічні плівки товщають і руйнуються тільки при досягненні точки плавлення. Плівки, пов'язані з поверхнями фізично, тобто силами адсорбції, легко видаляються з поверхні за температури десорбції (порядку 373-423 ^{0}К). Видалення граничних шарів фізичного походження не відбивається на стані поверхні тертя. Як ті, так і інші шари легко саморегенеруються.

Плівки хімічного походження утворені в результаті взаємодії поверхні тертя з киснем (що поставляється до поверхні тертя з атмосфери або мастильного матеріалу), а також дії на поверхні тертя присадок до мастильного матеріалу.

До плівок хімічного походження відносяться також різні мила, що утворилися з вищих органічних кислот, що знаходяться в мастилі. Полярноактивні компоненти мастила, що утворилися в процесі його застосування і перебувають у свіжому мастильному матеріалі, створюють

граничні шари, пов'язані з поверхнею силами фізичної сорбції, головним чином силами Вен-дер-Ваальса.

Адсорбційні шари утворюються щільно розташованими полярноактивними вуглеводнями. Ланцюгові молекули спрямовані перпендикулярно поверхні та звернені до неї полярними групами: COOH, OH та іншими. Молекули назовні звернені неполярними метильними групами CH_3. Після завершення побудови одного ряду і заповнення всіх активних центрів поверхні, полярні молекули, що залишилися, заповнюють другий і наступні ряди. В результаті мономолекулярний частокіл перетворюється на полімолекулярний. Описана орієнтація молекул на металевій підкладці (поверхні тертя) змушує до орієнтації і неполярні з'єднання. Над граничним шаром молекули вуглеводнів розташовані хаотично. У цій галузі можливий гідродинамічний механізм мастильної дії. До полярних сполук, здатних до описаної орієнтації, відносяться не тільки сполуки, що містять карбоксильні групи і спирти, а й різні ефіри, смоли, сірчисті сполуки.

Обидва види плівок забезпечують насамперед захист поверхні тертя. Вони перешкоджають взаємній адгезії поверхонь, що труться. Маючи деяку міцність і стійкість, ці плівки захищають поверхні тертя від механічних та теплових впливів. За мастильною дією, яка, загалом, визначається здатністю забезпечувати легке ковзання, фізичні та хімічні плівки не рівноцінні.

Окисні (хімічні) плівки зумовлюють, як правило, менший опір на зсув, ніж основним метал, тому при окисленні поверхонь сила тертя знижується (мається на увазі тертя без мастила). Основна позитивна роль окисних плівок-попередження схоплювання, яке легко настає при торканні ювенільних поверхонь. З цього погляду швидкість регенерації окисних плівок після їх зношування має винятково велике значення.

За наявності граничних шарів вуглеводнів масла коефіцієнт тертя значно менше, ніж при роботі пари тертя без мастила. Це пояснюється, насамперед, легкістю ковзання орієнтованих шарів уздовж неполярних груп вуглеводнів. При

збільшенні довжини ланцюга молекули набувають здатності до нахилів та вигину, внаслідок чого досягається деконцентрація контактних навантажень на поверхневих шарах. Властивості таких плівок значною мірою залежать від властивостей металевої підкладки, від її мікро- та субмікрорельєфу.

Це зумовлено явищем адсорбційного пластифікування поверхневих шарів металевої поверхні, що, своєю чергою, сприяє зниженню сили тертя (ефект П. А. Ребіндера). Для граничних шарів характерна анізотропність, тобто є тілами квазікристалічної будови.

Уявлення про правильну пластинчасто-шарувату структуру граничних шарів слід оцінювати як ідеалізоване, що ігнорує властивості та субмікрорельєф реальної поверхні металів, що містять полярні радикали. Необхідно пам'ятати про поляризуючу дію диполів на діелектричне середовище.

Висновки по розділу

В першому розділі магістерської роботи представлено аналіз існуючих видів мастил вузлів тертя машин та механізмів сільськогосподарських машин.

РОЗДІЛ 2
СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН ТА ОБЛАДНАННЯ ШЛЯХОМ ПОКРАЩЕННЯ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Багато вузлів і деталей сільськогосподарських машин експлуатуються в жорстких умовах, які характеризуються високими навантаженнями, процесами абразивного зношування та впливом атмосферних факторів (вологи, пилу, агресивних хімічних сполук тощо).

Висока працездатність та безвідмовність сільськогосподарської техніки – одна з необхідних умов ефективного виробництва сільськогосподарської продукції.

Підвищення терміну служби вузлів тертя та механізмів є найважливішим завданням машинобудування, вирішення якого дозволяє отримати економічний ефект за рахунок зниження витрат на технічне обслуговування та ремонт, збільшення ресурсу деталей. Це має пряме відношення до машин, які працюють у умовах агропромислового комплексу.

У загальному комплексі завдань щодо вдосконалення сільськогосподарської техніки важливе значення надається підвищенню надійності, зниженню питомої матеріаломісткості машин, економії палива та мастильних матеріалів.

Досвід експлуатації свідчить, що 80 - 90% деталей машин виходять з ладу через знос.

Аналіз стану екскаваторів, що надходять у ремонт, показує, що до 99,2% деталей вибраковується через зношування.

Працездатність і ресурс сільськогосподарських машин значною мірою визначаються інтенсивністю зношування деталей, що труться. Через несправності та знос щорічно простоює від 10 до 40% машин та обладнання, що

є причиною невиправдано великих витрат матеріальних та трудових ресурсів на технічне обслуговування та ремонт техніки.

Швидке зношування техніки пояснюється низкою причин. Багато залежить від конструктивних недоліків, низьких показників її надійності.

Аналіз умов роботи зернозбиральних комбайнів, тракторів та іншої техніки дозволив виявити основні фактори, що спричиняють руйнування деталей, складальних одиниць та сполучень:

– агресивність та абразивність зовнішнього середовища, що зумовлюють наявність частинок ґрунту та добрив на поверхнях деталей;

– вплив навколишньої температури та атмосферних опадів, що сприяють утворенню плівки вологи на цих поверхнях;

– динамічні навантаження на матеріали деталей;

– вихідний стан поверхонь: шорсткість, твердість тощо.

Постійна дія комбінацій зазначених факторів викликає різноманітні руйнування.

Окремі агрегати, складальні одиниці і деталі машин мають неоднакові терміни служби, для деталей, що довго працюють, характерне чергове і нечергове зношування. Це залежить від різноманітності вихідних конструкційних матеріалів, кліматичних та інших впливів, частоти заміни та характеру роботи швидкозмінних конструктивних елементів, порушення регулювань тощо.

Серед видів зношування, яким схильні деталі сільськогосподарських машин, теоретичний і практичний інтерес представляє корозійно-механічне зношування, що є руйнування поверхонь деталей під впливом тертя (механічне зношування) і одночасно корозійного процесу, що протікає.

Важко знайти машину, а в ній механізм, спряження та деталь, які в тій чи іншій мірі не відчувають спільного впливу корозії та механічного зношування.

Корозійно-механічне зношування характеризується руйнуванням металу під дією одночасно протікаючих процесів: електрохімічної або хімічної взаємодії

металу з навколишнім середовищем та механічного руйнування продуктів цієї взаємодії та самого металу при терті.

Зношування відбувається внаслідок видалення та відділення окисленого металу у вигляді порошку з дрібних частинок оксиду. Пластична деформація металу, що супроводжує тертя, інтенсифікує його здатність до окислення. На поверхні металу практично миттєво утворюється тонкий шар оксиду завтовшки 10-15А. Його утворення відбувається за рахунок хемосорбції атомів кисню металевою поверхнею. Другий ступінь окислення супроводжується утворенням цілком певної кристалічної фази оксидів. При цьому окиснення йде за рахунок впровадження атомів кисню в кристалічну решітку металу.

Надійність машин та їх складових частин значною мірою залежить від сили вібрації, що виникає у процесі роботи. Причина підвищеної вібрації - дисбаланс (неврівноваженість) деталей, що швидко обертаються, і складальних одиниць - карданних і колінчастих валів, маховиків, шківів, дисків зчеплення коліс і т.п.

Неврівноваженість деталей виникає внаслідок нерівномірної щільності матеріалу, похибок обробки деталей, неточностей складання (перекосів, зміщень тощо), появи зносів та деформацій у процесі експлуатації. Вібрація створює додаткові навантаження на деталі, у тому числі на підшипники, внаслідок чого вони зношуються інтенсивніше.

Значна частина відмов сільськогосподарської техніки має механічне походження – втрата міцності, зносостійкості тощо. За характером зміни параметрів розрізняють відмови:

– раптові – результат стрибкоподібної зміни параметрів (крихка руйнація, поломки тощо);

– поступові (параметричні) – наслідок повільної зміни одного або кількох параметрів (старіння чи знос елементів та всієї системи під впливом навантажень та інших впливів).

Відмови двигуна, КП, ходової системи, гідроприводу, електроустаткування зернозбиральних, кормозбиральних та інших самохідних комбайнів відбуваються з тих самих причин, що й у тракторів. Особливості цих комбайнів, в основному, полягають у несправностях робочих органів та їх приводу, зокрема підшипників кочення, ковзання, валів, осей, зірочок, ланцюгів, а також транспортерів та елеваторів.

До основних несправностей жнивної частини відносяться поломка елементів ножа, затуплення вкладишів пальців, що обумовлює нерівний зріз стерні та збільшення кількості нескошених стебел, збільшення зазору у сферичних шарнірах щічок ножа або шатуна, подовження ланцюга плаваючого транспортера, перекіс нижнього шківа варіатора, що веде до одностороннього зносу зірочки.

Несправності робочих органів кормозбиральних, силосозбиральних, кукурудзозбиральних комбайнів аналогічні несправностям зернозбиральних (ланцюгові, ремінні передачі, підшипники кочення та ковзання, вали, сепаруючі органи).

Низька зносостійкість елементів трибоспряжень сільськогосподарської техніки призводить до невисоких показників її надійності. При цьому низьке напрацювання на відмову сільськогосподарських машин не дозволяє експлуатувати їх у сучасних умовах досить ефективно. Внаслідок цього недостатньо ефективно у сільськогосподарському виробництві вирішується завдання ресурсозбереження.

Дані про напрацювання зернозбиральних комбайнів, що працюють на збиранні колосових та їх показників надійності свідчать про те, що мінімальне напрацювання на відмову I групи склало 9,7 год, на відмову II групи 7,4 год, на відмову III групи 11,6 год.

Показники безвідмовності комбайнів та ґрунтообробних машин: напрацювання на відмову I, II, III груп складності в реальних умовах експлуатації становить: для зернозбиральних комбайнів від 3,2 год (Єнісей 1200)

до 9,2 год (Дон-1500), 9,6 год (Єнісей 1200-2); для кукурудзозбиральних комбайнів від 4,4 год (КСКУ-6А) до 8,2 год (КОП-1,4, ККП-3); для бурякозбиральних комбайнів від 4,8 год (МКК-6) до 8,9 год (ОГД-6); для картоплезбиральних комбайнів від 8 год (ККУ-2А; ККУ-2Б) до 13,8 год (УСП-156); для плугів від 11,5 год (ПНУ-4-40) до 47,9 год (ПЛМ-4-35); для культиваторів від 5,8 год (КПЗ-9,7) до 34,4 год (КПШ-8).

Підвищувати зносостійкість та надійність сільськогосподарської техніки в даний час можна за рахунок застосування деталей машин із зносостійких матеріалів, застосовувати різні технологічні процеси зміцнення поверхонь деталей машин.

Одним із найбільш перспективних методів підвищення надійності сільськогосподарської техніки є методи безрозбірного відновлення.

Приміром, Гайдаром С.М. розроблено технологію відновлення робочих параметрів плунжерних пар паливних насосів високого тиску через робоче середовище – дизельне паливо.

Спосіб розроблений з метою підвищення зносостійкості плунжерних пар. Полягає в модифікації поверхонь пар шляхом нанесення на них мультимолекулярного шару полярних молекул фторорганічних поверхнево-активних речовин (фтор-ПАВ) через робоче середовище (дизельне паливо) без демонтажу та розбирання паливного насоса високого тиску (ТНВД) дизельного двигуна.

Таким чином, на сполучених поверхнях утворюється ламелярна схема будови граничного шару, утвореного полярними молекулами товщиною 4...6N нм (N — число шарів молекул фтор-ПАВ), що дозволяє зменшити зазор, знизити коефіцієнт тертя, підвищити зносостійкість та надати пов'язаним поверхням гідрофобні та антиадгезійні властивості.

З огляду на те, що ресурс сільськогосподарської техніки багато в чому визначається ресурсом її трибоспряжень, то одним із перспективних

безрозбірних методів підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарської техніки є використання високоефективних мастильних матеріалів.

Зносостійкість у процесі експлуатації сільськогосподарської техніки визначається насамперед якістю мастильних матеріалів, що використовуються при технічному обслуговуванні та ремонті.

Випробування та досвід експлуатації показують, що застосування якісних палив та мастильних матеріалів значно збільшує надійність та довговічність техніки.

Роль мастильних матеріалів в трибосистемах зводиться, перш за все, до запобігання тертьових поверхонь від зношування, задирів і корозійного впливу навколишнього середовища. Як правило, пластичні мастильні матеріали краще виконують ці функції, ніж рідкі. Тому антифрикційні пластичні мастила займають одне з центральних місць серед інших груп мастильних матеріалів за обсягом та асортиментом виробництва.

Однак звичайні пластичні мастильні матеріали, що використовуються в сільськогосподарській техніці (Солідол, Літол-24, ЦИАТИМ-201), не мають достатнього рівня властивостей, необхідних для забезпечення надійної роботи машин протягом усього періоду експлуатації. Особливо чутливі до якості мастила підшипники кочення. Виходом у цій ситуації є застосування спеціальних добавок до мастильних матеріалів. В даний час цей напрямок набув широкого поширення і є дуже перспективним.

Аналіз видів зношування та пошкоджень поверхонь деталей і вузлів через різні навантаження вказує на недостатні протизносні та антифрикційні властивості застосовуваних мастильних матеріалів, тому завдання створення нових зносостійких консистентних мастил, що витримують великі ударні навантаження, є актуальним.

Підвищення терміну служби автомобільних трибоспряжень за рахунок поліпшення протизносних властивостей мастил є актуальним завданням.

З метою підвищення ресурсу та надійності важко навантажених вузлів та деталей сільськогосподарської техніки розробляють та застосовують високоефективні мастильні матеріали на основі нанотехнологій. Важливе місце серед них займають консистентні мастила, що являють собою структуровані дисперсії загусників у мастилах. При нормальних температурах у більшості мильних консистентних мастил загусник диспергований у вигляді анізодіаметричних кристалічних частинок, що мають колоїдні розміри в одному або двох вимірах.

Частинки загусника, пов'язані силами міжмолекулярної взаємодії, утворюють у мастилі просторовий структурний каркас, що міцно утримує рідку фазу. Для поліпшення експлуатаційних властивостей мастил та надання їм стабільних фізико-хімічних показників застосовують різні наповнювачі, присадки, добавки тощо.

Одним з методів підвищення довговічності трибоспряжень за рахунок модифікування поверхонь тертя є застосування металоплакувальних мастил, до складу яких введені дисперсні феромагнетики. Практичне значення мають перехідні метали, а також деякі їх інтерметалічні сполуки, наприклад, залізо-нікель, залізо-кобальт. Найбільш широко застосовують магнетит. Він має хорошу адсорбційну здатність до ПАВ, а також здатний утворювати колоїдні дисперсії з високою намагніченістю. Розділовий шар, що утворюється в зоні контакту і перешкоджає взаємодії деталей вузла тертя в таких мастилах, формують частинки металів або металовмісні з'єднання, заповнюючи мікронерівності поверхонь тертя і зменшуючи тим самим величину контактного тиску. Як такі добавки використовують високодисперсні порошки цинку, бронзи, міді, свинцю та деякі інші з розміром частинок 10...100 мкм, солі монокарбонових кислот з металами або металевий порошок - промисловий відхід електрохімічного процесу гальваніки (що містить мідь), змішаний з олеїновою кислотою. При формуванні мелалоплакуючої плівки в зоні контакту відбувається прискорення перенесення магнітоактивних частинок з об'єму

мастила, що забезпечує зниження зносу, моменту тертя та підвищення протизадирної стійкості вузлів тертя.

Підшипники ковзання найчастіше виходять з ладу внаслідок зношування та заїдання поверхні. Головним чином ці патологічні процеси тертя відбуваються при пуску та зупиненні механізму. У такий період роботи в опорах валів спостерігаються найважчі умови тертя, що зумовлено дуже малою дією гідродинамічного ефекту або повною його відсутністю.

Відповідно до молекулярно-механічної теорії тертя, запропонованої І. В. Крагельським, у ході відносного ковзання контактуючих поверхонь відбувається безперервне утворення та руйнування фрикційних зв'язків. Ці процеси, зумовлені міжмолекулярною взаємодією між контактуючими тілами в зонах фактичного торкання, є сутністю адгезійної складової зовнішнього тертя. Міцність фрикційних зв'язків залежить від величини дотичних напруг на межі розділу твердих тіл і визначається відношенням зсуву опору молекулярного зв'язку до границі текучості основного матеріалу. Ослаблення міцності таких зв'язків сприяє нормальній роботі вузла тертя.

Робота деталей сільськогосподарських машин, що труться, відбувається в основному в режимі граничного тертя. Високонавантаженість роботи механізмів сільськогосподарської техніки в умовах підвищеного вмісту абразиву в мастилі вимагає більш інтенсивного формування та відновлення захисної плівки на поверхнях, що труться.

Ефективним способом зниження зовнішнього тертя є локалізація деформації матеріалу в тонкому поверхневому шарі в так званій деформаційній зоні захисної плівки.

Для здійснення цієї локалізації необхідно дотримання правила позитивного градієнта, згідно з яким міцність молекулярних зв'язків, що виникають, повинна бути меншою за міцність нижчележачих шарів, тобто:

$$d\tau / dz > 0, \qquad (2.1)$$

де τ – опір на зріз, Па; z - відстань від поверхні по нормалі до неї, м.

Відповідно до молекулярно – механічної теорії І.В. Крагельського, сила тертя складається з деформаційної та адгезійної складових:

$$F_{тр} = F_д + F_a, \quad (2.2)$$

Силу тертя, що виникає при деформуванні, визначають за формулою:

$$F_д = W / i, \quad (2.3)$$

де W – робота деформування матеріалу, Дж;

i – переміщення, м.

Робота деформування матеріалу при переміщенні його на діаметр плями торкання дорівнює:

$$W = V \cdot \sigma_т \quad (2.4)$$

де V - об'єм, що деформується, $м^3$;

$\sigma_т$ - середня напруга в тангенціальному напрямку при пружному відтисканні, пластичному відтисканні або зрізі, Па.

Тут

$$V = \Delta A_г \cdot a_{ср}, \quad (2.5)$$

де $\Delta A_г$ - фактична площа контакту, $м^2$;

$a_{ср}$ - середня висота деформованого об'єму, м.

Нормальне навантаження визначається виразом:

$$N = \Delta A_г \cdot \sigma_N, \quad (2.6)$$

де σ_N - напруження при відтисканні матеріалу у нормальному напрямі, Па.

Адгезійна складова сили тертя дорівнює:

$$F_a = \tau_{ср} \cdot A_{ср}, \quad (2.7)$$

де $\tau_{ср}$ - тангенціальне напруження, при якому відбувається зріз плівки, Па;

$A_{ср}$ - площа зрізу плівки, $м^2$.

Таким чином, введення в мастильний матеріал добавок, наповнювачів та присадок, що дозволяють знижувати як деформаційну, так і адгезійну складову дозволяє знижувати силу тертя та підвищувати зносостійкість деталей машин.

Висновки по розділу

Таким чином, створення ефективних протизносних та антифрикційних присадок та наповнювачів до пластичних мастильних матеріалів, що використовуються в сільськогосподарському виробництві є одним з перспективних шляхів підвищення працездатності трибоспряжень сільськогосподарської техніки.

РОЗДІЛ 3
СТЕНДОВІ І ВИРОБНИЧІ ВИПРОБУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ ЗМАЩУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Випробування розроблених мастильних матеріалів в лабораторних умовах за постійно діючих умов експлуатації не дозволяють охопити всі зовнішні фактори, що впливають на елементи пар тертя при їх рядовій експлуатації. При цьому вплив випадкових зовнішніх чинників на характер навантаження вузла може бути визначальним у тих чи інших умовах.

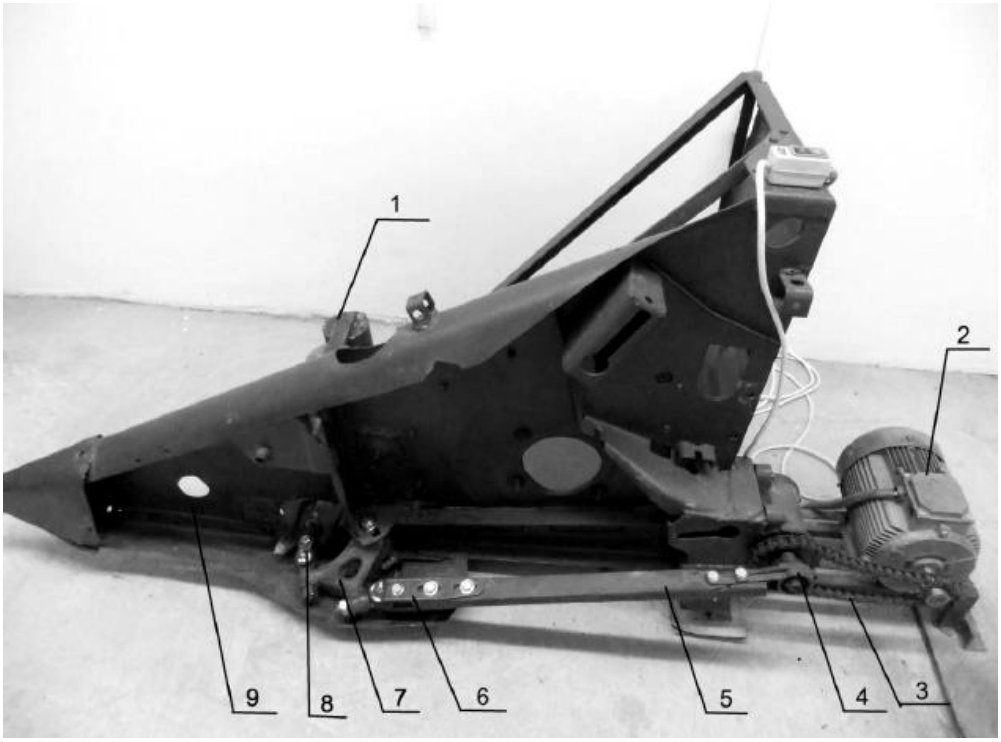
Тому рекомендації, засновані лише на лабораторних дослідженнях, найчастіше виявляються недостатньо точними та коректними. Змоделювати вплив різних факторів на елементи часто виявляється важким, а часом і неможливим. Для розробки остаточних рекомендацій щодо застосування нових матеріалів у машинобудуванні проводять додатково стендові та виробничі випробування. Умови проведення стендових випробувань, по можливості, встановлюють максимально наближеними до умов експлуатації.

Результати стендових та виробничих випробувань дозволяють визначити ступінь застосування розробленого матеріалу в конкретному вузлі, визначити діапазон його працездатності в умовах експлуатації вузла.

За результатами проведених експериментальних досліджень було проведено ряд стендових та виробничих випробувань розроблених мастильних матеріалів.

Стендові випробування проводилися на спеціально розробленому стенді, що імітує роботу ріжучого апарату жниварки зернозбирального комбайна.

Схема стенду представлена рисунку 3.1.



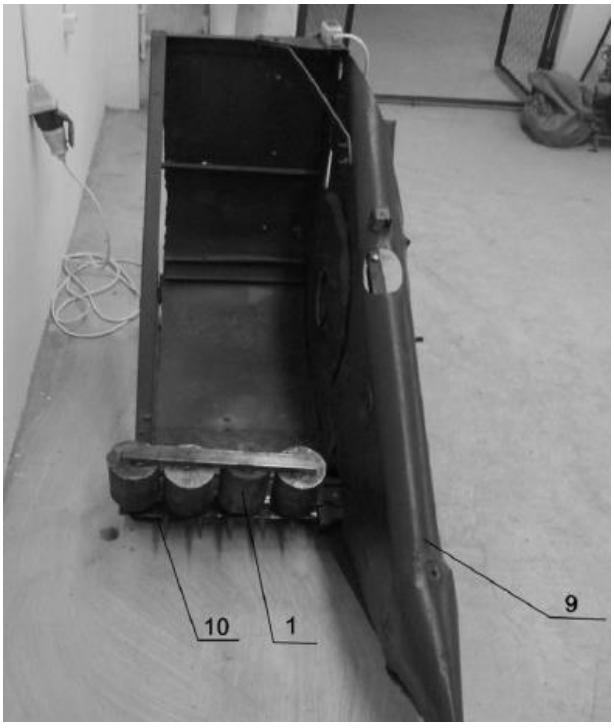


Рис. 3.1. Стенд випробувальний: 1 – навантажувальний пристрій; 2 – приводний електродвигун; 3 – ланцюгова передача; 4 – вал кривошипу; 5 – шатун; 6 – щоки шатуна; 7 – коромисло; 8 – щоки ріжучого апарату; 9 – корпус жниварки; 10 – ріжучий апарат.

У конструкцію випробувального стенду входить навантажувальний пристрій 1, що складається з набору металевих циліндрів, маса яких підбиралася виходячи з навантажень, що діють на ріжучий апарат комбайна зернозбирального СК-5 «Нива». Привід стенда здійснюється від електродвигуна 2 через ланцюгову передачу 3, вал кривошипа 4, шатун 5 і коромисло 7.

Передатне відношення ланцюгової передачі підбиралося також, виходячи з умови роботи ріжучого апарату.

Для досліджень була обрана мастильна композиція, що включає літол-24 та мезогенну присадку ундецилат міді. Відсотковий вміст ундецилату міді у ній становив 20 мас %.

У процесі досліджень визначалося лінійне зношування наступних елементів (рис. 3.2).

а) болт (№ за каталогом Н 069.02.011)

б) щока ріжучого апарату (№ за каталогу Н 069.01.008-01)

Рис. 3.2. Елементи приводу ріжучого апарату жниварки зернозбирального комбайна.

Дані елементи були обрані внаслідок їх високої навантаженості та інтенсивного зношування у процесі експлуатації. Відповідно до інструкції з експлуатації комбайна дана пара тертя повинна змащуватися з періодичністю 1 раз на зміну. Виходячи з цієї періодичності, було встановлено час одного випробування. При цьому визначалося лінійне зношування зразків методом «штучних баз». Для визначення лінійного зносу попередньо на поверхні тертя наносилися три відбитки індентором. Далі вимірювалися діаметри відбитків до

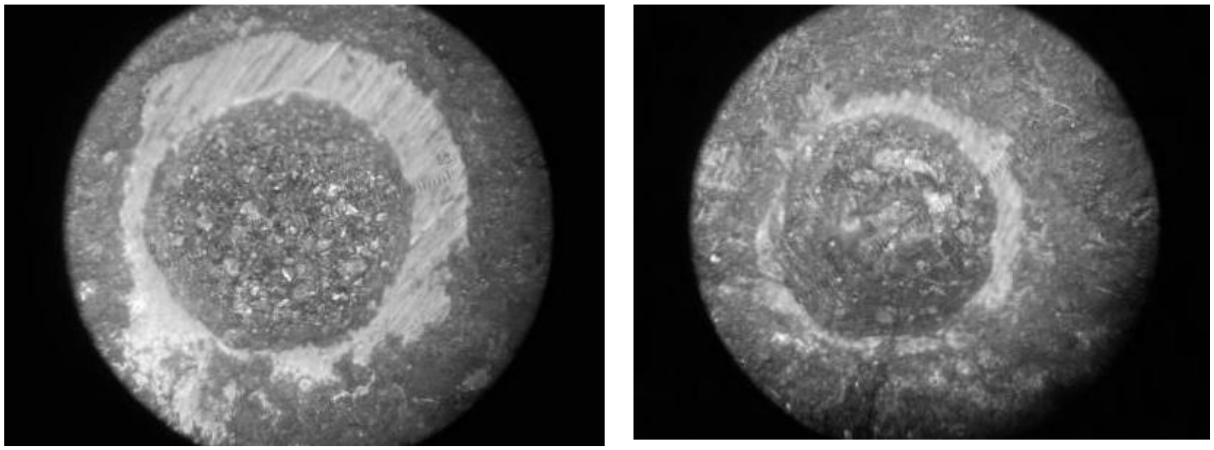
та після досліджень за допомогою мікроскопа МБУ-4. Лінійний знос визначався за такою формулою:

$$i = (D_1-D_2)/2 \cdot tg\ 30^0, \quad (3.1)$$

де D_1 – діаметр відбитка до тертя, мм;

D_2 – діаметр відбитка після тертя, мм.

Остаточно знос визначався як середньоарифметичне значення. На рис. 3.3 представлені фото кульової поверхні болта (рис.3.2 а) після випробувань у присутності мастильних композицій.



а) при мащенні серійним СМ б) при мащенні експериментальним СМ

Рис.3.3. Фото поверхонь тертя болта.

Порівняння рисунків 3.2 а та 3.2 б свідчить про те, що в присутності присадки ундецилату міді поверхня тертя менш виражена порівняно з поверхнею тертя, яка з'явилася у процесі випробувань при змащуванні СМ литол-24 без присадки.

Цей експеримент наочно показує, що при використанні серійного мастильного матеріалу процес зношування поверхні протікає інтенсивніше і це призводить до значного зниження ресурсу даного елемента.

Інтенсивність зношування досліджених елементів наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати визначення інтенсивності зношування досліджених елементів

Мастильний матеріал	Найменування деталі	
	Болт, мкм/км	Щока ріжучого апарату, мкм/км
Серійний мастильний матеріал	3,35	5,72
Експериментальний мастильний матеріал	2,18	1,65

Як показують отримані результати, введення в серійне мастило літол-24 мезогенного ундецилату міді дозволяє значно знизити зношування деталей у парі тертя «куля-сфера». Інтенсивність зношування щоки ріжучого апарату знижується в 3,47 рази, інтенсивність зношування болта знижується в 1,54 рази.

Стендові випробування підтверджують раніше проведені дослідження, які вказують на те, що ундецилат міді у приграничному шарі може формувати колончасті упаковки, які, як показано в ряді попередніх досліджень на інших мезогенах з колончастою надмолекулярною структурою, ефективні як протизносні присадки для важконавантажених вузлів тертя.

Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлено, що використання дискотичного мезогену ундецилату міді як присадка до пластичного мастила літол-24 дозволяє значно знизити інтенсивність зношування елементів приводу ріжучого апарату зернозбирального комбайна.

Зниження інтенсивності зношування елементів ріжучого апарату призводить до підвищення ресурсу деталей, збільшення періодичності змащування елементів, що труться, до зниження кількості споживаного мастильного матеріалу і трудомісткості обслуговування комбайна і, як наслідок, дозволяє підвищити надійність навантажених елементів приводу ріжучого апарату зернозбиральних комбайнів.

Для порівняльних стендових випробувань мастильних матеріалів у підшипниках кочення був розроблений та зібраний навантажувальний стенд на базі токарно-гвинторізного верстата ТВ-6, представлений на рисунку 2.4.

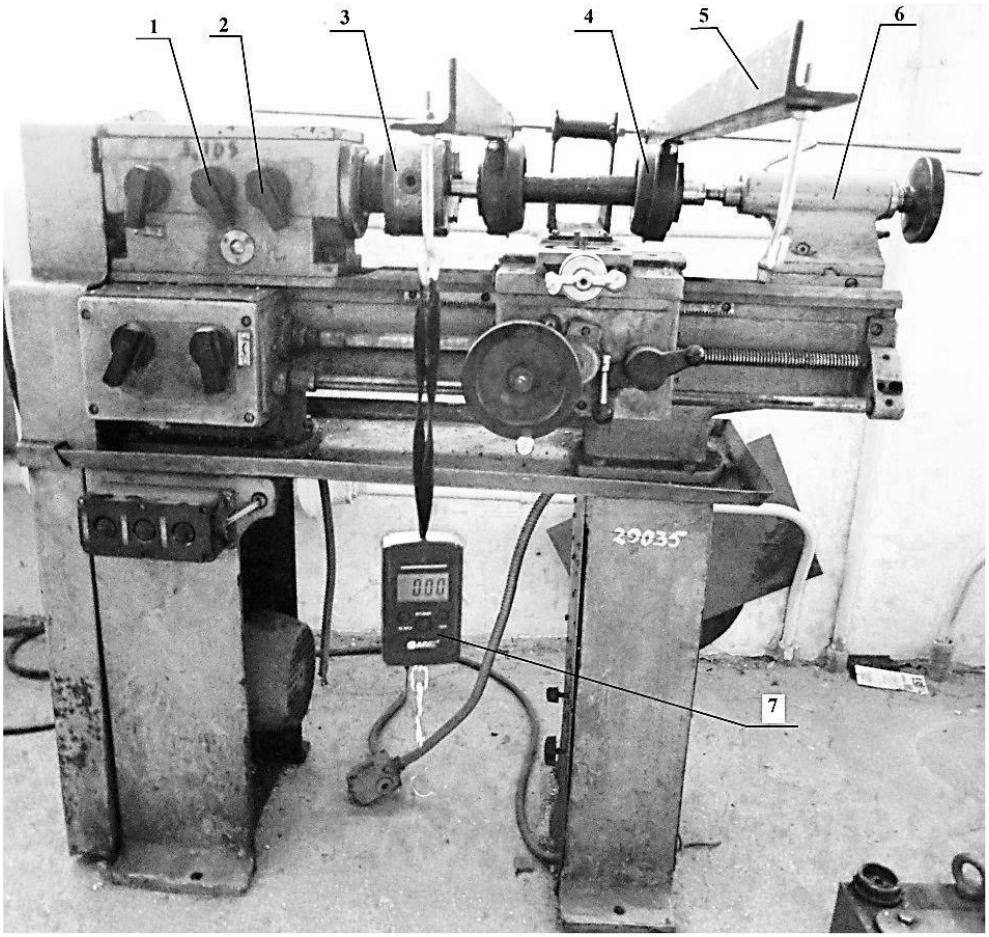


Рис. 3.4. Випробувальний стенд на базі токарно-гвинторізного верстата ТВ-6: 1,2 – рукоятки установки частоти обертання шпинделя, 3 – шпиндель верстата, 4 – підшипникова опора, 5 – навантажувальний важіль, 6 – задня бабка верстата, 7 – динамометр.

Стенд складається з наступних складових частин: токарно-гвинторізного верстата ТВ-6, на якому встановлені два навантажувальні важелі 5, що спираються на підшипникові опори 4. Навантаження на підшипникові вузли встановлювалася за допомогою системи вантажів, що встановлюються через динамометр 7 на підвіси важелів навантажувальних. Підшипники, розташовані в підшипникових опорах 4, кріпилися на осі, яка в свою чергу фіксувалася однією стороною в шпинделі верстата (трикулачковому патроні, що самоцентрується) 3, іншою стороною вісь упиралася в задню бабку верстата 6.

Застосування як привод токарно-гвинторізного верстата дозволило змінювати в широкому діапазоні частоту обертання підшипників.

Для випробувань було взято дві опори з підшипниками кочення №6206. Одна з серійним мастильним матеріалом, в другу як присадку додавали ундецилат міді. Частота обертання шпинделя верстата встановлювалася за допомогою рукояток 1 і 2 (рис. 3.4), і становила 510 хв$^{-1}$. Навантаження на підшипники вимірювалося за допомогою динамометра і складало 100 Н на кожен підшипник.

Далі через 500 км пробігу контролювався радіальний зазор обох підшипників на приладі КИ-1223.

За результатами визначення радіальних зазорів визначалася інтенсивність зношування підшипників у присутності серійного мастила (літол-24) та мастильної композиції, що складається з літол-24 та синтезованої присадки (ундецилат міді).

Результати стендових випробувань підшипників кочення представлені на рисунках 2.5-2.7.

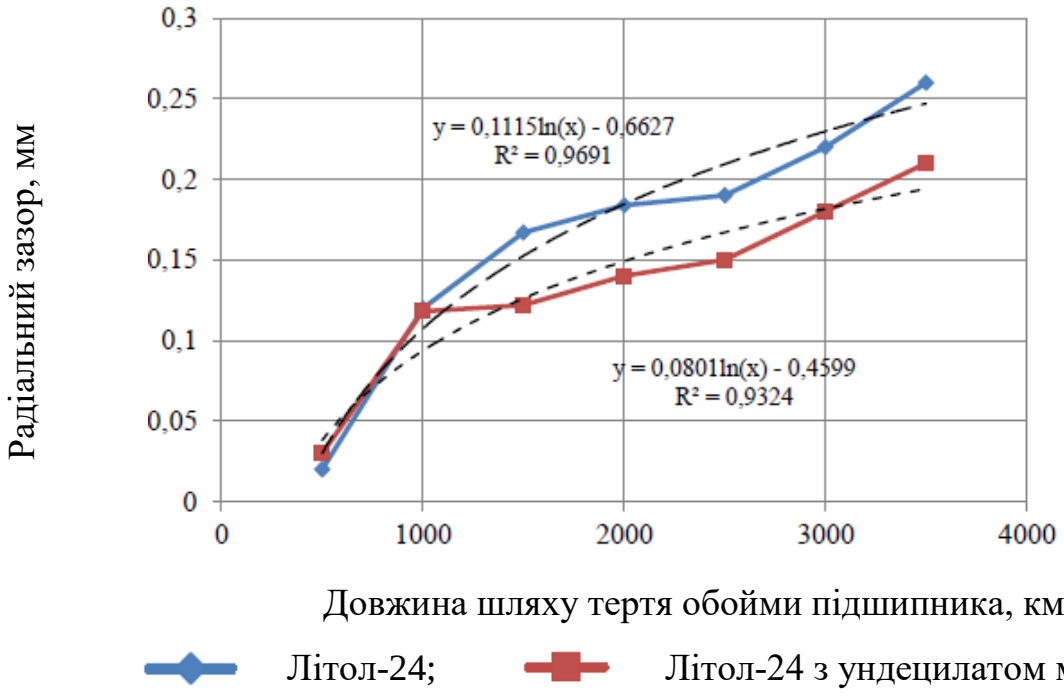


Рис. 2.5. Результати дослідження радіального зазору підшипників

З даних стендових випробувань видно, що введення досліджених карбоксилатів міді знижують зношування елементів підшипників кочення в порівнянні з використанням серійного мастила без добавок.

За результатами досліджень визначалася також швидкість та інтенсивність зношування підшипників кочення.

Результати визначення швидкості зношування представлені на рисунку 3.6, результати визначення інтенсивності зношування представлені на рисунку 3.7.

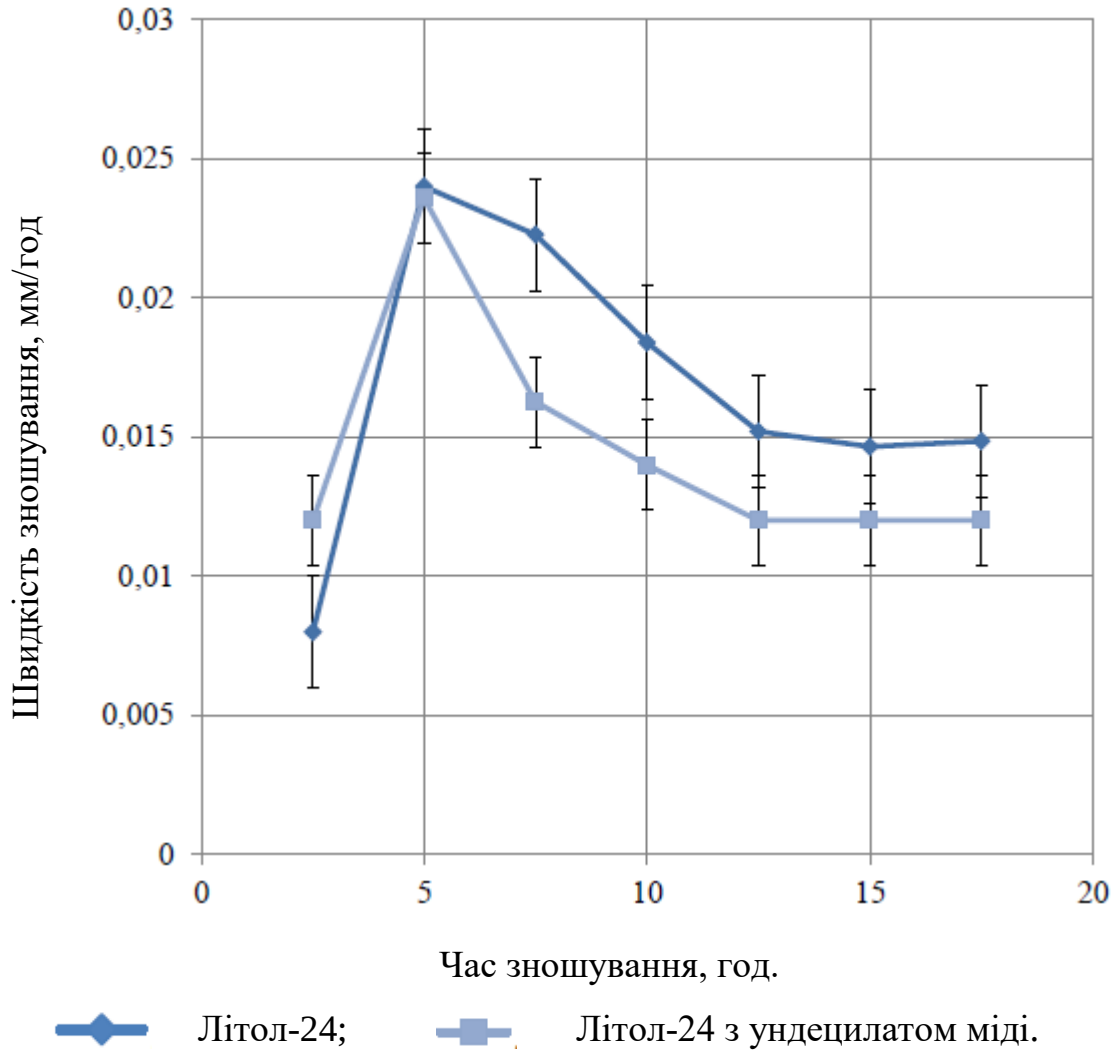


Рис. 3.6. Залежність швидкості зношування від часу зношування

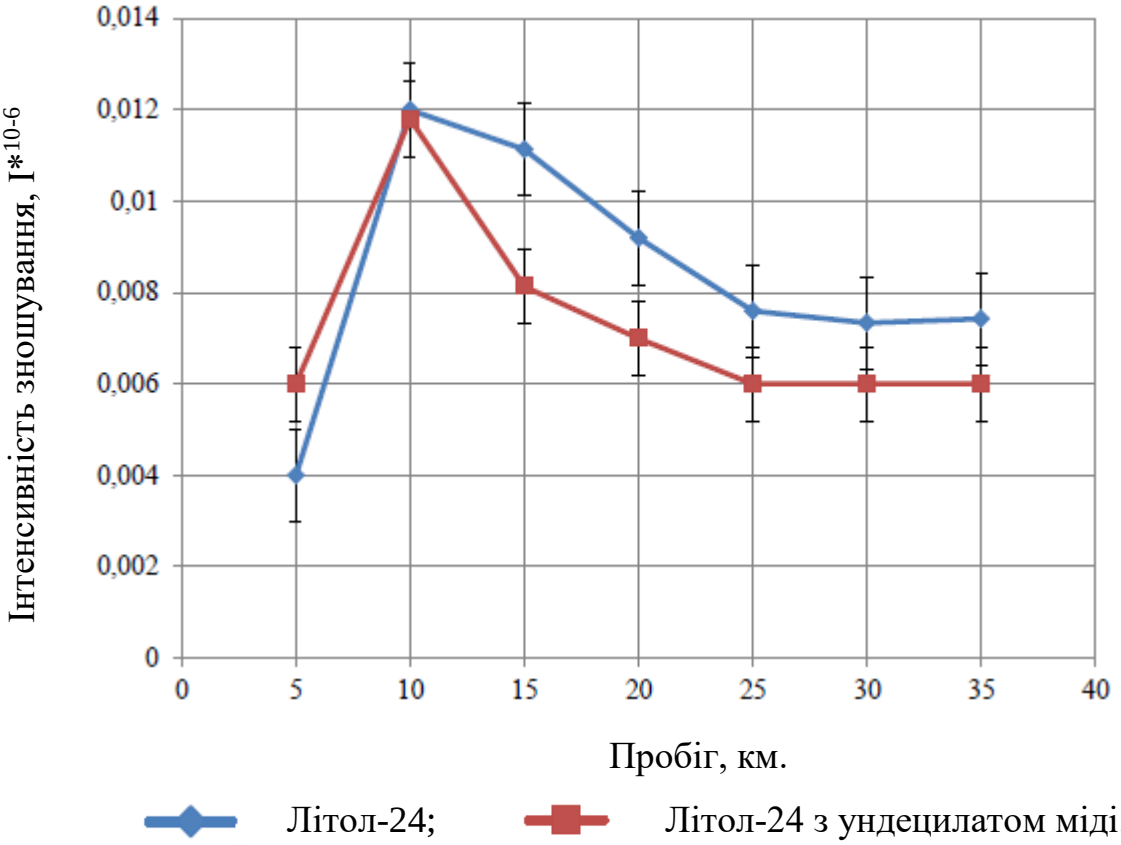


Рис. 3.7. Залежність інтенсивності зношування від пройденого шляху

З рисунків 3.6 та 3.7 видно, що при пробігу до 10 км швидкість та інтенсивність значно зростають, що зумовлено періодом приробітку, після 25 км швидкість та інтенсивність зношування стабілізуються та стають постійними. При цьому видно, що інтенсивність зношування підшипника з ундецилатом міді як протизносна присадка знизилася в середньому на 20%.

За результатами визначення радіального зазору за допомогою програми Microsoft Excel були побудовані рівняння регресії (Рис. 3.6), за якими були визначені залишкові ресурси підшипників, що порівнюються.

Результати представлені на рисунку 3.8.

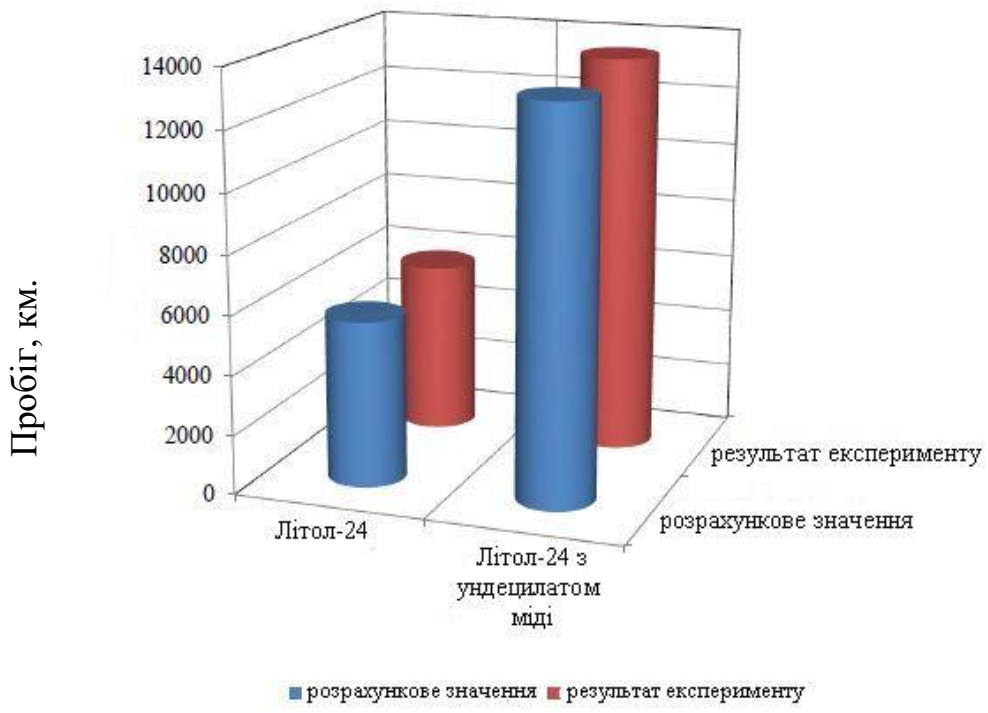


Рис. 3.8. Результати визначення залишкового ресурсу підшипників кочення

Таким чином, результати стендових випробувань показали, що ресурс підшипників кочення підвищився у 2,35 рази. Різниця між розрахунковим залишковим ресурсом та фактичним: для підшипника кочення з літол-24 –2,94 %, для підшипника з ундецилатом міді 2,22 %.

Таким чином, застосування досліджених карбоксилатів міді як протизносні присадки до пластичних мастильних матеріалів перспективно не тільки для пар тертя ковзання, але і для підшипників кочення.

Враховуючи результати лабораторних та стендових досліджень, був приготовлений мастильний матеріал на основі літол-24 з добавкою синтезованого ундецилату міді.

Розроблений мастильний матеріал у процесі виробничих випробувань використовувався для змащування підшипників ШС-40 у підшипникових вузлах борони дискової модульної причіпної БДМ-6х4П.

Для визначення зносу підшипників використовувався ваговий метод (використовувалися ваги ВЛКТ-500). Зважування підшипників здійснювалося до роботи та після закінчення періоду польових робіт. Підшипники попередньо

очищалися від забруднень, промивалися розчинником, просушувалися до видалення слідів вологи і зважувалися.

Висновки по розділу

Застосування мастильного матеріалу дозволило знизити масову інтенсивність зношування підшипників у 2,39 рази.

Таким чином, проведені виробничі випробування підтверджують ефективність введення карбоксилатів міді у пластичні мастила.

ВИСНОВКИ

Виявлено оптимальну концентрацію присадок у пластичних мастильних матеріалах. Дослідження показують, що оптимальною є концентрація присадок у матеріалах на базі кальцієвих мастил від 5 до 10 мас.%. залежно від конкретного гомолога та навантаження на зразки. Для мастильних матеріалів на літієвій основі максимальне покращення триботехнічних характеристик спостерігається при концентраціях присадок від 10 до 20 мас.%.

Стендові випробування представлених мастильних матеріалів доводять перспективність використання їх як у підшипниках ковзання, так і у підшипниках кочення. При цьому інтенсивність зношування елементів приводу ріжучого апарату зернозбирального комбайна знизилася в 1,54-3,47 раза, ресурс підшипників кочення №6206 підвищився у 2,35 раза.

Виробничі випробування розроблених мастильних матеріалів у вузлах тертя ґрунтообробної техніки показали їх ефективність у порівнянні з серійними, що випускаються, що дозволяє рекомендувати їх до подальшого використання у вузлах тертя як сільськогосподарської техніки, так і іншого технологічного обладнання. Застосування мастильного матеріалу дозволило знизити масову інтенсивність зношування підшипників у 2,39 рази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хрущов М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию структурно-неоднородных материалов. Москва: Трение и износ в машинах. 1958. 243 с.

2. Хрущов М.М. Исследование изнашивания метал лов. Москва : Изд-во АН СССР. 1960. С.351 с.

3. Ткачев В. Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. Москва : Машиностроение, 1971.- 264 с.

4. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении. Київ : Техника. 1976. С. 296 с.

5. Випробування сільськогосподарської техніки. Основні положення. Керівний документ, КНД46.16.01.05-93, 1995.

6. Сидоров С.А. Технический уровень и ресурс рабочих органов сельхозмашин. Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1998. №3. С .214-218.

7. Іванкова О.В., Бартош В.Ю. Дослідження впливу зміцнюючих технологій відновлення деталей на ресурс машин. Вісник ХНТУСГ. 2019. С. 235-241.

8. Рябцев И. А. Материалы и энергосберегающие технологии наплавки для восстановления и изготовления деталей машин и механизмов. Автоматическая сварка. 2017. №3. С. 132-140.

9. Иванов В. П. Технология и оборудование восстановления деталей машин: ученик. Минск: Техноперспектива, 2007. 458 с.

10. Колосюк Д. С., Зеркалов Д. В. Експлуатаційні матеріали : підручник. Видання друге. Доповнене. Київ : Основа, 2004. 456 с.

11. Полянський С. К., Коваленко В. М. Експлуатаційні матеріали : підручник. Київ : Либідь, 2003. 276 с.

12. Бендера І.М. Паливно-мастильні та інші експлуатаційні матеріали. Камянець-Подільський: ФОП Сисин Я.І. 2016. 154 с.

13. Полянський С.К. Експлуатаційні матеріали: Підручник. Київ : Либідь, 2003.

14. Колосюк Д. С. Експлуатаційні матеріали. Підручник, 2-ге видання, доповнене. Київ : Арістей, 2005. 245 с.

15. Школьникова В.М. Топлива, смазочньїе материальї, технические жидкости. Ассортимент и применение. Москва : Изд. Центр “Техинформ”, 1999. 596 с.