

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до дипломної роботи

освітнього ступеня "Магістр"

на тему:

**ВПЛИВ АНТИФРИКЦІЙНИХ І ПРОТИЗНОСНИХ ДОБАВОК У
ТРАНСМІСІЙНІ ОЛИВИ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ
ТРАКТОРІВ**

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

_____ Литвин Дмитро Олегович

Керівник: _____ Толстенко Олександр Васильович

Рецензент: _____

Дніпро 2025

Перві промені		46ДР.090 000. 000 ВР										
		№ п/п	Формат	Позначення	Найменування	Кіл. аркушів	№ аркуша	Примітка				
Сторін №		1			Текстові документи							
		2										
		3	A4	46ДР.090 0000. 000ПЗ	Пояснювальна записка	79						
		4										
		5			Демонстраційні матеріали							
Підп. і дата					Слайди у форматі Microsoft PowerPoint	12						
Вказ. шиф. №		46ДР.090 000. 000 ВР										
Підп. і дата												
№№ сторінок		Вик.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Відомість дипломної роботи		Лист	Масса	Масштаб	
		Разроб.	Литвин Д.О.									1:1
		Проб.	Толстенко О.В.									
		Т.контр.								Лист	Листів	1
		Н.контр.	Івлев В.В.							M2A1-2-24		
Утв.	Дудін В.Ю.											

РЕФЕРАТ

Литвин Д.О. Вплив антифрикційних і протизносних добавок у трансмісійні оливи на довговічність зубчастих передач тракторів : пояснювальна записка до магістерської роботи / Д.О. Литвин. – Дніпро : ДДАЕУ, 2025. – 79 с.

У роботі розглянуто проблему підвищення надійності та довговічності зубчастих передач силових агрегатів тракторів шляхом застосування антифрикційних і протизносних добавок у трансмісійні оливи. Проаналізовано види зносу й пошкоджень зубців відповідно до сучасних трибологічних класифікацій, а також особливості роботи зачеплень у важких умовах експлуатації. Наведено огляд властивостей трансмісійних оливок, принципів формування граничних плівок та механізмів зниження коефіцієнта тертя.

Запропоновано методику лабораторних випробувань із використанням роlikової трибологічної машини, що дозволяє моделювати реальні умови роботи зубчастих пар та оцінювати вплив незалежних факторів: навантаження, швидкості ковзання, концентрації абразиву та типу присадки. Проведено серію експериментів для визначення моменту тертя, температури мастильного середовища та інтенсивності зношування зразків. Встановлено, що окремі добавки забезпечують зниження моменту тертя на 10–15 %, зменшення абразивного зношування у 1,8–2,3 раза та стабілізацію площі фактичного контакту.

Розраховано техніко-економічний ефект від застосування присадок у трансмісійних механізмах тракторів. Показано, що їх використання дозволяє збільшити міжремонтний ресурс агрегатів, зменшити витрати на обслуговування та підвищити енергоефективність техніки.

Ключові слова: трибологія, трансмісійні оливи, зубчасті передачі, знос, момент тертя, антифрикційні присадки, абразивне середовище, довговічність, трактор, силова передача.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1. СТАН питання І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1. Загальна картина роботи навантаження зубчастих коліс у силових передачах та види відмов зубців шестерень	9
1.1.1. Аналіз відмов зубчатих передач	9
1.1.2. Основні елементи трибомеханічних систем	13
1.1.3. Класифікація видів зносу і пошкоджень зубчастих передач	14
1.2. Масла для зубчатих передач	20
1.2.1. Призначення мастильних матеріалів і вимоги, що пред'являються до них	21
1.3. Концепція використання окремих добавок у трансмісіях тракторів	23
1.4. Висновки та завдання дослідження	26
2. Теоретичні питання підвищення довговічності силових передач шляхом застосування добавок в оливи	28
3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	39
3.1 Вибір факторів, чисельних характеристик цілей дослідження та їх обґрунтування.....	39
3.2. Методика лабораторних випробувань з виявлення та оцінки впливу добавок на протизношуваність і антифрикційність зубчастих передач	43
3.2.1. Виявлення добавок з кращими протизносними та антифрикційними характеристиками.....	44
3.2.2.Методика оцінки впливу добавок при дії декількох змінних факторів .	48
3.3. Методика обробки експериментальних даних	54
3.4 Порівняльні випробування впливу добавок на здатність контактуючих поверхонь зубів протистояти процесам тертя і зношування	55

3.5. Висновок	61
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПРИ РОБОТІ З МАСЛАМИ ТА АНТИФРИКЦІЙНИМИ ПРИСАДКАМИ	63
4.1. Загальні відомості про охорону праці при обробці агрегатів маслами з додаванням присадок	63
4.2. Шкідливі та небезпечні фактори при використанні антифрикційних присадок до масел	64
4.3. Заходи щодо усунення шкідливих та небезпечних факторів при роботі з маслами та присадками до них	66
4.4. Висновок	68
РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ТЕХНІЧНОЇ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕНИХ ЗАХОДІВ	69
5.1. Розрахунок економічної ефективності роботи	69
5.2. Висновок	72
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	74
ЛІТЕРАТУРА	75
ДОДАТКИ	79

ВСТУП

Рівень надійності автотракторної техніки визначається її здатністю обходитися без матеріальних витрат і витрат праці на підтримку в працездатному стані [1, 2]. Підвищити цей рівень є можливим на етапі розрахунку, проектування, виготовлення та експлуатації вузлів і агрегатів трансмісії.

Виготовлення деталей пов'язане з необхідністю використання дорогих і рідкісних на сьогоднішній день зміцнюючих легуючих елементів, в експлуатації ж метал деталі вузла працює не в повному обсязі на глибину, а по поверхні, отже, можна припустити, що знаходження цих елементів у місцях контакту і постійна генерація їх на поверхнях тертьових тіл із мастильного середовища зумовлює можливість підвищення довговічності агрегатів трансмісії шляхом введення в масла добавок, що поліпшують зносостійкість, зменшують тертя [3, 4]. Крім того: по-перше, при використанні антифрикційних присадок в коробці можна досягти економії пального до 4,3%; по-друге, заміна масла здійснюється значно рідше, що вже саме по собі зберігає ресурси та екологію.

Шляхом зміни умов експлуатації машин можна чинити істотний вплив на інтенсивність нормального зносу, а також попереджати виникнення небажаних видів руйнування, що призводять до пошкодження тертьових поверхонь.

Встановлено, що при заданому поєднанні матеріалів коефіцієнт тертя значно залежить від сорту масла і типу застосовуваних присадок.

Тому багато дослідників схильні відносити антифрикційність до властивості вузла тертя [5].

Якщо мастильної дії не вдається забезпечити використанням динамічного ефекту, то вирішальне значення набувають граничні шари мастильного матеріалу, хімічно модифіковані поверхневі і приповерхневі шари матеріалу, а також поверхневі плівки, полімери тертя або самогенеровані органічні плівки [6, 7].

Широкі можливості управління процесами тертя і зношування пов'язані із застосуванням нових мастил з багатофункціональними присадками. Вибір присадок і необхідність їх введення в масла залежить від виду змащуваних вузлів

тертя, умов їх роботи, а також від процесів, що протікають на поверхнях тертя і обмежують їх працездатність.

При розробці та підборі протизадирних, а також інших присадок потрібно керуватися конкретними умовами роботи машини та характером пошкодження в цих умовах поверхонь тертя. Сполуки, що вибираються в якості присадок, повинні в необхідній мірі покращувати умови тертя і в той же час бути мінімально корозійно-агресивними і не погіршувати фізико-хімічні властивості масла. Дуже важливо також використовувати статистичні дані про характер пошкоджень тертьових пар, довговічність і причини виходу з ладу вузлів і деталей тертя [4].

З урахуванням вищевикладеного, мета роботи полягає у визначенні добавки до масла, що зменшує інтенсивність зношування зубчастих зачеплень агрегатів трансмісії тракторів, а отже підвищує їх надійність.

Апробація роботи: Литвин Д. О. (2025). Класифікація видів зносу та поверхневих пошкоджень зубчастих передач у трансмісійних механізмах. *Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу»* (21 листопада 2025 року), ДДАЕУ, Дніпро, (с. 55–58).

1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Загальна картина роботи навантаження зубчастих коліс у силових передачах та види відмов зубців шестерень

1.1.1. Аналіз відмов зубчатих передач

У контакті зубців відбувається кочення зі ковзанням профілів, за винятком полюса зачеплення, в якому реалізується кінематично чисте кочення. Швидкості ковзання і кочення впливають на силу тертя, товщину мастильного шару, теплові процеси, інтенсивність зношування механізму і кінетику перебігу фізико-хімічних процесів. Максимальне значення швидкостей ковзання має місце в початковій і кінцевій точках зачеплення, збільшення швидкості ковзання призводить до руйнування мастильного шару, підвищеного зношування і заїдання внаслідок зростання контактного теплового фактора і механічного руйнування мікронерівностей поверхонь в результаті зминання і зрізу [8]. Сили тертя ковзання у ведучих зубців спрямовані від полюсної частини до ніжки і до головки зуба, у ведених зубців - до полюса зачеплення. Головки ведучих і ведених зубців є випереджаючими у відносному русі, ніжки зубців - відстаючими поверхнями при взаємному коченні з ковзанням [8].

Високий коефіцієнт питомого ковзання є одним з основних факторів, що впливають на знос зубців, величина якого по висоті змінюється: найбільша в зоні головки і ніжки, де відбувається кочення зі значним прослизанням [7].

Ці одночасно протікаючі процеси швидко виводять шестерні зі строю. Аналогічні руйнування робочої поверхні деталей спостерігаються в механізмах коробок передач і редукторах ведучих мостів. При перемиканні передач, муфти і шестерні коробки передач знаходяться під ударним навантаженням, внаслідок чого торці зубців зминаються. При різкому скиданні газу або різкому включенні зчеплення шестерні коробки передач і заднього моста піддаються інтенсивним ударним впливам, на довгих підйомах з рідкісними зупинками шестерні трансмісії тривало працюють на постійному режимі з важким навантаженням [7]. Напружені режими роботи зубчастих передач у трансмісіях тракторів призводять

до їх виходу з ладу внаслідок різних видів зносу зубців (насадки зубців зустрічаються рідко).

Згідно з номенклатурою Американської асоціації виробників зубчастих передач (AGMA), налічується 21 вид відмови зубців [9]. Класифікують види відмов зубців коліс, розділивши їх на дві основні категорії: відмови, пов'язані з протіканням, і відмови, пов'язані зі змащенням (або, точніше, з трибонікою) рис. 1.1.

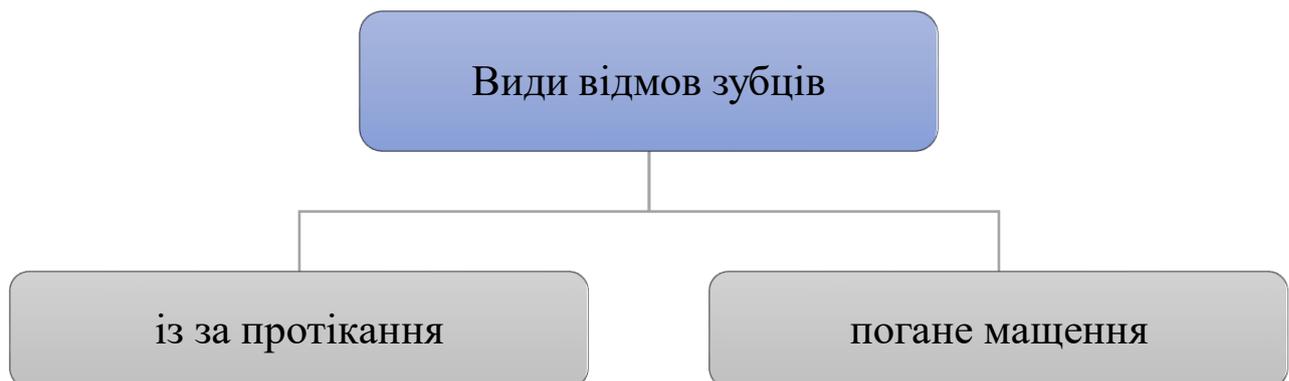
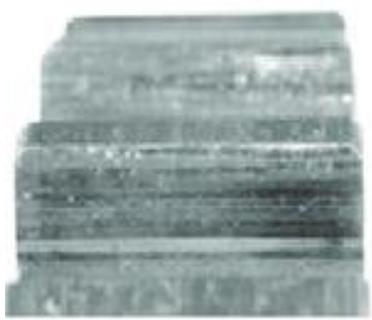
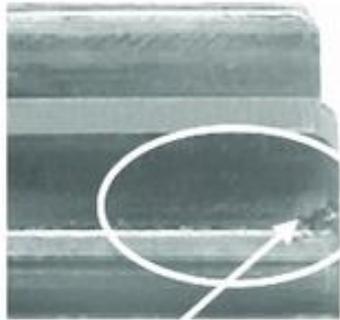
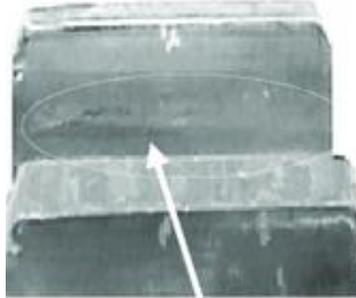
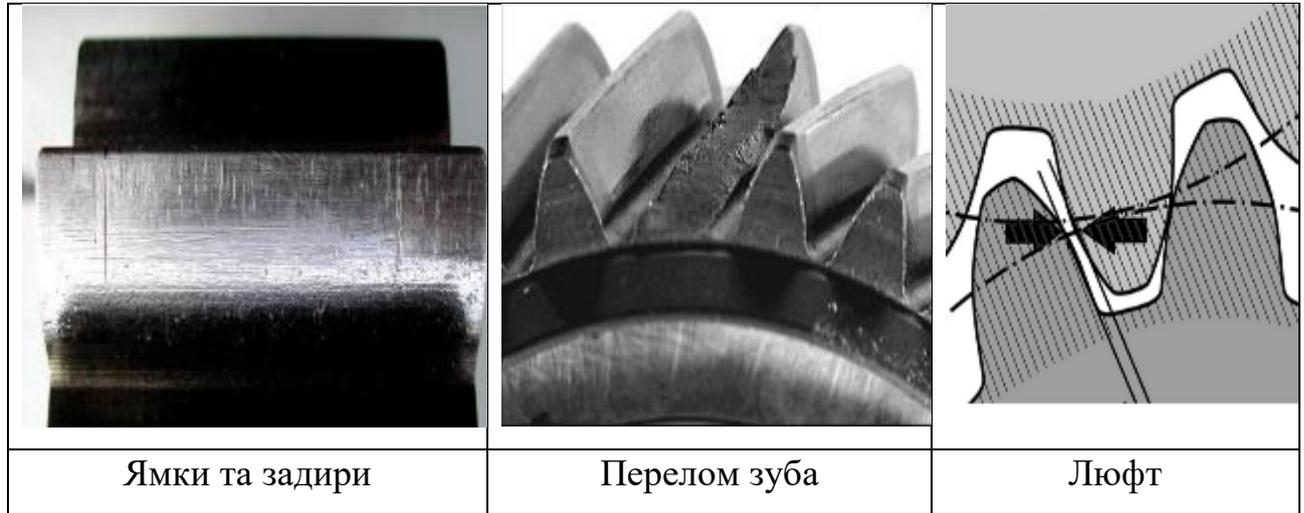


Рисунок 1.1 – Види відмов зубців

Головними видами відмов, пов'язаних з міцністю, є пластична течія і поломка. Головними видами відмов, пов'язаних з трибонікою, є стирання, задир і викрашування фото зносів та дефектів наведені в таблиці 1.1. З системної точки зору ці процеси в основному пов'язані зі змінами структури розглянутої системи.

Таблиця 1.1- Дефекти зубців

Знос зубців		
		
20 годин роботи	144 години роботи	216 годин роботи



Таблиця 1.2 – Відмови зубців шестерень

Дефект	Причини	Профілактика
Знос зубців шестерні	<p>1. Недостатнє змащення: Відсутність змащення призводить до контакту металу з металом, що викликає тертя і знос.</p> <p>2. Неправильне вирівнювання: неспіввісність шестерень може призвести до нерівномірного розподілу тиску, що призведе до надмірного зносу зубців.</p> <p>3. Перевантаження: Експлуатація зубчастих передач за межами їх проектної потужності може прискорити знос зубців.</p>	<p>1. Регулярне змащування високоякісними трансмісійними оливами допомагає зменшити тертя.</p> <p>2. Методи змащення зубчастих передач: переваги та типи оливо)</p> <p>3. Забезпечення правильного вирівнювання під час установки та регулярна перевірка на предмет неспіввісності можуть запобігти нерівномірному зносу.</p> <p>4. Впровадження систем контролю навантаження для запобігання перевантаженню передач.</p>

Ямки задири	<p>1. Надмірний тиск або тепло: Коли шестерні працюють при високих температурах або великих навантаженнях, матеріал може почати руйнуватися, що призводить до появи раковин і задирок.</p> <p>2. Недостатнє змащення: Без належного змащення тертя значно збільшується, що призводить до цих форм пошкодження поверхні.</p>	<p>1. Використання високоякісних мастильних матеріалів, що витримують високий тиск і температуру.</p> <p>2. Зменшення робочого навантаження до значень, зазначених виробником, може допомогти уникнути надмірного тиску на зуби шестерень.</p> <p>2. Регулярне технічне обслуговування для перевірки наявності ознак зносу і своєчасної заміни пошкоджених шестерень.</p>
Перелом зуба	<p>1. Перевантаження: Вплив на шестерні навантажень, що перевищують їх проектні характеристики, може призвести до розтріскування або поломки зубців.</p> <p>2. Втома: Постійне повторюване навантаження на шестерні, особливо при високошвидкісному використанні, може призвести до утворення мікротріщин на поверхні зубців, що в кінцевому</p>	<p>1. Забезпечення роботи передач в межах рекомендованих меж навантаження і швидкостей. Регулярні перевірки на перевантаження повинні проводитися.</p> <p>2. Використання шестерень, виготовлених з високоміцних матеріалів, або застосування поверхневої обробки, такої як індукційне гартування може допомогти протистояти втомі.</p>

	підсумку призведе до поломок.	
Люфт	<p>1. Неправильна установка: Якщо шестерні не зачеплені належним чином під час установки, може виникнути надмірний люфт.</p> <p>2. Знос: Згодом, у міру зносу шестерень, зуби можуть ослабнути, що призведе до збільшення люфту.</p>	<p>1. Регулярно перевіряйте шестерні на відсутність ознак ослаблення або надмірного руху.</p> <p>2. Переконайтеся, що шестерні встановлені правильно, з правильним зазором і зачепленням.</p>

1.1.2. Основні елементи трибомеханічних систем

Більшість трибомеханічних систем має структуру, здатну змінюватися під час функціонування системи під дією трибологічних процесів. Отже, в описі трибомеханічних властивостей необхідно враховувати, що вони мають структуру і функцію динамічної системи.

Зміни структури трибомеханічної системи можуть включати:

1) Утворення або зникнення елементів системи. Прикладами служать, з одного боку, утворення «третьох тіл» у контакті сухих поверхонь у формі «полімерів тертя» або продуктів реакції і, з іншого боку, руйнування плівок мастила.

2) Зміни взаємозв'язків елементів. Прикладами є чергування режимів мастила при русі вздовж кривої Штрібека або зміни в механізмах зношування.

3) Зміни властивостей елементів системи. Прикладами є зміни топографії поверхонь або твердості і міцності поверхонь ковзання або кочення [9].

Ці викликані трибологічними процесами зміни структури визначають потім функціональну передачу потужності через систему. За відсутності міцнісних відмов максимальна потужність, яку можна передати через сукупність однотипних зубчастих коліс, обмежена в основному при малих швидкостях стиранням, при помірних швидкостях викрашуванням і задиром і при високих

швидкостях задиром. Нижче будуть розглянуті найбільш явно виражені механізми пошкодження зубчастих коліс - викрашування і задир.

1.1.3. Класифікація видів зносу і пошкоджень зубчастих передач

Вид зносу можна встановити в першому наближенні за такою зовнішньою ознакою, як вид поверхні тертя. Для повного судження може знадобитися аналіз складу, фізичних і механічних властивостей тонких поверхневих шарів.

Слідуючи І.В.Крагельському, процес зносу для аналізу розчленуємо на три явища:

- взаємодія поверхонь тертя;
- зміни, що відбуваються в поверхневому шарі;
- руйнування поверхонь.

Взаємодія поверхонь має подвійну молекулярно-механічну природу. Вона реалізується на плямах дотику через виникнення і зникнення фрикційних зв'язків. За І.В. Крагельським можна виділити п'ять основних видів порушень фрикційних зв'язків: мікрорізання, пластичне відтіснення, пружне відтіснення, захоплювання поверхневих плівок і їх руйнування, захоплювання основного матеріалу і глибинне виривання.

Запропонована класифікація фрикційних зв'язків цінна своєю універсальністю. Вона об'єднує всі види зносу від абразивного до атомно-молекулярного.

Будь-яка робоча деталь або сполучення деталей мають чітко виражений провідний вид зносу або пошкоджуваності, що обмежує довговічність і надійність при експлуатації, а також супутні види руйнування поверхні, що мало впливають на роботу сполучення. Провідні види зносу і пошкоджуваності більшою мірою залежать від кінематики тертя, тобто від виду тертя (ковзання або кочення) [10].

Провідний вид зносу - це процес, що переважає за своєю якістю і кількісним проявом у загальній сукупності з іншими супутніми процесами зносу поверхонь при терті. Положення про провідний вид зносу робить перспективною розробку класифікації (табл.1.3).

Таблиця 1.3 - Класифікація видів зносу і пошкоджуваності деталей машин

Знос	Види руйнування при терті
Допустимий	Механохімічний нормальний окислювальний
	Механохімічний нормальний знос плівок некисневого походження
	Механохімічна форма абразивного зносу
Недопустимий	зчеплення I роду
	Зчеплення II роду
	Фреттинг-процес (застигання, динамічне окислення)
	Різання, дряпання, проорювання (механічна форма абразивного зносу)
	Втома при коченні
	Інші види пошкоджень (корозія, кавітація, ерозія, зминання тощо)

Зчеплення I роду - процес неприпустимої пошкоджуваності поверхонь тертя в результаті виникнення локальних металевих зв'язків, їх деформації і руйнування відділенням частинок металу або налипанням на поверхні контакту [10, 11].

Захоплення II роду - процес неприпустимої пошкоджуваності поверхонь тертя, що виражається в порушенні місцевих металевих зв'язків, їх деформації та руйнуванні, що виражається в утворенні тріщин, намазуванні, перенесенні металу та відділенні частинок з поверхонь тертя [10].

Основні ознаки нормального зносу на відміну від різних видів пошкодження полягають у відсутності будь-яких видів руйнування основного матеріалу, в локалізації руйнування в найтонших поверхневих шарах вторинних структур, що утворюються при терті, а також у динамічній рівновазі механіко-хімічних процесів утворення і руйнування вторинних структур, що забезпечує стабільний перебіг процесу [10].

Втомне руйнування (рис. 1.2). Втомні пошкодження виникають у деталях машин при терті кочення і є результатом інтенсивного руйнування поверхневих

шарів металу, що знаходяться в особливих умовах напруженого стану. Основні характеристики і розвиток втомних пошкоджень визначаються процесами повторної пластичної деформації, зміцненням і розм'якшенням металу поверхневих шарів, виникненням залишкових напружень і особливими явищами втоми. Руйнування поверхонь при втомних пошкодженнях характеризується виникненням мікротріщин, поодиноких і групових западин [12].



Рисунок 1.2 – Втомна тріщина, руйнування і втомне викришування

Викрашування викликається повторним циклічним навантаженням поверхонь вище межі втомної витривалості матеріалу. Для його розвитку потрібен деякий час, і воно призводить до поверхневих або підповерхневих тріщин і в кінцевому рахунку до відділення частинок з утворенням вогнищ викрашування на одній або обох поверхнях [13].

Втомне руйнування поверхневих шарів матеріалів у вигляді викрашування виникає в добре змащуваних механізмах, тертьові сполучення яких працюють в режимах кінематичного кочення, ковзання, кочення з ковзанням [13].

Втомні мікротріщини виникають на поверхні у вигляді невеликих V-подібних щілин і потім розширюються під впливом високого тиску, який може виникнути в мастильному матеріалі. Тому особливо інтенсивно цей процес руйнування протікає при гідродинамічному та еластогідродинамічному змащуванні [12].

Водневе зношування і водневе окрихтування (рис. 1.3). Необхідно відрізнити два різних поняття - «водневе зношування» і «воднева крихкість». Воднева крихкість сталі обумовлена поглинанням водню металом, чому сприяє температура, атмосферний тиск, зміцнення, механічне навантаження і деформація, катодні процеси, контакт з водневим середовищем. Присутність

водню в експлуатаційних умовах знижує тривалу міцність і витривалість сталі або призводить до раптового крихкого руйнування навантажуваних деталей. Водневе зношування - специфічно інше явище, виникає лише при терті і відрізняється від звичайного наводнення (що призводить до водневої крихкості) більшою інтенсивністю поглинання водню, іншим законом його розподілу в металі, незвичайним характером руйнування поверхневих шарів контактуючих тіл.



Рисунок 1.3 – Водневе окрихкування

Водневе окрихкування Виявилося, що в процесах тертя в результаті значного прискорення реакцій дегідрогенізації вуглеводнів мастила або сполученого тіла, наприклад, пластмаси, виділяється і адсорбується водень на поверхнях тертя. В умовах деформування і нагрівання відбувається активне наводнення, наприклад, сталі, її окрихкування і подальше диспергування.

Абразивний знос (рис. 1.4). Існування абразивного зносу і пошкоджуваності пов'язане з присутністю твердих частинок в зоні тертя, тому на відміну від інших видів зношування і пошкоджуваності, що характеризуються певним діапазоном швидкостей і тисків, абразивні процеси можуть виникати в найширшому діапазоні зовнішніх силових впливів. Прояв механіко-хімічної або механічної форми цього виду руйнування залежить від співвідношення механічних властивостей абразивних частинок і поверхневих шарів зношеного металу [8].

Досвід експлуатації показав, що в трансмісії тракторів проникає значна кількість пилу, що викликає передчасне зношування і подальше руйнування деталей коробки передач і заднього моста. Механічні домішки в маслі складаються з горючих і негорючих частин. У свою чергу, негорюча частина поділяється на металеві продукти зношування трансмісії і на ґрунтовий пил, який може потрапляти при заливці масла і в процесі роботи тракторів через ущільнення та інші нещільності з'єднань трансмісії.



Рисунок 1.4 – Абразивний знос

Можливі причини потрапляння пилу в трансмісію - періодичний нагрів і охолодження укладеного в ній повітря і виникаючий у зв'язку з цим газообмін із зовнішнім середовищем. Наближений розрахунок показує, що величина газообміну може бути значною. Так, при обсязі картера трансмісії трактора $0,0612 \text{ м}^3$, підвищенні температури від 30 до 70°C і вільному виході газу кількість пилу збільшується на $0,008 \text{ кг}$, тобто на $11,5 \%$.

При наявності в маслі абразивних частинок пластична деформація поверхневих шарів відбувається більш інтенсивно, вона охоплює більш глибокі шари в порівнянні з випадком, коли в маслі немає абразивних частинок. Товщина вторинної структури збільшується в кілька разів, при повторному контакті з абразивом така структура легко знімається, що в кінцевому рахунку підвищує інтенсивність зношування. При зміні хімічного складу мастила змінюються його протизносні властивості.

Кавітація (рис. 1.5). Вібраційну кавітаціюможуть викликати звукові коливання, особливо ультразвукові. Звукові хвилі прискорюють окислювально-

відновні реакції, викликають внутрішньомолекулярні перегрупування речовин, підсилюють диспергування, прискорюють процеси миття та знежирення поверхонь і викликають коагуляцію дрібних частинок.



Рисунок 1.5 – Кавітаційний знос

При вібрації не виключається кавітація в тонкому мастильному шарі між поверхнями, яка може привести до викрашування матеріалу підшипників ковзання, зубів коліс і поверхонь інших деталей. Точкова корозія зубців шестерень та знос матеріалів підшипників є результатами дії кавітації в тонких мастильних плівках [14]. Зношування при зчеплення. Зчеплення при тертя - приварювання, зчеплення, місцеве з'єднання двох твердих тіл під дією молекулярних сил. При цьому утворюються міцні металеві зв'язки в зонах безпосереднього контакту поверхонь. У місцях схоплювання зникає межа між тілами, що стикаються, відбувається зрощення одно- і різнорідних металів.

Заїдання - найбільш яскрава форма прояву схоплювання.

Утворюються широкі і глибокі борозни з нерівними краями, іноді злиті; є великі нарости; можливе оплавлення поверхні. Може статися повне заклинювання деталей. Заїдання спостерігається в важконавантажених підшипниках ковзання, зубчастих зачепленнях, що передають значні крутні моменти, рідше в підшипниках кочення [7]. На відміну від викрашування, що поступово розвивається в часі, задир може розвиватися стрімко [7].

Зминання. Це об'ємна пластична деформація металу деталей, зумовлена зміною форми при навантаженнях вище межі плинності. Воно пов'язане зі зміною форми при навантаженнях вище межі плинності.

Деформація і зминання можуть поширюватися на весь об'єм деталей або на його значну частину [10]. Даний вид пошкодження торців зубців муфти супроводжується утворенням напливів. Пошкоджена поверхня при зминанні має менше середнє арифметичне відхилення профілю. При перемиканні передач процес зминання супроводжується інтенсивною пластичною деформацією поверхневого шару металу на глибину 100 – 130 мкм, яка характеризується подрібненням структури і підвищенням мікротвердості. Супутнє зношування - абразивне, про що свідчить впровадження абразивних частинок в зону тертя.

Вплив води. Механізм, що пояснює вплив невеликої кількості води на втому, полягає в наступному. Поверхневі мікротріщини, утворені раніше в умовах контакту при коченні, діють як тонкі капіляри. Мастило заганяється в ці капіляри, і розчинена в ньому вода конденсується на вершинах тріщин, утворюючи фазу, багату на воду. Потім циклічні напруження, сконцентровані біля вершини тріщини, водна корозія і воднева крихкість діють спільно [10].

Таким чином, зубчасті колеса частіше всього виходять з строю внаслідок контактної втоми поверхонь зубців; другий найбільш ймовірний тип пошкодження – знос стиранням внаслідок абразивного впливу або недостатнього змащення і, нарешті, часто відбувається заїдання зубців; це, по суті, обмежує надійність агрегатів трансмісії [15]. Втомному руйнуванню зубців в зоні початкової окружності супроводжує абразивне зношування, про що свідчать подряпини на поверхнях тертя.

1.2. Масла для зубчатих передач

У нормальних умовах тертя і зносу утворення містків зварювання між двома тілами повинно бути усунуто за допомогою застосування різних мастил і плівок (оксидів). Хімічний аспект змащувальної дії рідини проявляється в

утворенні на поверхнях тертя нових хімічних сполук у вигляді твердих плівок (при цьому не виключається можливість їх утворення в підповерхневих шарах).

Зростання твердих плівок відбувається внаслідок хімічних реакцій між компонентами мастильної рідини і металу. Тверді плівки на поверхні тертя зменшують адгезію тертьових поверхонь і запобігають задирці і схопленню, що досить важливо для зубчастих передач.

1.2.1. Призначення мастильних матеріалів і вимоги, що пред'являються до них

Основні функції, які мастила повинні виконувати при використанні в складальних одиницях, механізмах, машинах [12]:

- запобігати або зменшувати зношування тертьових поверхонь деталей, а також захищати їх від заїдання на всіх режимах роботи. Для цього мастило повинно мати таку в'язкість і маслянистість, щоб забезпечувати при нормальних умовах роботи рідинне змащування, а на перехідних режимах - граничне;

- зменшувати сили тертя між поверхнями, що труться, щоб сприяти скороченню непродуктивних втрат енергії, а отже, підвищенню к. п. д. (в цьому відношенні в'язкість мастила масла повинна бути невеликою, але цілком достатньою для забезпечення рідинного змащування, одночасно масло повинно мати пологий графік в'язкості, тобто в'язкість повинна мало залежати від температури, ця обставина особливо важлива при мінусовій температурі навколишнього повітря);

- відводити тепло від тертьових сполучених і нагрітих деталей, не допускаючи їх перегріву, через який погіршуються умови роботи деталей і мастила;

- захищати робочі поверхні деталей від корозії, що виникає в результаті впливу води, кисню, кислот і т. д.;

- змивати з тертьових поверхонь деталей продукти зношування та інші забруднення, утримувати їх у зваженому стані, добре фільтрувати;

- захищати поверхні деталей від утворення на них смолисто-лакових відкладень і нагарів, що погіршують тепловіддачу тощо.

Таким чином, мастило має змащувальну, демпфуючу, захисну від корозії та охолоджувальну дію. У потік мастила відводиться як тепло тертя, так і тепло, що надходить до поверхонь тертя від гарячих частин машини.

Потоком масла також виводяться із зони тертя продукти зносу. У звичайних умовах експлуатації фрикційні поверхні контактуючих тіл мають різні види адсорбованих шарів. Залежно від умов тертя і фізико-хімічних властивостей (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 - Характер руйнування поверхні залежно від виду мастила

Вид мастила	Характер руйнування
Рідинна	Фрикційна втома при пружних деформаціях
Напіврідка	Пластичне деформування: фрикційна втома при пластичних деформаціях (малоциклова втома)
Гранична	Малоциклова втома і (або) абразивне зношування
Без мастила	Абразивне зношування та (або) захоплення з глибинним вириванням

Ефекти зниження опору зсуву і екранування силових полів, що забезпечуються граничними плівками компонентів масла і продуктів їх взаємодії з металом поверхні, значно посилюються при наявності окисних плівок, завдяки яким зростають сумарна товщина і, отже, захисна дія плівок.

Ефективність екрануючої дії, а отже, ступінь зниження коефіцієнта тертя (за рахунок зменшення адгезійної компоненти) зростає зі збільшенням полярної активності, тобто дипольного моменту вуглеводнів, що здійснюють змащення [10].

Механізм зниження мастилом граничного тертя заснований на утворенні ним граничних плівок і стимулюванні утворення окисних плівок, що забезпечують:

- перенесення (повне або часткове) з металу в плівки зсуву, що виникає при русі тертьових поверхонь взаємодії, і зменшення тим самим механічної складової сили тертя;

- ослаблення силового поля твердих поверхонь шляхом його екранування із забезпеченням мінімального залишкового поля і мінімального власного силового поля плівок і зменшення тим самим адгезійної складової сили тертя.

Трансмісійні оливи та їх властивості. Для змащування коробок передач, роздавальних коробок, диференціалів, що представляють собою зубчасті передачі, - циліндричні конічні, гіпоїдні та інші – застосовуються мастильні оливи, що відносяться до групи трансмісійних.

Для трансмісійних масел характерна можливість засмічення абразивом у разі їзди по ґрунтових дорогах при недостатньо високій якості ущільнень, а також можливість обводнення в результаті попадання води в картери при їзді в умовах бездоріжжя і внаслідок конденсації водяної пари з атмосфери при добових коливаннях температури.

Усередині картера масло розбризкується зубчастими передачами механізмів трансмісії і піддається аерації, а також каталітичному впливу змащуваних деталей. З розвитком техніки умови роботи трансмісійних масел стають все більш жорсткими, що вимагає створення високоякісних масел з комплексом різних присадок, що підвищують кілька експлуатаційних властивостей [30].

1.3. Концепція використання окремих добавок у трансмісіях тракторів

Навіть якщо поверхні повністю розділені масляною плівкою, виникає вицвітання і зношування, оскільки наявність плівки просто пом'якшує дію безпосереднього контакту пар тертя і інтенсивність циклічних поверхневих напружень, але не виключає їх зовсім. Однак застосування мастила має два особливих наслідки [10]:

- помічено, що втомна довговічність значною мірою залежить від відношення товщини плівки до шорсткості поверхонь;

- є деякі підстави вважати, що при використанні масел різного хімічного складу не можна нехтувати хімічним впливом.

Отже, добавки повинні розширювати діапазон мастильних і службових властивостей масел і доповнювати їх відсутні можливості, при цьому певне значення має і концентрація перших. Крива, що характеризує залежність інтенсивності зношування -J третювих тіл від концентрації – А присадки в маслі, має мінімум (рис. 1.6). Передбачається, що зменшення зносу з підвищенням концентрації присадки пов'язане зі збільшенням її адсорбції, утворенням міцних граничних шарів, що запобігають адгезійному зношуванню. Збільшення зносу з ростом концентрації присадки пояснюється інтенсифікацією хімічних процесів на межі розділу метал - масло, що призводить до підвищення хімічного і корозійного поверхневого руйнування [14].

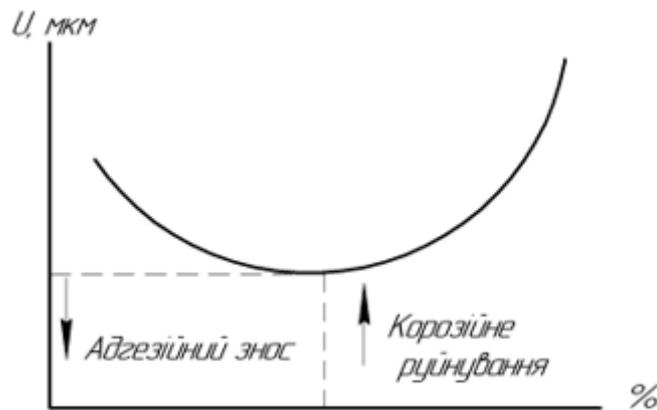


Рисунок 1.6 - Залежність інтенсивності зношування від концентрації присадок в оливі

Речовина в контактній зоні при терті (більшою мірою в режимі припрацювання) перебуває в особливому сильно збудженому стані. Подібного стану неможливо досягти за відсутності тертя простим нагріванням матеріалу до температур, що виділяються при терті. При порушенні граничного режиму збудження досягає такого ступеня, при якому спостерігаються фото- та електронна емісія, іонізація навколишньої атмосфери поблизу взаємодіючих поверхонь. Особливість збудження речовини при терті позначається в тому, що лише при терті виявилось можливим здійснити синтез деяких речовин,

неможливий і нереалізований за відсутності тертя в тих же середовищах, температурах та інших умовах.

Істотну роль при терті відіграє рівноправність температури і напруги, що лежить в основі кінетичної концепції руйнування і міститься у виразі для часу життя міжатомного зв'язку під навантаженням. Завдяки цьому, а також синергізму одночасного впливу деформації зсуву і високого тиску (неодмінних складових тертя) відбуваються: твердофазна полімеризація органічних речовин (мономерів) - утворення трибополімерів; інші явища, що підтримують безперервну генерацію полімерної плівки, яка руйнується і видаляється при терті. Характер полімерів, що утворюються, визначається, крім режимів впливу високого тиску і деформації зсуву, природою вуглеводнів основи мастила і добавок, введених у вихідну суміш. Зокрема, тверді аморфні речовини утворюються головним чином за участю ненасичених і ароматичних вуглеводнів.

Ці та інші факти свідчать про те, що шляхом варіювання зовнішніх умов, складу і природи мастильного середовища, змінюючи характер і рівень збудження, хімічної активності на поверхні, можна керувати процесом тертя, цілеспрямовано змінювати властивості поверхні в потрібному напрямку [10].

Зубчасті передачі машин піддаються дії досить високих питомих навантажень. У конічних передачах питомі навантаження на зуби шестерень досягають 2000 МПа, а в гіпоїдних - 4000 МПа. Такий важкий режим роботи призводить до значного зростання температури в агрегатах трансмісії (до 125..140°C, а в місцях контакту зубчастих зачеплень – до 250 °C [15].

Для зниження тертя і зносу необхідна гранично можлива локалізація деформації в тонкому поверхневому шарі. Локалізований позитивний градієнт опору зсуву може бути викликаний наявністю зовнішніх (роздільних) мастильних прошарків, адсорбційним пластифікуванням металу або просто локальним підвищенням температури при досить великих швидкостях ковзання [15].

1.4. Висновки та завдання дослідження

У працюючому механізмі можуть створюватися такі умови, при яких контактуючі поверхні розділені мастильним шаром товщиною в кілька молекул і закономірності тертя залежать від фізико-механічних властивостей поверхні та хімічного складу мастильного матеріалу.

В'язкість мастильного матеріалу істотного значення не має. При граничному терті навантаження сприймається не тільки мастильною плівкою, але й окремими металевими виступами в місцях руйнування плівки.

Взаємодія поверхонь буває двох видів: механічна і молекулярна.

Механічна взаємодія виражається у взаємному впровадженні і зачепленні в сукупності з еоударом нерівностей у разі ковзання грубих поверхонь.

Молекулярна взаємодія проявляється у вигляді адгезії і схоплювання, а також і на ділянках взаємного впровадження. Вона обов'язково буде мати місце при руйнуванні масляної плівки. Отже, дію добавок має сенс розглядати як демпфуючу при механічній взаємодії і перетворюючу – при молекулярній.

Поведінка матеріалу при терті, як і в умовах об'ємного деформування, визначається основними чотирма термодинамічними параметрами: температурою в контакті T , тиском p , тривалістю контакту, концентрацією з надлишкової фази. Вивчення закономірностей зміни цих параметрів дозволяє керувати процесами на контакті і з урахуванням взаємодії вихідної та утворюваної структур створювати оптимальну структуру матеріалу контактної зони, що забезпечує необхідну зносостійкість твердих тіл.

Обґрунтована методика боротьби із зносом деталей машин складається з трьох основних етапів [16]:

- встановлення виду зносу або пошкодження; підставою для цього є класифікація видів руйнування поверхонь тертя за ознакою провідного процесу;
- вибору методу придушення небажаного процесу;
- перевірки ефективності практичного застосування методу.

Виходячи з вищесказаного, сформулюємо завдання дослідження:

1. Обґрунтувати теоретичні передумови можливості цілеспрямовано змінювати властивості трущих поверхонь, змінюючи режим і умови тертя за допомогою добавок.

2. Використовуючи існуючі методики, виявити здатність добавок керувати процесами тертя і зносу в діапазоні їх нормального протікання (за відсутності пошкоджуваності).

3. Змодельовати роботу зубчастої пари в лабораторних умовах, за допомогою роликової аналогії, з метою встановлення зв'язку між незалежними змінними факторами і параметрами оцінки роботи в процесі активації поверхонь тертя впливом добавок.

4. Оцінити здатність добавок позитивно впливати на зубчасті зачеплення, використовуючи при цьому в якості об'єкта дослідження реальний вузол, що працює в умовах, близьких до експлуатаційних.

5. Розробити прийоми доцільного застосування окремих добавок в силових передачах тракторів.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ СИЛОВИХ ПЕРЕДАЧ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ДОБАВОК В ОЛИВИ

Аналіз літературних даних показує, що взаємодія поверхонь при зовнішньому терті твердих тіл призводить до пружнопластичних деформацій поверхневих шарів, що сприяють виникненню і розвитку вторинних процесів. У поверхневих шарах тіл, що труться, пластичні деформації можуть досягати граничних значень, змінюючи фізичні та механічні властивості матеріалів, їх структуру та характер протікання процесів.

Тертя характеризується видом зв'язку двох контактуючих поверхонь, при якому переважаючим є пластичне деформування, що визначається глибиною відносного впровадження [17].

Пружногідродинамічна теорія включає в себе залежність в'язкості мастила від тиску, пружну деформацію сусідніх твердих тіл і здійснення задовільного змащення контакту в таких умовах, інакше кажучи пружна деформація тіл відіграє істотну роль в гідродинамічному процесі змащення [17].

Трьома важливими розрахунковими параметрами в пружногідродинамічній теорії є:

- параметр навантаження

$$P^* = \frac{P}{E^* r} \quad (2.1)$$

- параметр швидкості

$$V^* = \frac{m^0 V}{E^* r} \quad (2.2)$$

- параметр матеріалів

$$G = mE^* \quad (2.3)$$

де P^* і V^* - безрозмірні величини,

P - навантаження на одиницю ширини циліндра,

r - ефективний радіус пари роликів,

E' - ефективний модуль,

V - відносна швидкість ковзання,

m° - постійне значення в'язкості мастила,

m - п'єзокоефіцієнт в'язкості згідно із співвідношенням.

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} - \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right), \quad (2.4)$$

де ν_1, ν_2 - коефіцієнт Пуассона;

E_1, E_2 - модулі пружності матеріалів.

Пластична течія інтенсифікує процеси масоперенесення незважаючи на те, що гідростатичний тиск уповільнює дифузію і масоперенесення. Пластична деформація під високим тиском прискорює процес взаємодії вихідних металів до такої міри, що дозволяє без спеціального нагрівання отримати з грубодисперсної суміші або макроскопічних шматків металів однорідний за фазовим складом матеріал.

Параметри матеріалу тіл характеризуються емпіричними пружними постійними: модулем зсуву G і модулем пружності E , - які пов'язані між собою співвідношенням

$$G = E / \left[2(1 + \mu_q) \right] \quad (2.5)$$

де μ_q - коефіцієнт Пуассона [18].

Оскільки модуль пружності визначається силами міжатомної взаємодії, ця механічна характеристика структурно нечутлива, тобто будь-які способи зміни

структури металу практично не змінюють модуля пружності, всі інші механічні характеристики є структурно чутливими і змінюються в досить широких межах [7]. У поверхневих і приповерхневих шарах металу деяке падіння мікротвердості, збільшення модуля зсуву G і викликає відповідно зменшення коефіцієнта Пуассона з рівняння (2.5). Як наслідком можливе ослаблення інтенсивності зношування в умовах сорбційних процесів і хімічного модифікування, а також зведення до мінімуму величини зношеного шару.

Тертя формально визначається як опір, що виникає при відносному переміщенні поверхонь. Однак воно являє собою складний фізичний процес, природа якого може принципово змінюватися в залежності від зовнішніх умов: механічних параметрів, чистоти обробки і матеріалів поверхонь, а також від активності змащувального середовища. При невеликих питомих навантаженнях, значних швидкостях і високій чистоті обробки поверхні відносний зсув між поверхнями відбувається в масляному шарі, і несуча здатність тертьових пар, а також тертя залежать від мастила [4].

Істотний вплив на умови виникнення викрашування справляють режим змащення і товщина мастильного шару. Вплив останньої проявляється як через дотичні напруження, що виникають в зоні контакту (питомі сили тертя), так і через зміни характеру і кількості взаємодій мікронерівностей контактуючих тіл.

Зі збільшенням товщини мастильної плівки зменшується кількість взаємодіючих мікронерівностей, тривалість їх мікродеформації, адгезійна взаємодія, динамічні навантаження в контакті і сили тертя, що виникають.

Вплив товщини мастильного шару на довговічність пари, що труться, зручно виражати як залежність числа циклів навантаження або допустимого натягу від безрозмірної (наведеної) товщини мастильного шару:

$$\frac{h_m}{\sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2}} \quad (2.6)$$

де R_{a1} , R_{a2} - середнє арифметичне відхилення шорсткості контактуючих поверхонь.

Для забезпечення рідинного тертя в контактї величина зазначеного відношення повинна бути більше 3-4 [19].

Зниження шорсткості зубів, як правило, є корисним і призводить до підвищення навантаження задирання D , оскільки стимулює гідродинамічний ефект. У роботі [19] наводиться така залежність:

$$P_z = \frac{1}{R_a^{0,25}} \quad (2.7)$$

Товщина масляної плівки згідно з [19] у контактї двох циліндричних тіл, що знаходяться у відносному русі в умовах рідинного тертя, може бути представлена:

$$h_m = \frac{0,125 [v(v_1 + v_2) \ln a_k]^{0,727}}{\left[P \left(\frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2} \right) \right]^{0,091} \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)^{0,364}} \quad (2.8)$$

де h_m - товщина масляної плівки в см;

v - в'язкість мастила при атмосферному тиску і робочій температурі тертьових тіл, виражена в кг. сек/см²;

$v_1 + v_2$ - алгебраїчна сума швидкостей руху поверхонь тертя відносно контактної точки в см/сек;

a_k - параметр Кісскальта;

P - навантаження, що діє по нормалі до лінії зачеплення.

Експерименти і розрахунки показують початкове зростання товщини змащувального шару при збільшенні швидкості кочення, в'язкості і п'єзоефіцієнта в'язкості масла і зменшення шару з ростом швидкості ковзання, температури, контактних напружень. У важконавантажених локальних контактах максимальна товщина мастильного шару не перевищує 4 - 6 мкм. Часто зустрічаються в контактах робочих поверхонь зубчастих передач,

підшипників кочення розміри мастильних шарів не перевищують значень 1 - 2 мкм.

Поверхня сприймає навантаження вершинами виступів нерівностей на висотах, що утворюються макрогеометричними відхиленнями. Тут розташовуються зони, з яких складається фактична площа дотику. У контакт першими вступають протилежні одна одній на спряжених поверхнях. Деформація нерівностей та їх основ викликає зближення поверхонь. У міру збільшення навантаження поверхні все більше зближуються і в контакт вступають пари виступів з меншою сумою висот. Різноманітність входження в контакт виступів, що розрізняються за висотою, диференціюють їх напружений стан і деформацію.

Коли дві тверді поверхні стикаються, то області дотику розташовуються по вершинах окремих виступів, оскільки навіть найбільш гладкі поверхні мають шорсткість атомного масштабу. У той же час на решті поверхні залишаються проміжки

$$d = 1.75 \left[W_r \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right]^{\left[\frac{1}{2} \right]}, \quad (2.9)$$

де E_1 ; і E_2 - модулі Юнга дотичних матеріалів, W_r - навантаження.

Коефіцієнт Пуассона приймається рівним 0,3 для того і іншого металу.

З формули (2.9) випливає, що середній тиск p на плямі контакту буде:

$$p = 0,42 W^{\frac{1}{3}} \left[r \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right]^{\left[\frac{2}{3} \right]}, \quad (2.10)$$

де r - радіус типового виступу нерівності.

У міру збільшення навантаження p зростає до тих пір, поки не досягне величини, що перевищує межу пружності одного з металів. З цього моменту починається пластична деформація. Далі, у міру зростання навантаження

область пластичної деформації розширюється, а середній питомий тиск зростає, поки при деякому навантаженні не досягне деякої стійкої величини. Отже, навіть при незначних навантаженнях виступи деформуються пластично, поки зростаюча площа контакту не врівноважить прикладене навантаження [10].

Внаслідок дискретного контакту в точках дотику розвиваються високі питомі тиски, що призводять до взаємного впровадження і деформації нерівностей. Зближення тіл, що знаходяться під навантаженням, яке триває до тих пір, поки сумарна площа мікроконтактів нерівностей не стане рівною фактичній площі контакту, здатній витримати прикладене навантаження. Як правило, ця площа становить не більше 10% номінальної площі тіл, що стикаються.

Параметри навантаження в зубчастому зачепленні визначаються фактичною площею плями контакту за Герцом і тиском на поверхні двох дотичних зубців, що обчислюються за формулами (2.10) і (2.9):

$$S_{\phi} = 2 \cdot (l_{\phi} + \Delta l_{\phi}) \cdot b_{\phi}, \quad (2.11)$$

де l_{ϕ} - фактична довжина лінії контакту зубів, м; b_{ϕ} - фактична напівширина смужки дотику, м; Δl_{ϕ} - збільшення фактичної довжини лінії контакту під впливом добавки, м.

$$\Delta l_{\phi} = h_{\phi} / \sin \frac{\gamma}{2}. \quad (2.12)$$

$$l_{\phi} = k_{\gamma} \frac{\Delta H}{\gamma}, \quad (2.13)$$

де k_{γ} - коефіцієнт, що враховує непаралельність осей; ΔH - зближення поверхонь у контактї, м; γ - кут перекоосу, рад.

$$k_{\gamma} = 1,57 \left(\frac{A_{\gamma}}{\Delta H} \right)^{0,4} \quad (2.14)$$

$$b_{\phi} = 1,255 \left(\frac{A_{\gamma}}{\Delta H} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot b_{н}, \quad (2.15)$$

де A_{γ} - просвіт на протилежному боці від навантаженого торця зуба (рис.2.1), $A_{\gamma} = vY$; v - ширина зуба, м.; $b_{н}$ - напівширина смужки дотику номінальна, м.

$$b_{н} = 1,128 \sqrt{\frac{P\eta\rho_{np1,2}}{l_{н}}}, \quad (2.16)$$

де $P = P_{окр} / \cos\alpha$ - зусилля, що стискає по нормалі зчіплюючі зуби, Н; α - кут зачеплення; $l_{н}$ - номінальна довжина лінії контакту, м; $\rho_{np1,2}$ - приведений радіус кривизни; $\eta = 2 \frac{1-\mu^2}{E}$, де μ і E – відповідно коефіцієнт Пуассона і модуль пружності.

$$\Delta H = \frac{3,7q}{E} \quad (2.17)$$

де q - питома контактне навантаження, Н/м.

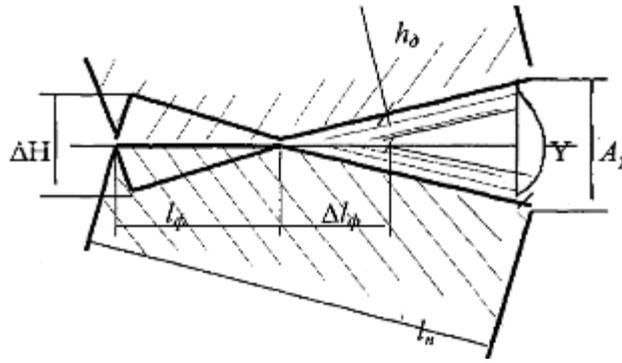


Рисунок 2.1 - Схематичне зображення реального контакту в зачепленні зубців:

l_n - номінальна довжина лінії контакту, що дорівнює ширині зуба; l_ϕ - фактична довжина лінії контакту зубців; Δl_ϕ - збільшення фактичної довжини лінії контакту під впливом добавки; ΔH - зближення поверхонь у контакті; Y - кут перекоосу в зачепленні шестерень (середнє значення для досліджуваних пар дорівнює $2,7 \cdot 10^{-3}$ рад.); A_y - просвіт на протилежному боці від навантаженого торця зуба; h_d - товщина плівки, що утворюється добавками (0-40мкм).

Найбільший фактичний тиск на контактній площадці:

$$p_{\max \phi} = 0,637 \frac{P}{b_\phi l_\phi} \quad (2.18)$$

Інтенсивність зношування матеріалів з урахуванням сорбційних процесів і хімічного модифікування $J_{h\phi x}$ у першому наближенні можна виразити рівнянням:

$$j_{h\phi x} = \kappa_{\phi x} \left(P \frac{pV\tau_0^y}{HBd_\phi} \right) \Pi_i^n L^\phi \quad (2.19)$$

де $\kappa_{\phi x}$ - кінетичний фактор, τ_0 - безрозмірний час фізико-хімічних перетворень в області контакту; $\Pi_i = \Pi_{гр. ад}$ - при граничному змащенні адсорбційної природи і $\Pi_i = \Pi_{грх}$ - при хімічному модифікуванні і утворенні захисних плівок в результаті дії присадок; L - часовий симплекс (або декілька

симплексів), виражений через відношення зазначених вище характерних факторів часу; показники ступеня ϕ , π , γ , в загальному випадку можуть бути і більшими, і меншими за нуль, проте в розрахунках можна прийняти $\phi=\pi=\gamma=1$ (як перше наближення); P – питома навантаження, $HВ$ - твердість основного металу; d_ϕ - фактичний діаметр майданчика контакту одиничної нерівності; r - межа втомного вишкрібання [10]

Різницю в контактній витривалості двох матеріалів, що мають одну твердість, слід віднести на рахунок різниці хімічних складових поверхонь цих матеріалів і визначених в рівнянні (2.19) співвідношенням:

$$C = \frac{P}{HВ} \quad (2.20)$$

Формула для визначення інтенсивності зношування за Крагельським І.В. має вигляд:

$$J = k_3 \alpha_0 \sqrt{\frac{h}{\rho_{np1,2}}} \cdot \frac{P_{\max n}}{P_{\max \phi}} \cdot \frac{1}{n} \quad (2.21)$$

де k_3 - множник, що визначається геометричною конфігурацією і розташуванням по висоті одиничних нерівностей на поверхні твердих тіл, $k_3 \approx 0,2$; α_0 - коефіцієнт перекриття контакту, $\alpha_0 \approx 1,3$; n - число циклів, що призводить до відділення обсягу деформованого матеріалу; h – впровадження мікронерівностей робочих поверхонь зубців один в одного, мм.

$$h = n \sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2}, \quad (2.22)$$

де R_{a1} і R_{a2} - середньоарифметичне відхилення шорсткості контактуючих поверхонь.

Антифрикційність зубчастої передачі багато в чому визначається коефіцієнтом тертя. Процес зовнішнього тертя відповідно до молекулярно-механічної теорії являє собою деформацію дуже тонких поверхневих шарів контактуючих тіл, що супроводжується руйнуванням адгезійних зв'язків між плівками, що покривають ці тіла, тобто коефіцієнт тертя визначається сумою двох складових - адгезійної та деформаційної [13]:

$$f = f_{адз} + f_{деф}. \quad (2.23)$$

Аналітична залежність для коефіцієнта тертя ковзання в зачепленні зубів, визначена Дроздовим Ю.Н.:

$$f = 0.021g \frac{P \cdot HB}{v_{ск} v_{ск} \rho_{np} E_{np}} + 0,14, \quad (2.24)$$

де HB - твердість менш твердого матеріалу, кгс/см ; $v_{ск}$ - в'язкість масла, сСт; $v_{ск}$ - швидкість ковзання, м/с.

Діапазони значень параметрів, що змінюються добавками в олії, з врахуванням збільшення $l_{ф}$, за рахунок утворення на поверхнях, що труться, плівки товщиною ≤ 40 мкм, наведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1 - Зміна параметрів зчеплення під дією добавок

Параметри	З добавками*	Без добавок*
Впровадження мікронерівностей одна в одну h_d , мкм	-	0...40
Площа контакту, $S_{ф}$	2,79...8,08	3,21...8,66
Найбільший тиск у контакті, p_{max}	1436,47...5346,00	443,05...1149,47
Коефіцієнт тертя f	0,117...0,133	0,092...0,108**

* - значення табличних даних справедливі для евольвентних зачеплень з наступними номінальними розмірами геометричних елементів і якісними показниками: кут зачеплення - $\alpha_i=20^\circ$; модуль зубців $m=6...8$; наведений радіус

кривизни зубів шестерні і колеса в полюсі зачеплення $\rho_{\text{пр}}=22\dots40$ мм.; ширина зуба $b\leq 45$ мм; радіус основного кола – $r_0\leq 124$ мм; навантаження по нормах на зуб - $P\leq 21600$ Н.

** - у розрахунку враховується зміна твердості поверхні в контактній зоні за рахунок плівки, що утворюється добавкою.

З урахуванням вищевикладеного можна зробити наступні висновки:

1. Протизносостійкість, як здатність робочих профілів зубчастих зачеплень протистояти процесу зношування, може бути підвищена за допомогою добавок, здатних створювати на металі плівки значної товщини, що збільшують пластичність поверхневих шарів пари тертя, а також змінюють геометричні параметри самого зачеплення ($S_{\text{ф}}$, b).

2. Антифрикційність зубчастої передачі залежить від величини коефіцієнта тертя f , який у свою чергу прагне до мінімальних значень при зменшенні мікротвердості поверхневих і приповерхневих шарів металу та зміні геометрії зачеплення.

3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Вибір факторів, чисельних характеристик цілей дослідження та їх обґрунтування

Методика експериментальних досліджень включає в себе послідовно:

- збір та аналіз інформації про характер і умови роботи зубчастих зачеплень силових передач;
- вивчення методів підвищення довговічності зубчастих пар;
- теоретичні передумови до використання добавок;
- створення методики лабораторних випробувань, спрямованої на вивчення поведінки обраних препаратів, групування їх за принципом впливу на трибосистеми стосовно зубів шестерень;
- розробка, з урахуванням попереднього пункту, методики стендових випробувань реальних об'єктів;
- систематизація отриманої в ході експерименту інформації, що визначає конкретні рекомендації застосування добавок в агрегатах трансмісії;
- визначення техноекономічної ефективності використання добавок.

Зміни властивостей поверхневих шарів у процесі тертя викликаються дією факторів, що залежать від вихідного стану цих шарів і умов експлуатації.

До факторів експлуатації, що впливають на формування робочого стану поверхневих шарів, відносяться зовнішні механічні впливи - (швидкість переміщення і навантаження), а також середовище, температурний режим в зоні контакту [15].

Скористаємося наступними незалежними, керованими факторами, що відповідають впливам на трибосистему і впливають на інтенсивність зношування:

- навантаження;
- швидкість ковзання;
- кількість абразиву;
- добавки, що вводяться в мастильне середовище.

Довговічність зубчастого зачеплення залежить від інтенсивності абразивного зносу, що змінює з плином часу первісну форму контактних поверхонь. Основне джерело абразиву і відповідно зносу - ґрунтовий пил, до складу якого входять частинки кварцу [10].

Концентрація абразиву, що додається в мастильну ванну, залежить від умов роботи реальних вузлів, досягає 3% [21].

При проведенні дослідів, метою яких є виявлення закономірності зміни абразивного зносу від введеної в масло присадки, абразив додається в масляну ванну.

Прослизання зубів стримує вишкрябання – пошкоджений точковим висипом поверхневий шар в процесі зносу поступово видаляється. Великі швидкості ковзання, малі навантаження сприяють появі гідродинамічного ефекту [39].

Радіальне навантаження в місці контакту зразків - P , задається з урахуванням питомих тисків в полюсі зачеплення - 1500Мпа і допустимих напружень для матеріалу на майданчику контакту, що працює в умовах всебічного стиснення, розраховується за формулою для циліндричних зчленувань:

$$P = 2.77 \frac{ld}{E} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right)^2, \quad (3.1)$$

де $d=0,038$ м - діаметр меншого циліндра; $l=0,003$ м - довжина лінії контакту; $\sigma_0=1,41$ - безрозмірна величина, що залежить від розміру циліндрів та дорівнює відношенню діаметрів; $\sigma_{\max}=1750$ МПа - допустимі напруження, з урахуванням ударних навантажень, марки сталі зразків, виду термообробки; $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа - модуль пружності для сталі.

У більшості машин зусилля передаються від однієї деталі до іншої через великі опорні площі, але, крім того, нерідко зустрічаються зосереджені лінійні або точкові контакти. Типовими прикладами останніх є зубчасті передачі і

підшипники кочення, і вони, можливо, відносяться до найбільш частих застосувань пружно-гідродинамічних явищ між металевими поверхнями.

Поверхневі шари металу знаходяться під повторно-змінними навантаженнями, що викликають деформацію металу. Пластична деформація локальних обсягів поверхневих шарів металу сприяє його зміцненню [8].

Дійсно, якщо тиск в масляному шарі досягає величини, співмірної з розрахунковим навантаженням, то пружна деформація поверхонь зубців може виявитися досить відчутною і фактичні радіуси кривизни зубців набагато перевищать розрахункові, що призведе до значного зниження тиску в контакті зубців - це багато в чому і пояснює збільшення верхньої межі навантажень, що в 2 рази перевищує розрахункові [9].

Трибохімічні та трибофізичні зміни, зумовлені введенням добавки в трибосистему, фіксуються наступними оціночними параметрами (чисельними характеристиками цілей дослідження):

- знос;
- об'ємна температура мастильного середовища;
- момент тертя.

Об'ємна температура масла і шестерень залежить від величини втрат потужності на тертя в зубчастій передачі, характеризує фізичний стан трибосполучення і зміну інтенсивності зношування [14].

Профілограма дозволяє отримати графічний запис рельєфу зношеної поверхні, що дає можливість судити про розподіл по ній зносу [20, 21].

Момент тертя кочення в змащованому з'єднанні визначає характер фрикційної взаємодії між металами, що труться, і його величина прямо пропорційна силі тертя.

Добавки в масло обрані на основі аналізу інформації про хімічний склад, присутній на ринку автохімії, виходячи з можливості апробації всього спектру препаратів, що відрізняються принципом дії (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Добавки до масла

№	Найменування	Фірма-виробник	Концентрація добавки в маслі, %	Вартість на 1 літр масла, грн
1	H.P.L.S.	Winn's	5,0-7,0	26,0
2	STP	Danbury, США	10,0	33,0
3	RFG (REDEX)	Holt-Lloid, Великобританія	2,0	87
4	Lubriform B2	ACTEX, Швейцарія	9,0	180
5	Liqui-Moly M0S2-Leichtlauf	Liqui-Moly, GmbH, Німеччина	3,0	117
6	Micro X2	США	5,0	120
	ER	Entech Co., США	2,8	250
	Bardahl Full Metal	Bardahl, Франція/Бельгія	8	200
	XADO EX120	XADO Chemical Group (Україна-ЄС)	0,18	380

Масильне середовище для випробувань - масло ТАП-15В, обрано з урахуванням рекомендацій для вітчизняної техніки, а саме тракторів виробництва ХТЗ (табл.3.2).

Таблиця 3.2 - Трансмісійні масла, рекомендовані для тракторів

Марка трактора	Масла, що застосовуються в коробці	Масла, що застосовуються в трансмісії/мості	Строк заміни масла, год
Т-150 / Т-150К, ХТЗ – 17021, ХТЗ-1721, ХТЗ-242, ХТЗ-243	ТСп-10, ТСп-15К, ТАД-17И	ТСп-10, ТАД-17И, ТАП-15 «Леол»	960

К-700, К-701, ХТА-300 «Слобожанець», ХТА-200	ТСП-10, ТСП-15К, ТАП-15В	ТАД-17И, ТСП-15К	сезонно
МТЗ-80/82, ПМЗ, Т-40	ТАД-17И, М-10Г2к, трансмісійне ТСП-15К, ТАП-15В	ТАД-17И, SAE 80W-90 GL-4, ТАП-15В	960
John Deere (серії 6М/6R)	John Deere Hy-Gard J20C/J20D	John Deere Hy-Gard J20C	1200
Case IH (серії Маххум / Puma)	Case Hy-Tran Ultra / Hy-Tran Premium	Hy-Tran Ultra / SAE 80W-90 (для мостів)	1200

Оскільки момент тертя і величина зносу за рівнем значущості виділяються з вихідних параметрів і оцінюються кількісно, а мета дослідження - виявити оптимальну добавку, то, отже, саме їх необхідно прийняти за критерії оптимізації. Інакше кажучи, знос, як і момент тертя, є функцією вхідних параметрів.

Побудові плану експерименту передують етап неформалізованих рішень, спрямованих на вибір локальної області факторного простору. Межі областей визначення факторів задані техніко-економічними міркуваннями (вартість добавок, обмеженість за часом), конкретними умовами проведення експерименту (існуюча апаратура, методика).

3.2. Методика лабораторних випробувань з виявлення та оцінки впливу добавок на протизношувальність і антифрикційність зубчастих передач

Методика лабораторних випробувань складається з двох частин.

У першій вирішується завдання визначення найкращих за своїми властивостями, і що представляють відповідно, найбільший інтерес для поглибленого аналізу добавок. З цією метою реалізується експеримент, в якому

змінний фактор - швидкість ковзання варіюється на трьох рівнях: 0,2, 0,3, 0,4 м/с. Вид експерименту багато в чому обумовлений необхідністю з'ясувати, в якій мірі змінюється характер взаємодії добавок з поверхнями тертя при зростанні відносного ковзання. Величина сили, що діє на стикнення, дорівнює $4 \cdot 10^4$ Н, згідно з розрахунковою ($2,3 \cdot 10^4$ Н) за і збільшеною в 2 рази, з урахуванням пружних деформацій у плямі контакту. Через викликану необхідністю виключити вплив прогресуючого пітінгу на оціночні параметри число циклів навантаження, спираючись на методику описану Трубіним, в ході попередніх дослідів взято рівним $3 \cdot 10^5$. Інакше кажучи, підібрані конкретні значення навантаження і часу досвіду виходячи з необхідності отримання на третьових поверхнях зносу за мінімальне число циклів навантаження при відсутності прогресуючого викрашування. Спираючись на інформацію фірм-виробників про свій продукт, перед початком досліджень було проведено умовний поділ добавок на дві групи:

- експлуатаційні;
- ремонтно-відновлювальні.

У другій частині випробувань конкретизується концепція використання обраних добавок. В якості плану експерименту спочатку був використаний ротабельний центральний композиційний план, який дозволив отримати наближені математичні моделі впливу факторів на вихідні параметри і добре оцінити коефіцієнти регресії полінома. Загальна кількість дослідів при трьох факторах - 18. Необхідне число повторень при довірчій ймовірності 0,95 дорівнює 3.

3.2.1. Виявлення добавок з кращими протизносними та антифрикційними характеристиками

Для виявлення характеристик присадок використовуємо установку (рис. 3.1) [22, 23]. Установка, призначена для дослідження триботехнічних характеристик мастильних матеріалів та присадок шляхом моделювання процесів тертя ковзання в умовах, наближених до роботи реальних вузлів

силових передач тракторів. Конструкція стенда забезпечує регульоване навантаження контактної пари, стабілізацію швидкості ковзання, контроль температури та вимірювання моменту тертя.

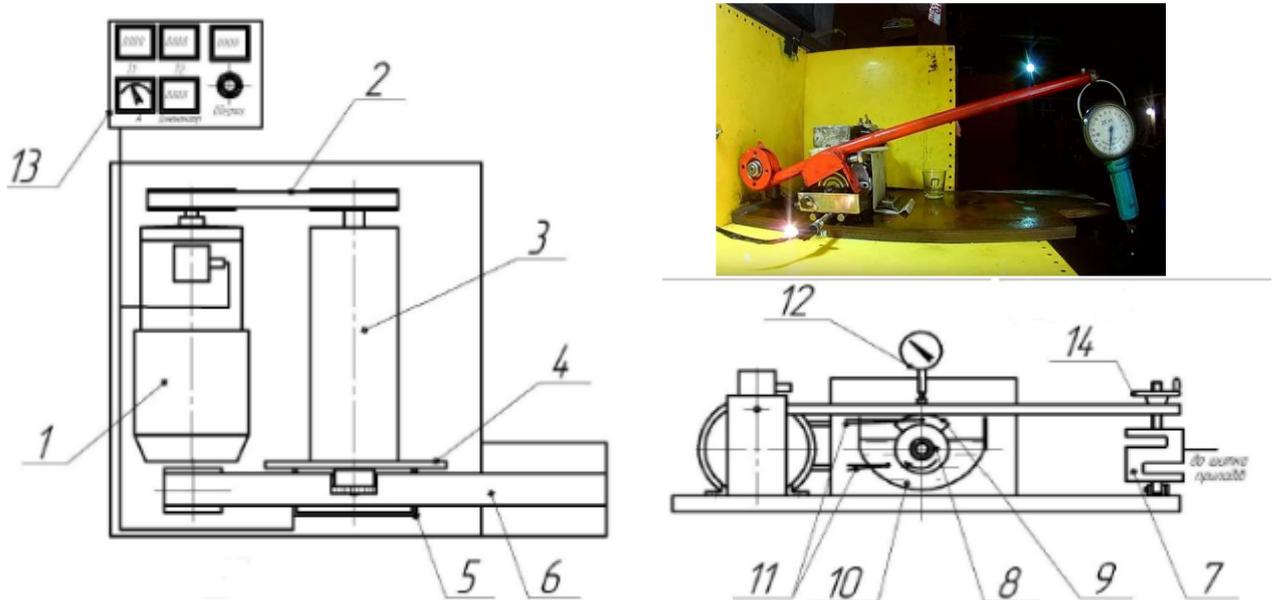


Рисунок 3.1 - Установка для трибологічних випробувань

1 – електродвигун, 2 – пасова передача, 3 – підшипниковий блок, 4 – плита, 5 – чаша, 6 – навантажувальний важіль, 7 – динамометр, 8 – дисковий контр зразок, 9 – зразок, 10 – рідина, 11 – датчики температури, 12 – індикатор годинникового типу, 13 – вимірювальний блок, 14 – маховик.

Корпус установки закритого типу дозволяє проводити випробування у безпечних умовах та з мінімальним впливом зовнішнього середовища.

Принцип дії установки. У чашу (5) заливається базова трансмісійна олива. У залежності від серії дослідів у неї вводиться потрібна кількість присадки. Дисковий контрзразок (8) і зразок (9) встановлюють у підшипниковому блоці так, щоб забезпечити їх взаємодію в зоні контакту.

Температуру початкової оливи вимірюють датчиком (11). Швидкість ковзання задається частотою обертання двигуна та передавальним числом пасової передачі.

Робочий режим. Після запуску електродвигуна (1) через пасову передачу (2) обертання передається на вал зі зразком (9). Контрзразок притискається до робочої поверхні за допомогою навантажувального важеля (6). Величина

навантаження відповідає питомим тискам у полюсі зачеплення зубчастої передачі (до 1500–1750 МПа).

В процесі роботи у зоні тертя реалізується ковзання або кочення з ковзанням, характерне для контактної взаємодії зубців шестерень.

Реєстрація параметрів. У ході випробування фіксуються такі параметри:

- момент тертя, що знімається динамометром (7);
- температура оливи та її підвищення внаслідок втрат на тертя;
- показники навантаження і деформації (за допомогою індикатора 12);
- швидкість ковзання (через частоту обертання двигуна);
- ступінь зношування поверхонь після закінчення досліду.

Отримані залежності дозволяють визначити:

- ефективність присадки щодо зменшення моменту тертя;
- її вплив на товщину мастильної плівки;
- інтенсивність зношування при різних швидкостях і навантаженнях;
- стабільність граничних шарів (граничне тертя).

Проведення досліджень. Проводиться серія контрольних випробувань у чистій трансмісійній оливі (ТМ-3-18). Далі проводяться досліди з додаванням присадок (Bardahl, Liqui Moly, XADO та ін.). Для кожного мастильного середовища задаються три швидкості ковзання: 0,2; 0,3 та 0,4 м/с. При кожній швидкості фіксуються:

- початковий момент тертя;
- встановлений момент тертя;
- температура оливи;
- поверхневий знос зразка (мікропрофілометрія).

Результати зводяться у таблиці (як ті, що ти вже робив), проводиться аналіз ефективності присадок.

Узагальнення роботи установки. Установка забезпечує відтворення реальних умов роботи зубчастих передач тракторів: високі питомі навантаження, стабільна швидкість ковзання, наявність мастильного середовища, тертя в умовах змішаної та граничної змазки.

Це дозволяє:

- оцінити антифрикційні та протизносні властивості присадок,
- визначити оптимальні концентрації,
- прогнозувати вплив присадок на довговічність реальних зубчастих пар.

Зразки для випробувань, геометричні розміри яких представлені на рис.3.2, виготовлені зі сталі 18 ХГТ, що використовується для виробництва шестерень силових передач більшості тракторів. Термічна обробка зразків проводилася за технологією підприємства-виробника серійних шестерень; цементация на глибину до 1,5 мм, твердість за НКС 60-62.

Для виключення помилок у серіях дослідів всі зразки мають однакові параметри шорсткості. Шліфуванням на верстаті досягаємо таких параметрів мікрорельєфу поверхні: чистота С7-С8, шорсткість поверхні по $Ra=0,4-1,25$ по $Rz=2-6,3$ [15]. Остаточне шліфування здійснювалося із забезпеченням відповідності розмірів і напрямку мікронерівностей поверхні зразків реальній мікрогеометрії поверхонь зубців шестерень.

Під нижній зразок встановлюється ванна ємністю 50 мл з 5 мл масла, таким чином, щоб він був занурений в масло не менше ніж на одну третину діаметра.

В ході експерименту проводиться постійна реєстрація температури, моменту. Об'ємна температура масла вимірюється хромель-капелева термопарою з реєстрацією потенціометром КСП-4, тарованим в діапазоні температур від 0 до 100 град, за Цельсієм.

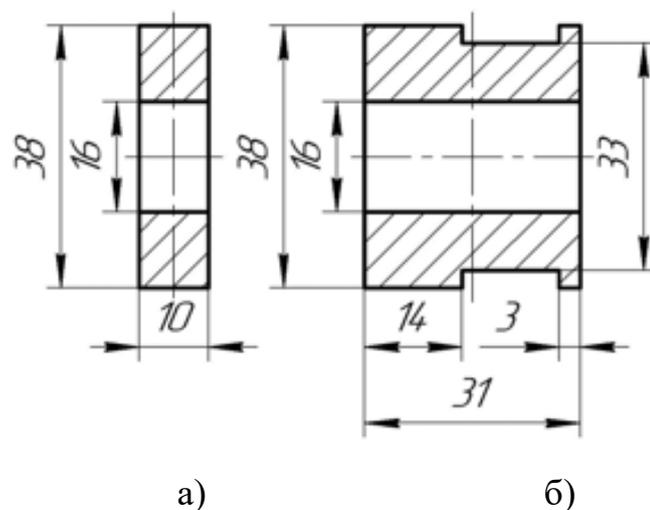


Рисунок 3.2 - Зразки для випробувань: а - верхній; б – нижній

Перед зупинкою машини навантаження плавно знижується до нуля, під час подальшого запуску в роботу - плавно виводиться до заданих значень.

Потім зразки знімаються, промиваються від продуктів зносу, мастила і проводиться профілографування.

Профілографування здійснюється приладом моделі 201 з точністю до 1 мкм з чотирикратною повторюваністю (через кожні 90°), причому за базу для зняття профілограми приймається незношена поверхня нижнього зразка.

Всі дані дослідів заносяться в журнал випробувань.

3.2.2.Методика оцінки впливу добавок при дії декількох змінних факторів

Зразки для випробувань виготовлені зі сталі 40Х. Геометричні розміри, механічна обробка відповідно до п.3.1. Термічна обробка - об'ємне гартування. Твердість роликів 52-56 НКС.

Концентрація абразиву, швидкість прослизання, навантаження - задаються відповідно до розрахункових табличних значень (табл. 3.3, табл. 3.4), обумовлених планом експерименту.

Час проведення експерименту для кожної взаємодії факторів 2 години, обумовлено приблизними дослідями, в яких при роботі на чистому маслі поверхні тертя досягають неприпустимого для їх нормальної роботи ступеня руйнування на режимі максимального навантаження. Тому час проведення одного досвіду обрано дещо меншим, ніж число циклів контактних напружень, при якому відбувається зминання.

В якості абразиву застосовується пил з питомою поверхнею $10500 \pm 150 \text{ см}^2/\text{г}$.

З метою оптимізації добавок, що вводяться в мастильне середовище, а також умов при їх введенні був реалізований повнофакторний експеримент, в рамках якого використовувався статистичний метод із застосуванням плану регресійного аналізу, що дозволяє за допомогою полінома другого порядку (26) отримати конкретні значення функцій відгуків; 1-лінійного зносу поверхонь зразка, Т-температури масла в місці контакту тертьових пар, М-моменту тертя:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i^2, \quad (3.2)$$

де \hat{y} - розрахункове значення функції відгуку;

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} - теоретичні коефіцієнти регресії;

x_i, x_j - незалежні змінні фактори.

Мета експерименту - знаходження чисельних значень рівняння регресії (3.2), а для визначення оптимальних умов (екстремумів функції) – значення факторів X_1, X_2, \dots, X_k .

План експерименту включає в себе п'ять рівнів: нульовий, верхній, нижній, два крайніх - зіркові точки. Зіркове плече рівне 1,68 визначає інтервал варіювання від нульового рівня до зіркових точок.

Рівні факторів у кодових і натуральних значеннях представлені в табл.3.3.

Для отримання математичної моделі впливу факторів на параметри оптимізації: I, M, T складена матриця планування експерименту (табл. 3.4). Порядок проведення дослідів випадковий, мета рандомізації - усунення систематичної помилки, викликаной впливом неврахованих факторів.

Таблиця 3.2 - Рівні варіації факторів

Рівні факторів	Кодові позначення			Натуральні позначення		
	X1	X2	X3	Сила, що діє в контакті, кН	Відсотковий вміст абразиву, %	Швидкість ковзання Vск, м/с
Основний рівень	0	0	0	34	1,7	0,3
Інтервал варіації	1	1	1	6	0,8	0,1
Верхній рівень	+1	+1	+1	40	2,5	0,4
Нижній рівень	-1	-1	-1	28	0,9	0,2
Зіркова точка -	-1,68	-1,68	-1,68	24	0,4	0,13
Зіркова точка +	+1,68	+1,68	+1,68	44	3,0	0,47
Зіркове плече	1,68	1,68	1,68	10	1,3	0,17

Таблиця 3.4 – Матриця планування експерименту

Порядок відображення			Значення факторів					
1-ої повт рю ванос ті	2-ої повт рю ванос ті	3-ої повт рю ванос сті	Кодові			Натуральні		
			X1	X2	X3	Сила, що діє в контак ті, кН	Відсотк овий вміст абразив у, %	Швидкіст ь ковзання V _{ск} , м/с
15	11	16	-1	-1	-1	28	0,9	0,2
13	8	12	+1	-1	-1	40	0,9	0,2
10	12	8	-1	+1	-1	28	2,5	0,4
5	18	10	+1	+1	-1	40	2,5	0,2
6	16	4	-1	-1	+1	28	0,9	0,4
1	6	2	+1	-1	+1	40	0,9	0,4
17	9	13	-1	+1	+1	28	2,5	0,4
14	7	14	+1	+1	+1	40	2,5	0,4
7	3	5	-1,68	0	0	24	1,7	0,3
3	5	3	+1,68	0	0	44	1,7	0,3
18	15	1	0	-1,68	0	34	0,4	0,3
12	14	17	0	+1,68	0	34	3,0	0,3
9	10	7	0	0	-1,68	34	1,7	0,47
16	4	9	0	0	+1,68	34	1,7	0,3
11	2	11	0	0	0	34	1,7	0,3
8	13	15	0	0	0	34	1,7	0,3
2	1	6	0	0	0	34	1,7	0,3
4	17	18	0	0	0	34	1,7	0,3

Необхідність і передумови переходу від полінома другого ступеня до лінійного в описі процесів, що відбуваються. Завдання множинного регресійного аналізу полягає в побудові такого рівняння площини в $(p+1)$ -вимірному просторі, відхилення результатів спостережень y_i від якої були б мінімальними. Або, іншими словами, слід обчислити значення коефіцієнтів b_0, b_j в лінійному поліномі:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_j x_j, \quad (3.3)$$

що рівнозначно мінімізації виразу

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + b_3 x_{i3} + \dots + b_j x_{ij} + \dots + b_p x_{ip})]^2 \quad (3.4)$$

де \hat{y}_i -обчислювані, передбачувані, вирівняні значення досліджуваної характеристики.

Для знаходження мінімуму виразу (3.3) необхідно знайти часткові похідні за всіма невідомими $b_0, b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_p$ і прирівняти їх до нуля.

Кожен коефіцієнт рівняння регресії можна знайти за формулою:

$$b_j = \sum_{i=0}^n c_{ij} \sum_{i=1}^n x_{ij} y_i, \quad (3.5)$$

де c_{ij} - елементи зворотної матриці.

В результаті проведення всіх цих операцій отримуємо поліном першого ступеня (3.3) з відомими коефіцієнтами b_0, b_j . Цей поліном є апроксимацією функції $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_j, \dots, x_p)$, вид якої невідомий.

Статистично незначущі коефіцієнти з моделей у розрахунках не були виключені, з огляду на можливу неадекватність моделей.

Перевірка значущості множинного рівняння регресії складається з обчислення залишкової дисперсії за формулою:

$$\bar{S}_{\square}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p - 1}, \quad (3.6)$$

де n - загальна кількість дослідів; p - кількість незалежних факторів; y_i - середнє значення параметрів оптимізації за паралельними дослідями; \hat{y}_i - розрахункові значення параметрів оптимізації для кожного з дослідів.

Перевірка на адекватність проводилася за допомогою критерію Фішера \hat{F} за формулою:

$$\hat{F} = \frac{\bar{S}_y^2}{S_{n-p}^2}, \quad (3.7)$$

де \bar{S}^2 - залишкова дисперсія, що визначається за формулою 3.6;

\bar{S}_y^2 - дисперсія середнього, що визначається за формулою 3.8.

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i^2, \quad (3.8)$$

де S_i^2 - дисперсія кожного досвіду.

Вважається, що рівняння 3.3 передбачає результати дослідів краще, ніж середнє, якщо \hat{F} досягає або перевищує межу значущості.

Значущість коефіцієнтів регресії b_0 , b_j перевіряється за критерієм Стьюдента:

$$t = \frac{b_j}{S_{bj}}, \quad (3.9)$$

де \bar{S}_{bj} , - похибка коефіцієнтів регресії:

$$S_{bj} = \sqrt{S^2 - c_{ij}} \quad (3.10)$$

де c_{jj} - діагональний елемент матриці, оберненої матриці нормальних рівнянь. Обчислене значення \hat{t} порівнюють з табличним при числі ступенів свободи $\nu = n - p - 1$.

Обчислення парних коефіцієнтів кореляції, що характеризують тісноту зв'язку між двома величинами: функцією відгуку y одним з факторів x_j . Для вивчення тісноти зв'язку між функцією відгуку y і декількома факторами $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_p$ використовується коефіцієнт множинної кореляції R .

Коефіцієнт множинної кореляції служить і для оцінки якості прогнозування, чим більше R , тим краща якість прогнозів даною моделлю дослідних даних.

R можна знайти за формулою:

$$R = \sqrt{\frac{1 - S^2}{S_y^2}}, \quad (3.11)$$

або обчислити величину:

$$R^0 = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.12)$$

пов'язану з R співвідношенням:

$$R = \sqrt{1 - \frac{n-1}{n-p-1} [1 - (R^0)^2]}, \quad (3.13)$$

Значимість коефіцієнта множинної кореляції перевіряється за t - критерієм Стьюдента:

$$\hat{t}_R = \frac{R}{S_R} \geq t_{(n-p-1)}^T, \quad (3.14)$$

де \bar{S}_R - середньоквадратична похибка коефіцієнта множинної кореляції:

$$\bar{S}_R = \frac{(1-R^2)}{\sqrt{n-p-1}}, \quad (3.15)$$

значимість R перевіряється також і за F-критерієм Фішера:

$$\hat{F}_R = \frac{R^2(n-p-1)}{(1-R^2)p}. \quad (3.16)$$

Отримане значення \hat{F}_R порівнюється з табличним F^T при обраному рівні значущості і числах ступенів свободи $\nu_1 = n - p - 1$ і $\nu_2 = p$. Якщо розрахункове значення \hat{F}_R перевищує табличне, то гіпотеза про рівність коефіцієнта множинної кореляції нулю відкидається і зв'язок вважається статистично значущим.

3.3. Методика обробки експериментальних даних

Обробка експериментальних даних проводилася відповідно до застосовуваних методик з використанням ПЕОМ, за допомогою програми STATISTICA 5.0.

В ході математичної обробки даних багатофакторного експерименту модель виду (3.1) виявилася не значущою, з цієї причини було прийнято рішення перейти від квадратичного до лінійного полінома (3.2), крім того, математичне значення фактора, піднесене до квадрата, як виявилось в нашому випадку, не дає справжнього уявлення про спрямованість його впливу на функцію відгуку.

Обробка результатів багатофакторного експерименту проводилася на основі методів математичної статистики. Методика лінійного множинного регресійного та кореляційного аналізу представлена в п. 4.2.

3.4 Порівняльні випробування впливу добавок на здатність контактуючих поверхонь зубів протистояти процесам тертя і зношування

На підставі теоретичного аналізу п.2. та супровідної інформації фірм-виробників про властивості добавок всі препарати були віднесені до двох груп:

- ремонтно-відновлювальна;
- експлуатаційна.

Відповідно до методики, описаної в п.3.2. порівняльні випробування добавок проводилися за схемою однофакторного експерименту. У ролі змінного кількісного фактора використана варіювана на трьох рівнях швидкість ковзання, а якісного - мастильне середовище (ТМ-3-18), що змінюється добавками (табл.3.1).

Параметри навантаження, тривалість дослідів, вимірювання відповідно до п.3.2.

Критеріями відбору добавок за результатами порівняльних випробувань для подальших досліджень обрано:

- мінімальний лінійний знос роликів;
- стабільність моменту тертя, температури, їх мінімальні значення при зростанні швидкості ковзання роликів.

Отримані дані зведені в табл. 3.5 – 3.6, за значеннями якої побудовані залежності температури мастильного середовища, зносу роликів і моменту тертя в сполученні від швидкості ковзання при використанні мастил різного складу (рис.3.3, 3.4 та 3.5).

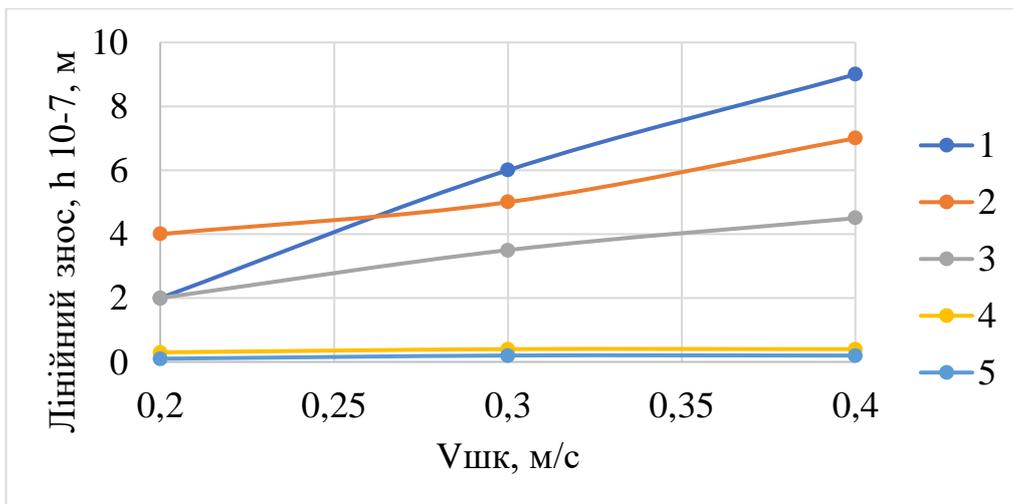
Таблиця 3.5 - Значення величин вихідних параметрів при впливі на сполучення ремонтно-відновлювальних добавок

Масильне середовище	Швидкість проковзування зразків, м/с	Початкова температура оливи, °С	Початковий момент тертя в парі, *	Температура оливи встановлена, °С	Установлений момент тертя, *
ТАП-15 ТМ-3-18	0,2	20	15	41	16
	0,3	22	21	42	16,5
	0,4	20	30	66	23,5
XADO EX120	0,2	32	17	47,9	16
	0,3	15	19	50	16
	0,4	20	27	76	20,2
ER	0,2	18	22	43	16
	0,3	36	22	47	18
	0,4	32	24,5	61,5	20,5
Bardahl Full Metal	0,2	37	18	46	16,5
	0,3	24	23	55	20,5
	0,4	35	30	50	25
Lubrifiilm	0,2	18	20,5	43,8	14
	0,3	20	23	51,5	17
	0,4	34	30	63	26

Таблиця 3.6 – Значення величин лінійного зносу зразків і відносно моменту тертя при зміні швидкості проскользування для мастил з ремонтно-відновлюючими добавками

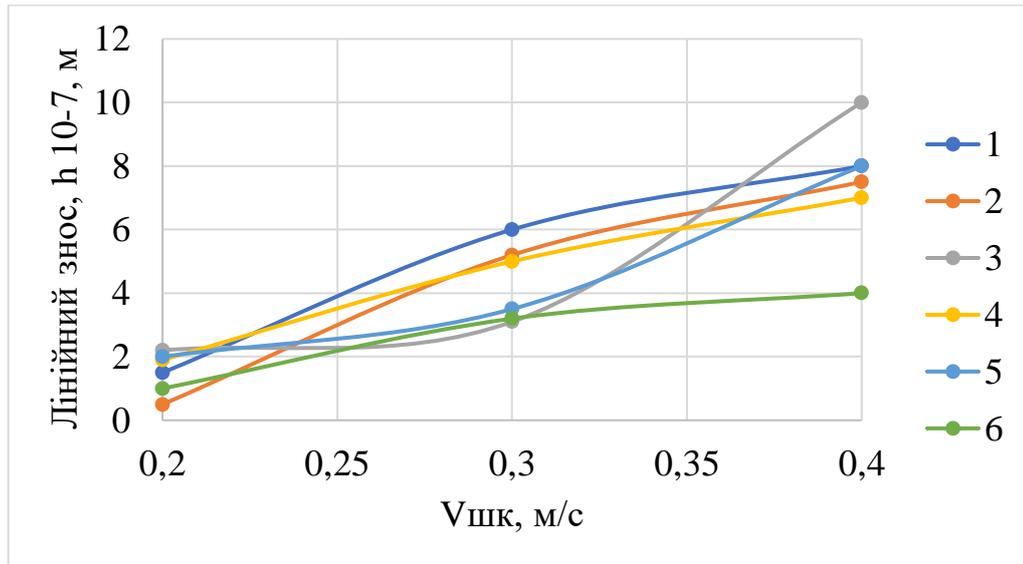
№	Масильне середовище	Швидкість проковзування зразків, м/с	Поверхневий знос зразка *10 ⁻⁷ , м	Відносний момент тертя
1	Bardahl Full Metal	0,2	1,8	1,03
		0,3	6	1,24
		0,4	9	1,06

2	Масло ТАП-15 (TM-3-18)	0,2	4	1
		0,3	5	1
		0,4	7,5	1
3	Lubriform	0,2	2,1	0,88
		0,3	3,5	1,03
		0,4	4,5	1,11
4	XADO EX120	0,2	0,2	1
		0,3	0,3	0,97
		0,4	0,6	0,86
5	ER	0,2	0,1	1
		0,3	0,2	1,09
		0,4	0,5	0,87



а

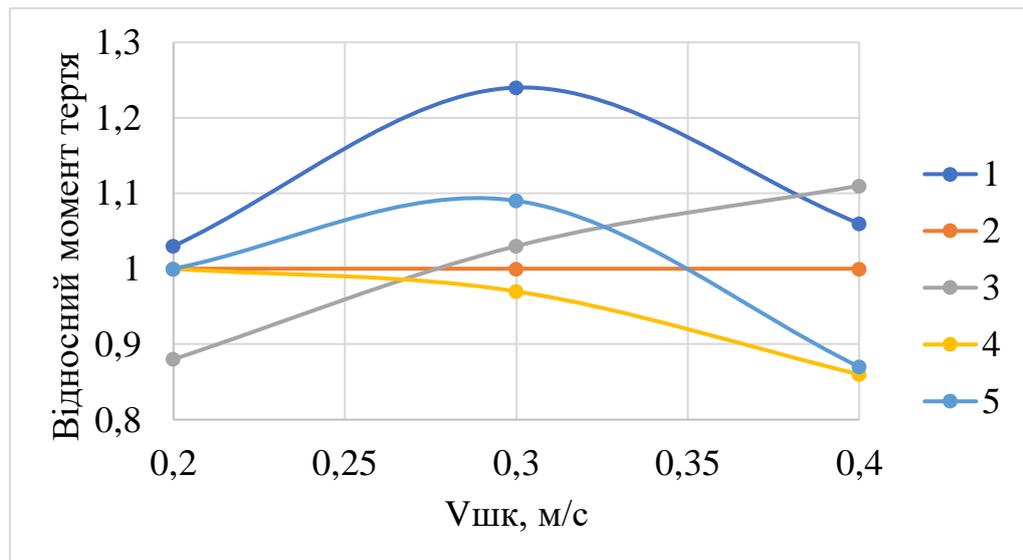
1 - Bardahl Full Metal, 2 - Масло ТАП-15(TM-3-18), 3 - Lubriform,
4 - XADO EX120, 5 - ER



б

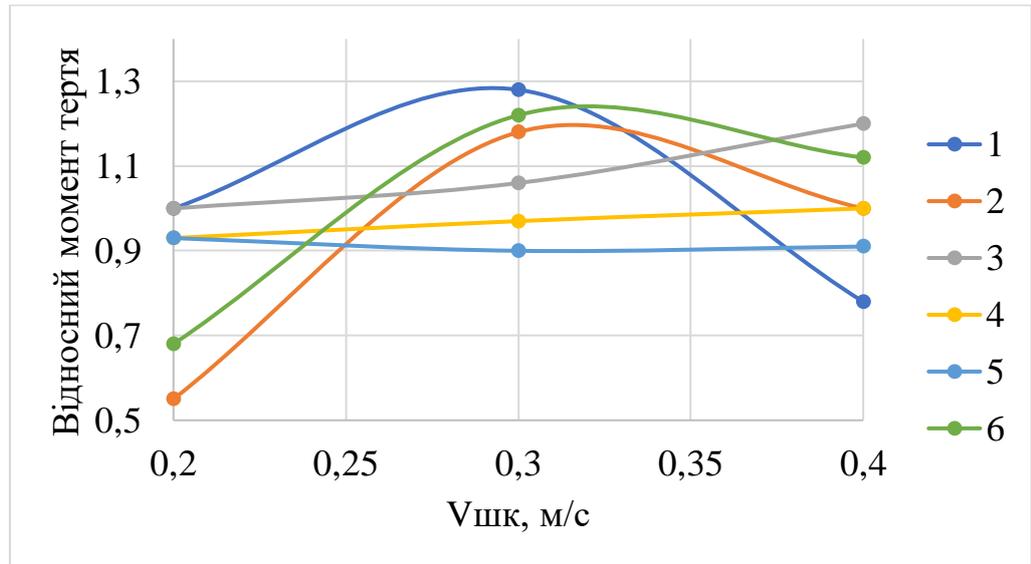
1 - Roil, 2 - SCT - MANNOL Molibden Additive, 3 - Redex, 4 - Liqui-Moly, 5 - Power Tec 100, 6 - Micro X2

Рисунок 3.3 - Залежність лінійного зносу від швидкості ковзання зразків при використанні добавок в масло: а) ремонтно-відновлювальні; б) експлуатаційні



а

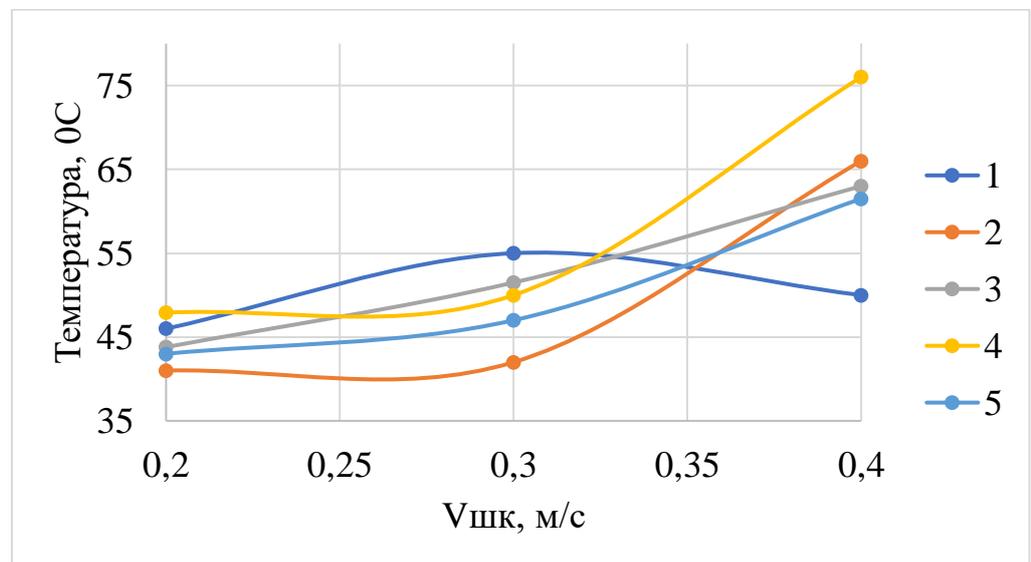
1 - Bardahl Full Metal, 2 - Масло ТАП-15(ТМ-3-18), 3 - Lubriform, 4 - XADO EX120, 5 - ER



б

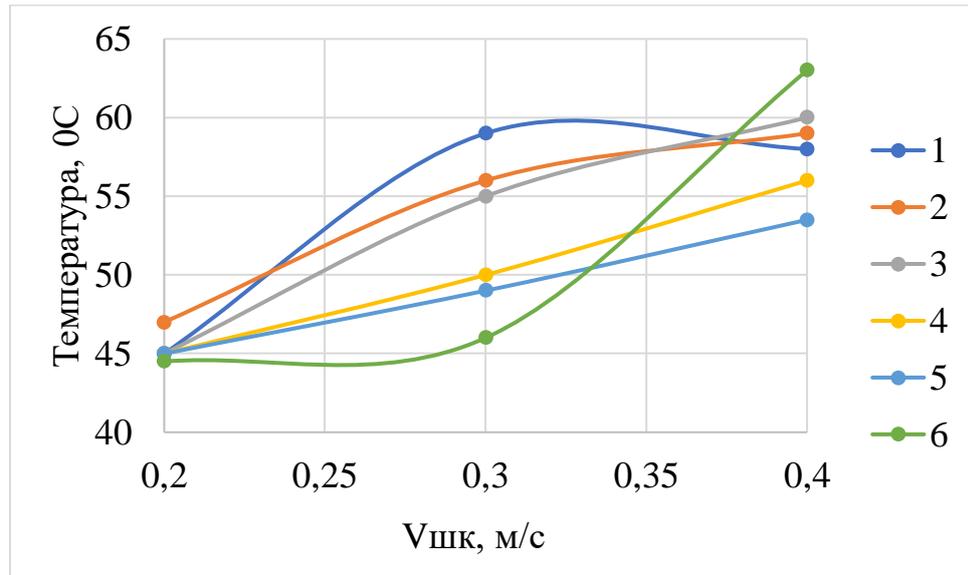
1 - Roil, 2 - SCT - MANNOL Molibden Additive, 3 - Redex, 4 - Liqui-Moly, 5 - Power Tec 100, 6 - Micro X2

Рисунок 3.4 - Зміни відносного моменту тертя від швидкості ковзання зразків при введенні добавок в масло: а) ремонтно-відновлювальні б) експлуатаційні



а

1 - Bardahl Full Metal, 2 - Масло ТАП-15(ТМ-3-18), 3 - Lubrifilm, 4 - XADO EX120, 5 - ER



б

1 - Roil, 2 - SCT - MANNOL Molibden Additive, 3 - Redex, 4 - Liqui-Moly, 5 - Power Tec 100, 6 - Micro X2

Рисунок 3.5 - Залежність температури мастильного середовища від швидкості прослизання роликів при введенні добавок: а) ремонтно- відновлювальні б) експлуатаційні

Численні експериментальні та виробничі дані показують, що одному і тому ж нормальному навантаженню можуть відповідати різні значення сил тертя залежно від швидкості відносного переміщення, температури та середовища [21]. Це положення підтверджують представлені нижче залежності.

Числова характеристика осі ординат рис.3.2 виражена в одиницях відносно моменту тертя зразків при випробуваннях на чистому маслі.

Аналізуючи графіки, зображені на рис.3.3 – 3.5, стає зрозумілим наступне: добавки віднесені до групи ремонтно-відновлювальних значно стримують процес зношування поверхонь з підвищенням швидкості прослизання. Експлуатаційні добавки гальмують знос при швидкостях ковзання, близьких до нульових, але з ростом останніх інтенсифікують зношування, це видно на прикладі добавки Redex.

Однакові за принципом дії та схожі за хімічним складом добавки Lubrifilm і Bardahl Full Metal з підвищенням швидкості ковзання поведуться по-різному: для Lubrifilma характерне зростання моменту тертя, температури і відносно

незначне збільшення зносу; навпаки, при використанні Bardahl Full Metal при досягненні швидкості позначки 0,3м/с виявився вищим, ніж на чистому маслі.

Точка перегину на всіх графіках в районі 0,3 м/с пояснюється тим, що тертя в контакті мінімальне при чистому коченні, при наявності ж ковзання з його збільшенням сила тертя на контактуючих поверхнях спочатку різко збільшується, досягає максимуму вже при невеликих швидкостях прослизання (3-30 см/сек) і потім зазвичай знову дещо зменшується, більшою мірою це стосується експлуатаційних добавок, що і спостерігається на рис.3.3.

Використання в добавках сполук (Mo, Pb, Sn та ін.), здатних збільшити площу контакту, дещо згладжує стрибок моменту тертя, при його досить високому початковому значенні. Ця особливість проявилася у наступних препаратах: Lubrifilm, XADO EX120, Redex, Liqui-Moly, Power Tec 100.

Різка зміна моменту тертя для добавок Roil, Micro-X2, MANNOL Molibden Additive з підвищенням при цьому інтенсивності зношування обумовлена наявністю в них компонентів, що хімічно руйнують поверхні тертя.

Оскільки найменша величина зносу і найбільша стабільність за моментом виявилися у добавок ER і XADO EX120, саме вони пропонуються в якості присадок до трансмісій.

3.5. Висновок

У третьому розділі проведено експериментальні дослідження впливу присадок на триботехнічні параметри контактної пари. Встановлено, що запропонована методика та конструкція установки забезпечують відтворення умов граничного та змішаного тертя, характерних для зубчастих передач.

Отримано, що застосування присадок змінює величину початкового та встановленого моменту тертя: для окремих складів відносний момент тертя знижується до 0,86–0,90, що свідчить про покращення антифрикційних властивостей та стабілізацію мастильної плівки. Показано, що різні присадки по-різному реагують на зміну швидкості ковзання, формуючи як максимуми, так і спадні залежності.

Аналіз зношування продемонстрував зменшення поверхневих пошкоджень у 2–3 рази порівняно з базовою оливою, а також зниження робочої температури на 10–15 %. Отримані залежності підтверджують ефективність частини досліджених присадок та можуть бути використані для подальшої оптимізації мастильних композицій.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПРИ РОБОТІ З МАСЛАМИ ТА АНТИФРИКЦІЙНИМИ ПРИСАДКАМИ

4.1. Загальні відомості про охорону праці при обробці агрегатів маслами з додаванням присадок

Охорона праці під час обслуговування, випробування та обробки агрегатів з використанням мастильних матеріалів і присадок має на меті запобігання впливу на працівників шкідливих хімічних, фізичних і ергономічних факторів. Масла та присадки застосовують для зменшення тертя, підвищення зносостійкості та довговічності вузлів тертя у сільськогосподарській і транспортній техніці, тому їх обробка супроводжується виділенням парів вуглеводнів, аерозолів, підвищенням температури й утворенням електростатичних зарядів.

Усі роботи проводяться відповідно до Закону України Про охорону праці, ДСТУ EN ISO 12100:2016 Безпечність машин, ДСП 201-97 Державні санітарні правила повітря робочої зони, НПАОП 0.00-1.28-10 Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями.

Приміщення, у якому виконуються операції з обробки агрегатів маслами, повинно бути обладнане припливно-витяжною вентиляцією, місцевими витяжними шафами або зонтами. Повітрообмін має забезпечувати не менше ніж 10-кратне оновлення повітря на годину. Температура у приміщенні підтримується в межах 18–24 °С, вологість 40–60 %, рівень шуму — до 80 дБ [24].

До робіт допускаються працівники, які пройшли навчання з безпечних методів роботи, медичний огляд та інструктаж. Робоче місце повинно бути забезпечене засобами індивідуального захисту (спецодяг, гумові рукавички, окуляри, респіратор типу РПГ-67, захисне взуття).

4.2. Шкідливі та небезпечні фактори при використанні антифрикційних присадок до масел

Під час роботи з антифрикційними присадками працівник може зазнавати впливу низки шкідливих і небезпечних факторів. До складу присадок входять сірковмісні, фосфорні, хлорорганічні сполуки, наноматеріали (графіт, фулерени, дисульфід молібдену), що при тривалому контакті можуть спричинити подразнення слизових оболонок, алергічні реакції та порушення функцій дихальної системи. На рис. 4.1. відображені основні шкідливі та небезпечні фактори при роботі з маслами.



Рисунок 4.1 – Основні шкідливі та небезпечні фактори при роботі з маслами та присадками

Розглянемо небезпечні фактори детальніше.

Основні небезпечні та шкідливі фактори:

Хімічний вплив. Пари вуглеводнів і аерозолі присадок мають токсичну дію при перевищенні гранично допустимих концентрацій (ГДК 0,3–1,0 мг/м³).

Підвищена температура. У процесі нагрівання масел до 70–90 °С можливі опіки шкіри при потраплянні крапель рідини.

Електростатичні розряди. При перекачуванні масел виникають заряди, що можуть спричинити займання.

Пожежна небезпека. Температура спалаху моторних масел становить 160–220 °С, тому за наявності відкритого вогню можливе займання.

Недостатнє освітлення та вентиляція. Погане видалення парів призводить до перевищення ГДК, а недостатнє освітлення — до зорової втоми й помилок оператора.

В табл. 4.1 наведені основні шкідливі фактори при роботі з маслами та присадками.

Таблиця 4.1 – Основні шкідливі фактори при роботі з маслами та присадками

№	Шкідливий / небезпечний фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки для працівника	Основні заходи захисту
1	Пари та аерозолі масел і присадок	Нагрівання, перемішування, випаровування	Подразнення дихальних шляхів, головний біль, токсична дія	Витяжна вентиляція, респіратор, контроль ГДК
2	Підвищена температура масла (70–90 °С)	Ультразвукові та нагрівальні установки	Опіки шкіри, перегрів організму	Термостійкі рукавиці, спецодяг, термоконтроль
3	Електростатичні розряди	Перекачування та перемішування рідин	Іскри, займання, пожежа	Заземлення ємностей, антистатичні шланги
4	Електричний струм (220–380 В)	Пошкодження ізоляції, волога, несправне обладнання	Ураження струмом, опіки	ПЗВ, заземлення, перевірка кабелів
5	Недостатня вентиляція	Закриті приміщення, робота з викидами парів	Перевищення ГДК, запаморочення, гіпоксія	Примусова вентиляція, датчики якості повітря
6	Пожежна небезпека масел	Висока температура спалаху (160–220 °С)	Займання, пожежа	Порошкові вогнегасники, заборона відкритого вогню
7	Недостатнє освітлення	Недостатні джерела світла	Помилки оператора, травмування	Освітлення \geq 300 лк

8	Дія шуму та вібрації	Обладнання, помпи, мішалки	Втома, порушення кровообігу, зниження слуху	Беруші, технічне обслуговування обладнання
---	----------------------	----------------------------	---------------------------------------------	--------------------------------------------

4.3. Заходи щодо усунення шкідливих та небезпечних факторів при роботі з маслами та присадками до них

Безпечне виконання робіт із використанням масел та присадок забезпечується поєднанням технічних, санітарно-гігієнічних та організаційних заходів.

1. Технічні заходи безпеки:

Усі металеві частини установок і ємностей для зберігання масел повинні бути надійно заземлені.

Прилади нагріву масел обладнуються термодатчиками з автоматичним відключенням при перевищенні температури 90 °С.

Витяжні пристрої встановлюються безпосередньо над робочими зонами змішування або нагріву.

Для перекачування масел застосовуються металеві шланги з антистатичними вставками.

Усі електричні установки повинні відповідати вимогам ПУЕ та НПАОП 40.1-1.32-01.

2. Організаційні заходи:

До роботи допускаються лише особи, які пройшли спеціальний інструктаж і мають допуск до роботи з хімічними речовинами.

На кожному робочому місці повинні бути вивішені інструкції з охорони праці, плани евакуації та телефони екстрених служб.

Зберігання присадок проводиться в окремому приміщенні з температурою не вище 25 °С, у щільно закритій тарі з відповідними етикетками.

Забороняється змішування різних присадок без попереднього узгодження з технологічною інструкцією.

Один раз на півроку проводиться контроль повітряного середовища на вміст парів і аерозолів.

3. Санітарно-гігієнічні заходи:

Забезпечення працівників засобами індивідуального захисту (рукавички, комбінезони, захисні окуляри, респіратори).

Організація побутових приміщень: душових, місць для зберігання спецодягу, аптечок першої допомоги.

Проведення профілактичних медичних оглядів для працівників, які контактують із маслами та присадками.

4. Пожежна безпека:

На ділянці повинні бути встановлені вогнегасники порошкового типу (ВП-5 або ВП-9), ящики з піском і металеві відра.

Заборонено використання відкритого полум'я, зварювальних робіт і куріння поблизу місць зберігання масел.

Усі ємності з рідинами мають бути заземлені, щоб уникнути накопичення статичних зарядів.

Евакуаційні виходи повинні бути вільними, а шляхи евакуації позначені світловими покажчиками.

5. Дії у разі аварійної ситуації:

При розливі масла необхідно локалізувати його абсорбентом (тирса, пісок), а забруднене місце прибрати.

У разі займання гасіння проводиться порошковими або пінними вогнегасниками (використання води заборонено).

При потраплянні присадки на шкіру — змити великою кількістю води з милом; при потраплянні в очі — промити 15 хвилин і звернутися до лікаря.

У разі отруєння парами — вивести потерпілого на свіже повітря, забезпечити спокій, дати кисень, викликати швидку допомогу.

4.4. Висновок

Роботи з маслами та антифрикційними присадками належать до технологічних процесів підвищеної небезпеки через одночасну дію хімічних, фізичних і пожежонебезпечних факторів. Дотримання вимог нормативних документів, застосування вентиляції, заземлення обладнання та використання засобів індивідуального захисту забезпечують безпечні умови праці персоналу.

Запроваджені технічні й організаційні заходи дозволяють мінімізувати вплив шкідливих речовин, запобігти нещасним випадкам і забезпечити стабільну, безаварійну роботу обладнання. Дотримання правил охорони праці сприяє збереженню здоров'я працівників, підвищенню продуктивності праці та зниженню виробничих ризиків під час роботи з мастильними матеріалами та присадками до них.

РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ТЕХНІЧНОЇ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕНИХ ЗАХОДІВ

5.1. Розрахунок економічної ефективності роботи

Виконаємо техніко-економічний аналіз показників діяльності майстерні після її модернізації, що передбачає впровадження технології відновлення коробок зміни передач присадками.

Для здійснення реконструкції майстерні підприємства передбачається впровадження сучасного технологічного обладнання та розширення спектра ремонтних робіт, що зумовлює потребу у збільшенні виробничих площ. Додаткові площі будуть забезпечені шляхом перепрофілювання та реконструкції діючого складу запасних частин.

Вихідні дані, необхідні для розрахунку економічної ефективності, подані у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Вихідні дані, необхідні для розрахунку економічної ефективності

Параметри	Умовні позначення використовуваних параметрів	Значення параметрів	
		база	проект
Обсяг виконаних ремонтних операцій, умовні ремонти	N	39	43
Ціна одного умовного ремонту, грн	$C_{\text{рем}}$	2000,0	2300,0
Кількість робітників, задіяних в основних виробничих процесах, осіб	Z	1	1
Середній місячний зарібок працівника з урахуванням нарахувань, грн	$F_{\text{зп}}$	20000,0	21000,0
Вартість обладнання, що перебуває на балансі підприємства, грн	$K_{\text{об0}}$	123000,0	
Вартість обладнання, що планується придбати, грн	$K_{\text{об1}}$		50000,0
Оціночна (балансова) вартість виробничої будівлі, грн	$K_{\text{буд}}$	150000,0	

Сума витрат на реконструкцію та організацію дільниці, грн	$K_{\text{орг}}$		100000,0
Обсяг річного споживання електроенергії, кВт·год/рік	W	18000,0	20000,0
Тариф, грн/кВт·год	$C_{\text{ел}}$	11,0	11,0

З урахуванням місячного обсягу, необхідно вирахувати річний обсяг ремонтних робіт за формулою [26]

$$U = N \cdot C_{\text{рем}} \cdot 12, \quad (5.1)$$

- до впровадження дільниці:

$$U_0 = 39 \cdot 2300 \cdot 12 = 1076400 \text{ грн/рік}$$

- після впровадження дільниці:

$$U_1 = 43 \cdot 2300 \cdot 12 = 1186800 \text{ грн/рік.}$$

Далі дізнаємось приріст річного обсягу робіт

$$\Delta U = U_1 - U_0 \quad (5.2)$$

$$\Delta U = 1186800 - 1076400 = 110400 \text{ грн/рік.}$$

Річний фонд оплати праці буде становити

$$F_{\text{зп}} = Z \cdot 12 \quad (5.3)$$

$$F_{\text{зп0}} = 20000 \cdot 12 = 240000 \text{ грн/рік (у базовому варіанті)}$$

$$F_{\text{зп1}} = 21000 \cdot 12 = 252000 \text{ грн/рік (у проектному варіанті).}$$

Річні витрати на електроенергію прораховуються за формулою:

$$E=W \cdot C_{\text{ел}} \quad (5.4)$$

$$E_0=18000 \cdot 19=342000 \text{ грн/рік (у базовому варіанті)}$$

$$E_1=20000 \cdot 19=380000 \text{ грн/рік (у проектному варіанті).}$$

Повні річні експлуатаційні витрати можна прорахувати у мінімальному варіанті, для спрощення враховуємо тільки зарплату та електроенергію:

$$C=F_{\text{зп}}+E \quad (5.5)$$

$$C_0=F_{\text{зп}0}+E_0=240000+342000=582000 \text{ грн/рік (у базовому варіанті)}$$

$$C_1=F_{\text{зп}1}+E_1=252000+380000=632000 \text{ грн/рік (у проектному варіанті).}$$

Річний прибуток майстерні складає

$$\Pi=U-C \quad (5.6)$$

$$\Pi_0=U_0-C_0=1076400-582000=494400 \text{ грн/рік}$$

$$\Pi_1=U_1-C_1=1186800-632000=554800 \text{ грн/рік.}$$

Враховуючи відомі величини річного прибутку майстерні до впровадження змін (Π_0) та після змін (Π_1) можна віднайти приріст прибутку

$$\Delta\Pi=\Pi_1-\Pi_0=554800-494400=60400 \text{ грн/рік.}$$

Визначимо додаткові капітальні вкладення

$$K_d = K_{обл} + K_{орг} \quad (5.6)$$

$$K_d = 50000 + 100000 = 150000 \text{ грн}$$

Рівень рентабельності майстерні становить

$$R = \Pi : C \cdot 100\% \quad (5.7)$$

$$R_1 = 554800 : 632000 \cdot 100\% \approx 87,8\%$$

Термін окупності додаткових капітальних вкладень визначається по формулі

$$T = \frac{K_d}{\Delta\Pi} \quad (5.8)$$

$$T = \frac{150000}{60400} \approx 2,48 \text{ року.}$$

5.2. Висновок

Проведені розрахунки показали, що після організації ділянки з відновлення коробок зміни передач із застосуванням присадок річний обсяг виконаних ремонтних робіт зростає з 1 076 400 до 1 186 800 грн, тобто на 110 400 грн. При цьому річні експлуатаційні витрати збільшуються з 582 000 до 632 000 грн за рахунок підвищення фонду оплати праці та витрат на електроенергію. Незважаючи на збільшення витрат, річний прибуток майстерні зростає на 60 400 грн і досягає 554 800 грн. Рівень рентабельності підвищується з приблизно 84,9 % до 87,8 %, що свідчить про більш ефективне використання ресурсів. Додаткові

капітальні вкладення в обсязі 150 000 грн окупаються за 2,5 року, що є прийнятним показником для ремонтного виробництва. Таким чином, створення нової ділянки з відновлення коробок передач присадками є економічно доцільним та сприяє підвищенню загальної ефективності роботи майстерні.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі виконаного теоретичного аналізу обґрунтовано можливість підвищення довговічності зубчастих зачеплень силових передач на 20-30% шляхом введення в трансмісійні масла антифрикційних і протизносних добавок.

2. Введення добавок в масло змінює геометричні параметри зачеплення (фактичну площу плями контакту і приведений радіус, значення величин яких залежать від товщини плівки, що утворюється добавкою в зоні зачеплення), а також властивості контактуючих поверхонь (HB - мікротвердість, R_a - шорсткість).

3. Добавки, віднесені до групи ремонтно-відновлювальних і мають в своїй основі металокомплекси, значно стримують процес зношування поверхонь з підвищенням швидкості прослизання. Експлуатаційні добавки гальмують зношування при швидкостях ковзання, близьких до нульових, але з ростом останніх інтенсифікують зношування.

4. Для всіх типів циліндричних зубчастих передач (клас чистоти V7-V8 за ДСТУ2789-99, 6-7 ступінь точності за ДСТУ1643-2006) тракторних трансмісій, що працюють на маслі ТМ-3-18 доцільно застосовувати ремонтно-відновлювальні композиції ER і XADO EX120, що гальмують викрашування контактуючих поверхонь за часом на 25%, знижують момент тертя в 1,5-2 рази і зменшують величину зносу на 30% у порівнянні з маслом без добавок для діапазону швидкостей ковзання 0-0,65 м/с, несучої здатності зубчастих зачеплень рівною 2,32 кН.

5. Для тихохідних середньонавантажених зубчастих зачеплень, що працюють в масляному середовищі, не забрудненому абразивом, використання антифрикційних добавок Micro X2, MANNOL Molibden Additive, Power Tec 100, Liqui-Moly призводить до падіння моменту тертя в контакті на 10-35 % в порівнянні з роботою передачі на чистому маслі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Черній О. Дослідження безвідказності тракторів John Deere серії 8R в експлуатаційних умовах України. Теоретичні та практичні питання аграрної науки : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. 2022. С. 117–120.
2. Калганков Є.В. Деякі проблеми гідроабразивно-втомного зносу деталей об'ємного гідроприводу мобільних машин / Є.В. Калганков // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. — Дніпропетровск: ІГТМ НАНУ. – 2013. – №108. – С. 133-142.
3. Проблема зберігання сільськогосподарської техніки [Електронний ресурс] / Я.Михайлович, О. Романюк, А. Рубець, А. Засуцько // Пропозиція – Режим доступу до ресурсу: <http://propozitsiya.com/ua/problema-zberigannya-silskogospodarskoyi-tehniki>.
4. Дирда, В., Кобець, А., Лисиця, М., Заболотна, О., Твердохліб, Т., Калганков, Є. та Черній, О., (2021). Наноматеріали в механіці деформівного твердого тіла на прикладі гумових футеровок барабанних кульових млинів. *Geo-Technical Mechanics*. (157), 131–139.
5. Olaleye, K., Roik, T., Kurzawa, A., Gavrysh, O., Pyka, D., Vocian, M., & Jamroziak, K. (2023). Tribosynthesis of friction films and their influence on the functional properties of copper-based antifriction composites for printing machines. *Materials Science-Poland*, 40(4), 147–157. <https://doi.org/10.2478/msp-2022-0051>
6. Калганков, Є., (2022). Поліпшення фізико-механічних властивостей гуми шляхом її модифікації фулереном C₆₀. У: *Теоретичні та практичні питання аграрної науки, 18 травня 2022, Дніпро, Україна*. Дніпро: ДДАЕУ. с. 95–97.
7. Солодовник, О. та Калганков, Є., (2018). Підвищення довговічності підшипників кочення введенням в змазку наноматеріалів, що поліпшують умови тертя. *Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції*. 230–235.
8. Герінг І.А. Теорія і практика гідроабразивно-втомного зносу деталей об'ємного гідропривода трансмісії / Герінг І.А., Калганков Є.В., Кириленко О.І.

Аграрна наука та харчові технології Збірник наукових праць ВНАУ. Серія: Сільськогосподарські науки Випуск 4, 2015, - С 52 – 61.

9. American Gear Manufacturers Association. (2004). *AGMA 912-A04: Mechanisms of Gear Tooth Failures*. Alexandria, VA: AGMA.

10. Армашов Ю.В. Надійність сільськогосподарської техніки: навчальний посібник / Ю.В. Армашов, П.К. Охмат. – Дніпропетровськ.: РВВ ДДАУ, 2008. – 208 с.

11. Ремонт машин та обладнання: підручник для вищих навчальних закладів / [Дирда В.І., Мельянцов П.Т., Калганков, Є.В. та ін.]. – Дніпропетровськ: Журфонд, 2015. – 292 с.

12. Калганков Є., Науменко М. Синергетична модель взаємодії поверхонь тіл за умови фрикційного контакту з'єднання "П'ята плунжера-похила шайба" об'ємного гідропривода трансмісії мобільних машин. *Геотехнічна механіка*. 2013. № 108. С. 164–173.

13. Калганков, Є. та Черній, О., (2023). Обґрунтування енергетичного критерію руйнування гумових захисних покриттів, що працюють в умовах абразивно-втомного зношування. У: Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матеріали VI Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конференції (Полтава, 21-22 грудня 2023 р.), 21–22 грудня 2023, Полтава, Україна. ПДАУ. с. 69–72.

14. Терехов В. Ю. Визначення технічного стану моторного масла та його вплив на трибоспряження двигуна / В. Ю. Терехов, Є. В. Калганков, В. І. Дирда. // Zbiór raportów naukowych. „ Inżynieria i technologia. 2014. osiągnięć, projektu hipotezę. „ Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour». – 2014. – С. 102–105.

15. Калганков Є.В. Деякі проблеми гідроабразивно-втомного зносу деталей об'ємного гідроприводу мобільних машин / Є.В. Калганков // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. — Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ. – 2013. – №108. – С. 133-142.

16. Литвин Д. О. (2025). Класифікація видів зносу та поверхневих пошкоджень зубчастих передач у трансмісійних механізмах. *Матеріали IV*

Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (21 листопада 2025 року), ДДАЕУ, Дніпро, (с. 55–58).

17. Bulat, A. F., Dyrda, V. I., & Kalhankov, Y. V. (2018). Synergetic model of the wave abrasive fatigue wear of rubber lining in the ball tube mills. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 39–47. Режим доступу: <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/1033>

18. Dyrda, V. I., Kalgankov, Ye. V., Tsanidi, I. M., Chernii, O. A., Tolstenko, O. V., Derkach, O. D., & Kabat, O. S. (2018). Особливості розрахунків гумометалевих елементів з урахуванням ефекту об'ємного стиску. *Геотехнічна механіка*, (138), 160–168.

19. Eusufzai, Z. (2025). *Impact of advanced lubrication management systems on equipment longevity and operational efficiency in smart manufacturing environments*. *Proceedings of the 1st Global Research and Innovation Conference*, 1(1), 618–653.

20. Калганков Є. В. Особливості фрактального аналізу поверхні руйнування гумових футерівок, що працюють в умовах абразивно-втомного зносу / Є. В. Калганков. // *Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць*. — Дніпропетровск: ІГТМ НАНУ. — 2017. — №133. — С. 66–74.

21. Кобець А. С. Абразивно-втомний знос гумової футерівки в контексті фрактального аналізу / А. С. Кобець, В. І. Дирда, Є. В. Калганков, І. М. Цаніді, О. А. Черній // *Геотехнічна механіка*. — 2019. — Вип. 144. — С.103-110.

22. Пат. № 144310 Україна, G01N 3/56 (2006.01) Машина тертя / Калганков Є.В.; Грачова В.М.; Косенко А.В. - u202001408; заявл. 20.03.2020; опубл. 25.09.2020, бюл. № 18; 4 с.

23. Пат. 119244 Україна, МПК7 МПК G01N 33/44 (2006.01). Пристрій для випробувань гумових елементів на стирання [Текст] / Дирда Віталій Іларіонович (UA); Калганков Євген Васильович (UA); Черній Олександр Анатолійович (UA); Цаніді Іван Миколайович (UA); Калганков Богдан Васильович (UA). u201602207; заявл. 09.03.2016 ; опубл. 25.09.2017, бюл. № 18- 4с.

24. Годяєв С. Г. Методичні вказівки до написання розділу «Охорона праці» в дипломних роботах студентів інженерно-технологічного факультету, ОКР

бакалавр за напрям підготовки: 6.100102 «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва». / С.Г. Годяєв, Л.Д. Устимович. Дніпропетровськ: ДДАЕУ, 2016. – 21 с.

25. Агальцов, Г. М., Лисиця, М. І., Новікова, А. В., & Калганков, Є. В. (2024). Оцінка та управління ризиками, пов'язаними з виробничим шумом та вібраціями на виробництві. У *«ПОТУРАЇВСЬКІ ЧИТАННЯ»: матеріали XXI Всеукр. наук.-техн. конф., присвяч. 102- річниці з дня народження акад. НАН України В.М. Потураєва* (с. 61-62). НТУ Дніпровська політехніка. <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/10825>

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

ДОДАТКИ

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

**ВІПЛИВ АНТИФРИКЦІЙНИХ І ПРОТІВНОСНИХ ДОБАВОК У ТРАНСМІСІЙНІ ОЛИВИ НА
ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ ТРАКТОРІВ**

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

Виконав: студент 2 курсу, групи МІАТ-2-24
Литвин Дмитро Олександрович

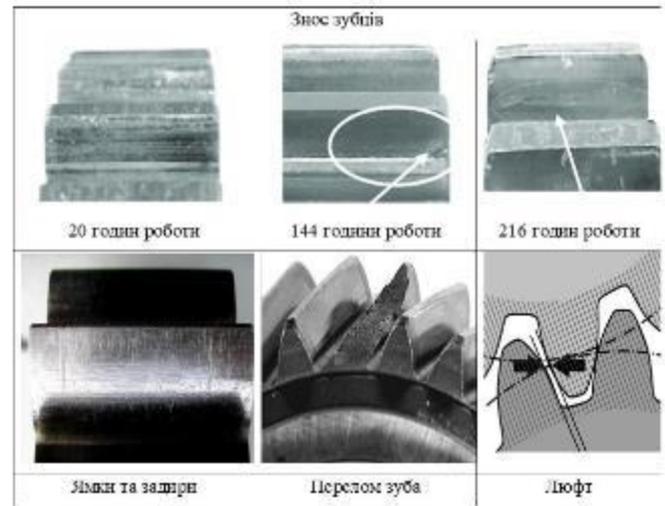
Керівник: доцент, к.т.н.
Толстенко Олександр Васильович

Дніпро-2025

мета роботи полягає у визначенні добавки до масла, що зменшує інтенсивність зношування зубчастих зачеплень агрегатів трансмісії тракторів, а отже підвищує їх надійність

ЗАДАЧІ РОБОТИ

1. Обґрунтувати теоретичні передумови можливості цілеспрямовано змінювати властивості трущих поверхонь, змінюючи режим і умови тертя за допомогою добавок.
2. Використовуючи існуючі методики, виявити здатність добавок керувати процесами тертя і зносу в діапазоні їх нормального протікання (за відсутності пошкоджуваності).
3. Змоделувати роботу зубчастої пари в лабораторних умовах, за допомогою роликвої аналогії, з метою встановлення зв'язку між незалежними змінними факторами і параметрами оцінки роботи в процесі активації поверхонь тертя впливом добавок.
4. Оцінити здатність добавок позитивно впливати на зубчасті зачеплення, використовуючи при цьому в якості об'єкта дослідження реальний вузол, що працює в умовах, близьких до експлуатаційних.
5. Розробити прийоми доцільного застосування окремих добавок в силових передачах тракторів.



4

КЛАСИФІКАЦІЯ ВИДІВ ЗНОСУ І ПОШКОДЖЕНЬ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

Класифікація видів зносу і пошкоджувальності деталей машин

Знос	Види руйнування при терті
Допустимий	Механохімічний нормальний окислювальний
	Механохімічний нормальний знос плівок висхідного походження
	Механохімічна форма абразивного зносу
Недопустимий	Зчеплення I роду
	Зчеплення II роду
	Фреттинг-процес (застигання, динамічне окислення)
	Різання, дрипання, проорювання (механічна форма абразивного зносу)
	Втома при зчепленні
	Інші види пошкодження (корозія, кавітація, ерозія, зчавнення тощо)



Втомна тріщина, руйнування і втомне викрипування

Характер руйнування поверхні залежно від виду мастила

Вид мастила	Характер руйнування
Рідинна	Фрикційна втома при пружних деформаціях
Напіврідка	Пластичне деформування: фрикційна втома при пластичних деформаціях (малоциклова втома)
Гранична	Малошкорова втома і (або) абразивне зношування
Без мастила	Абразивне зношування та (або) сколювання з глибоким вириванням



Абразивний знос



Кавітаційний знос

Трьома важливими розрахунковими параметрами в пружногидродинамічній теорії є:

- параметр навантаження P^* - параметр швидкості V^*

$$P^* = \frac{P}{E^* r} \quad V^* = \frac{m^* V}{E^* r}$$

$$C^* = m E^*$$

де P^* і V^* - безрозмірні величини, P - навантаження на одиницю ширини циліндра, r - ефективний радіус пари роликів, E^* - ефективний модуль, V - відносна швидкість ковзання, m^* - постійне значення в'язкості мастила, m - ізозокоефіцієнт в'язкості згідно із співвідношенням.

Вплив товщини мастильного шару на довговічність пари, що труться, зручно виразити як залежність числа циклів навантаження або допустимого нагріву від безрозмірної (нормованої) товщини мастильного шару:

$$\frac{h_m}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}}$$

де R_{a1} , R_{a2} - середнє арифметичне відхилення шорсткості контактуючих поверхонь.

Для забезпечення рідинного тертя в контактї величина зазначеного відношення повинна бути більше 3-4

Товщина мастильної плівки $h_m = \frac{0.125 [v(\nu_1 + \nu_2) \ln a_k]^{0.27}}{\left[P \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{0.041} \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)^{0.34}}$

де h_m - товщина мастильної плівки в см; ν - в'язкість мастила при атмосферному тиску і робочій температурі тертьових тіл, виражена в кг. сек/см²; $\nu_1 + \nu_2$ - алгебраїчна сума швидкостей руху поверхонь тертя відносно контактної точки в см/сек; a_k - параметр Кісскальта; P - навантаження, що діє по нормалі до лінії зачеплення.

Фактична площа плями контакту за Герцем

$$S_k = 2 \cdot (l_k + \Delta l_k) \cdot b_k$$

Найбільший фактичний тиск на контактній площадці

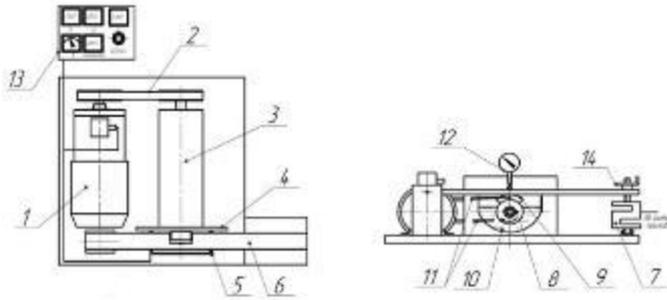
$$P_{max} = 0.637 \frac{P}{b_k l_k}$$

Аналітична залежність для коефіцієнта тертя ковзання в зачепленні зубів

$$f = 0.021 g \frac{P \cdot HB}{\nu_k \nu_{sk} \rho_n E_n} + 0.14$$

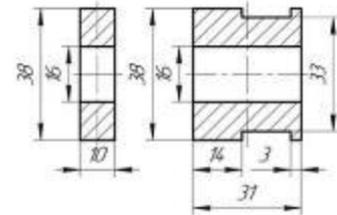
де HB - твердість м'якої твердого матеріалу, кгс/см²; ν_k - в'язкість мастила, кг/см; ν_{sk} - швидкість ковзання, м/с.

Параметри	З добавками*	Без добавок*
Впровадження мікронерівностей одна в одну h_k , мкм	-	0...40
Площа контакту, S_k	2.79...8.08	3.21...8.66
Найбільший тиск у контактї, p_{max}	1436.47...5546.00	443.05...1149.47
Коефіцієнт тертя f	0.117...0.133	0.092...0.108**



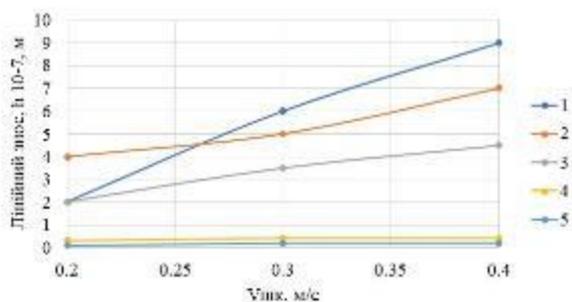
Установка для трибологічних випробувань

1 – електродвигун, 2 – пасова передача, 3 – підшипниковий блок, 4 – плита, 5 – чаша, 6 – навантажувальний важіль, 7 – дещаметр, 8 – дисковий копир зразок, 9 – зразок, 10 – рідша, 11 – датчики температури, 12 – індикатор годинникового типу, 13 – вимірювальний блок, 14 – маховик.



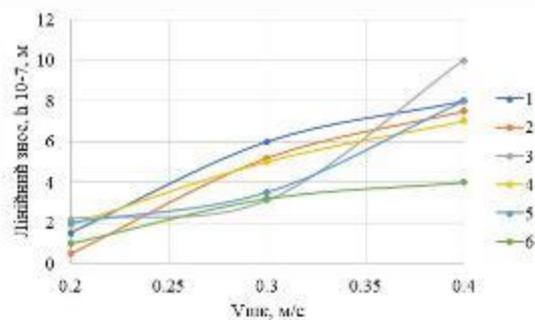
Зразки для випробувань: а - верхній; б - нижній

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



1 - Bardahl Full Metal, 2 - Масло ТАІІ-15(ІМ-3-18),

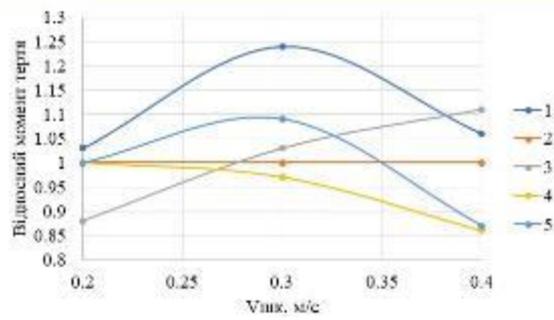
3 - Lubriform, 4 - XADO EX120, 5 - ER
ремонтно-відновлювальні



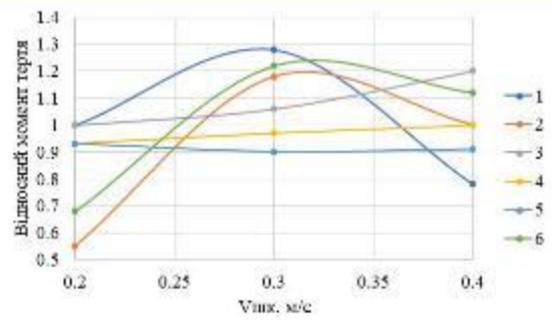
1 - Roil, 2 - SCT - MANNOL Molibden Additive, 3 -

Redex, 4 - Liqui-Moly, 5 - Power Tec 100, 6 - Micro X2
експлуатаційні

Залежність лінійного зносу від швидкості ковзання зразків при використанні
добавок в масло

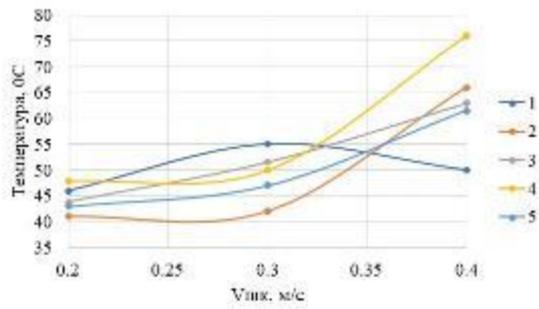


1 - Bardahl Full Metal, 2 - Масло ТАП-15(ТМ-3-18), 3 -
Lubriform, 4 - XADO EX120, 5 - ER
ремонтно-відновлювальні

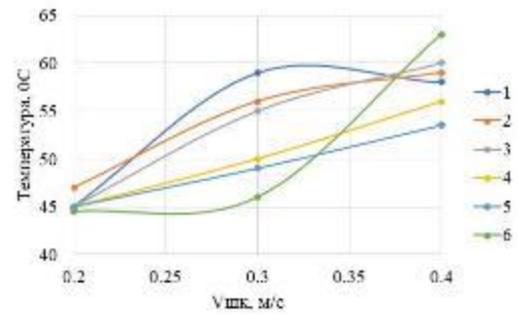


1 - Roil, 2 - SCT - MANNOL Molibden Additive, 3 - Redex,
4 - Liqui-Moly, 5 - Power Tec 100, 6 - Micro X2
експлуатаційні

Зміни відносного моменту тертя від швидкості ковзання зразків при введенні
добавок в масло



1 - Bardahl Full Metal, 2 - Масло ТАП-15(ТМ-3-18), 3 - Lubrifilm, 4 - XADO EX120, 5 - ER ремонтно-відновлювальні



1 - Roil, 2 - SCT - MANNOL Molibden Additive, 3 - Redex, 4 - Liqui-Moly, 5 - Power Tec 100, 6 - Micro X2 експлуатаційні

Залежність температури мастильного середовища від швидкості прослизання роликів при введенні добавок

№	Шкідливий / небезпечний фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки для працівника	Основні заходи захисту
1	Пари та аерозолі масел і присадок	Нагрівання, перемішування, випаровування	Подразнення дихальних шляхів, головний біль, токсична дія	Витяжна вентиляція, респіратор, контроль ГДК
2	Підвищена температура масла (70-90 °C)	Ультразвукові та нагрівальні установки	Опіки шкіри, перегрів організму	Термостійкі рукавиці, спецодяг, термоконтроль
3	Електростатичні розряди	Перекачування та перемішування рідини	Іскри, займання, пожежа	Заземлення емностей, антистатичні шланги
4	Електричний струм (220-380 В)	Попшкодження ізоляції, волога, несправне обладнання	Ураження струмом, опіки	ІЗЗ, заземлення, перевірка кабелів
5	Недостатня вентиляція	Закриті приміщення, робота з викидами парів	Перевищення ГДК, запаморочення, гіпоксія	Примусова вентиляція, датчики якості повітря
6	Пожежна небезпека масел	Висока температура спалаху (160-220 °C)	Займання, пожежа	Порошкові вогнегасники, заборона відкритого вогню
7	Недостатнє освітлення	Недостатні джерела світла	Помилки оператора, травми	Освітлення ≥ 300 лк
8	Дія шуму та вібрації	Обладнання, помпи, мішалки	Втома, порушення кровообігу, зниження слуху	Беруші, технічне обслуговування обладнання

Параметри	Умовні позначення використовуваних параметрів	Значення параметрів	
		база	проект
Обсяг виконаних ремонтних операцій, умовні ремонти	N	39	43
Ціна одного умовного ремонту, грн	C _{рем}	2000,0	2300,0
Кількість робітників, задіяних в основних виробничих процесах, осіб	Z	1	1
Середній місячний зарібок працівника з урахуванням нарахувань, грн	F _м	20000,0	21000,0
Вартість обладнання, що перебуває на балансі підприємства, грн	K _{об0}	123000,0	
Вартість обладнання, що планується придбати, грн	K _{об1}		50000,0
Оціночна (балансова) вартість виробничої будівлі, грн	K _{буд}	150000,0	
Сума витрат на реконструкцію та організацію ділянки, грн	K _{орг}		100000,0
Обсяг річного споживання електроенергії, кВт·год/рік	W	18000,0	20000,0
Тариф, грн/кВт·год	C _{ен}	11,0	11,0
Річні витрати на електроенергію, грн/рік	E	342000	380000
Річний фонд оплати праці, грн/рік	F _п	240000	252000
Річні експлуатаційні витрати, грн/рік	C	582000	632000
Річний прибуток, грн/рік	П	494400	554800
Приріст прибутку, грн/рік	ΔП		60400
Додаткові капітальні вкладення, грн	K _д		150000
Рівень рентабельності, %	R		87,8
Термін окупності додаткових капітальних вкладень, грн	T		2,48

1. На основі виконаного теоретичного аналізу обґрунтовано можливість підвищення довговічності зубчастих зачеплень силових передач на 20-30% шляхом введення в трансмісійні масла антифрикційних і протизносних добавок.
2. Введення добавок в масло змінює геометричні параметри зачеплення (фактичну площу плями контакту і приведений радіус, значення величин яких залежать від товщини плівки, що утворюється добавкою в зоні зачеплення), а також властивості контактуючих поверхонь (HB - мікротвердість, R_a - шорсткість).
3. Добавки, віднесені до групи ремонтно-відновлювальних і мають в своїй основі металокомплекс, значно стримують процес зношування поверхонь з підвищенням швидкості прослизання. Експлуатаційні добавки гальмують зношування при швидкостях ковзання, близьких до нульових, але з ростом останніх інтенсифікують зношування.
4. Для всіх типів циліндричних зубчастих передач (клас чистоти V7-V8 за ДСТУ2789-99, 6-7 ступінь точності за ДСТУ1643-2006) тракторних трансмісій, що працюють на маслі ТАП-15 ТМ-3-18 доцільно застосовувати ремонтно-відновлювальні композиції ER і XADO EX120, що гальмують викрашування контактуючих поверхонь за часом на 25%, знижують момент тертя в 1,5-2 рази і зменшують величину зносу на 30% у порівнянні з маслом без добавок для діапазону швидкостей ковзання 0-0,65 м/с, песучої здатності зубчастих зачеплень рівною 2,32 кН.
5. Для тихохідних середньонавантажених зубчастих зачеплень, що працюють в масляному середовищі, не забрудненому абразивом, використання антифрикційних добавок Micro X2, MANNOL Molibden Additive, Power Tec 100, Liqui-Moly призводить до падіння моменту тертя в контактні на 10-35 % в порівнянні з роботою передачі на чистому маслі.

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



**ІНЖИНІРИНГ ТЕХНОЛОГІЙ І
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
АГРОПРОМИСЛОВОГО
КОМПЛЕКСУ**

ЗБІРНИК ТЕЗ

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

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

21 листопада 2025 р.

Дніпро • 2025

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

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

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

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

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

УДК 621.891:621.833.1

Литвин Д.О., здобувач вищої освіти СВО Магістр, ОПП Агроінженерія⁹

dsau_nrm@ukr.net

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

КЛАСИФІКАЦІЯ ВИПІВ ЗНОСУ ТА ПОВЕРХНЕВИХ ПОШКОДЖЕНЬ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ У ТРАНСМІСІЙНИХ МЕХАНІЗМАХ

Забезпечення довговічності зубчастих передач є одним із ключових завдань підвищення надійності трансмісійних систем. Знос поверхонь зубів обумовлюється комплексом взаємодіючих триботехнічних процесів, які виникають у зоні контакту та визначають ресурс передач. Аналіз літератури показує, що провідний вид пошкоджуваності залежить від кінематики тертя - ковзання, кочення або їх поєднання - та умов навантаження [1]. Процес зношування доцільно розглядати як сукупність трьох явищ: взаємодію поверхонь тертя, фізико-механічні зміни поверхневих шарів та руйнування матеріалу [2]. У зоні контакту реалізуються фрикційні зв'язки молекулярно-механічної природи. Їх порушення може відбуватися за п'ятьма механізмами: мікрорізання, пластичне відтіснення, пружне відтіснення, скоплювання й руйнування поверхневих плівок, а також скоплювання основного матеріалу. Ця класифікація є універсальною та об'єднує всі типи зносу - від абразивного до атомно-молекулярного.

У реальних деталях завжди домінує один провідний вид зношування, який визначає межу працездатності [3]. До допустимих належать механосмічні процеси, нормальне окислювальне спирання та абразивний знос низької інтенсивності. До недопустимих відносять скоплювання I-II роду, фреттинг, різання і дряпання, втомне вищипування та корозійно-ерозійні форми руйнування. Узагальнена класифікація випів зношування і пошкоджуваності наведена в табл. 1.

⁹ Науковий керівник – Толстенко О.В., кандидат технічних наук, доцент кафедри інжинірингу технічних систем

Таблиця 1 – Класифікація видів зносу і пошкоджуваності деталей машин

Знос	Види руйнування при терті
Допустимий	Механохімічний нормальний окислювальний
	Механохімічний нормальний знос плівки неокисненого походження
	Механохімічна форма абразивного зносу
Недопустимий	Зчеплення I роду
	Зчеплення II роду
	Фретинг - процес (застигання, динамічне окислення)
	Різання, дряпання, (механічна форма абразивного зносу)
	Втома при коченні
	Інші види пошкоджень (корозія, кавітація, ерозія, змінання)

Важливим видом руйнування є втоми пошкодження, характерні для механізмів із тертям кочення. Вони розвиваються в поверхневих шарах металу під дією циклічних навантажень і проявляються утворенням мікротріщин та локальних западин. Викрипування виникає, коли напруження перевищують межу втоми витривалості, і супроводжується формуванням підповерхневих дефектів та подальшим відділенням частинок матеріалу. Процес прискорюється в умовах гідродинамічного чи еластогідродинамічного змащування, де мастило може проникати у мікротріщини та спричиняти тиск у їх вершинах.

До специфічних форм руйнування відносять водневе зношування та водневе окиснення. Поглинання водню металом під час тертя призводить до крихкого руйнування поверхонь, зниження витривалості та диспергування поверхневих шарів. Це характерно для сталевих елементів, що працюють у змащувальних середовищах, багатих на вуглеводні.

Абразивний знос виникає при потрапленні твердих частинок у зону контакту. У трансмісіях тракторів значну небезпеку становить ґрунтовий пил і металеві домішки, що потрапляють до масла через негерметичність ущільнень або при коливаннях температури. Абразивні частинки інтенсивно деформують поверхневі шари, збільшують товщину вторинної структури та сприяють її легкому видаленню, підвищуючи інтенсивність стирання.

Окремою формою пошкодження є квітцата, яка може виникнути у тонкому масляному шарі при вібраціях. Вона провокує точкову корозію зубців та руйнування матеріалів підшипників. Також небезпечним процесом є заїдання — інтенсивне скоплювання поверхонь із утворенням борозен, наростів і можливим клином деталей.

Змінання зубців пов'язане з пластичною деформацією при навантаженнях вище межі пружності. Воно супроводжується зміною структури шару глибиною до 130 мкм, підвищенням мікротвердості та розвитком супутнього абразивного зношування. Основні види зношування наведено на рис. 1.



Рисунок 1 – Втомна тріщина, руйнування, втомне викришування, абразивний знос, квітцатий знос

Узагальнюючи, можна зазначити, що найпоширенішими типами руйнування зубчастих коліс є контактна втома, абразивний знос та заїдання. Втомні мікротріщини на початковій окружності часто супроводжуються слідами абразивного впливу, що свідчить про комплексний характер деградації поверхонь. Аналіз механізмів зношування дає можливість визначити провідні види пошкоджуваності та формувати технічні рішення для підвищення ресурсу зубчастих передач у трансмісійних механізмах.

Список літератури

1. Kalgankov, Ye. V. (2013). Some issues of hydro-abrasive fatigue wear of components of volumetric hydraulic drives of mobile machines. *Geotechnical Mechanics: Interdepartmental Collection of Scientific Papers*, 108, 133–142.
2. Калганков, Є. В. (2021). *Розробка технологічного процесу відновлення деталі: Методичні рекомендації*. Дніпро: ДДАЕУ. 75 с.

Наукове видання

ІНЖИНІРИНГ ТЕХНОЛОГІЙ І ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції
молодих вчених

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

Мови: українська, англійська

Редактор: Ельчин АЛІЄВ
Комп'ютерна верстка: Ілля БЛЮУС

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

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