УДК 631.372+62-192 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.23-39

А.Є. Чернай, асп.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: chernayae91@gmail.com

Формування еквідистантних робочих поверхонь прецизійних спряжень деталей машин

Показано, що процеси триботехнологій припрацювання і відновлення з накладанням змінного струму та формуванням еквідистантних спряжених поверхонь є найбільш ефективними у порівнянні з іншими методами. Виділені основні фактори та дано їх характеристику. Розглянуті етапи припрацювання і відновлення поверхонь тертя при використанні змінного електричного струму. З'ясована сутність методу накладання змінного струму на спряжені деталі машин й отримання еквідистантних робочих поверхонь. Виявлено істотне покращення триботехнічних характеристик поверхонь тертя, їх формування під дією електрохімічної і механічної складових. Показано можливість припрацювання основних спряжень деталей гідроагрегатів, використання розроблених триботехнологій припрацювання і відновлення на основі законів електрохіміко-механічних процесів. З'ясовано дію електроліту, як рідкого адсорбенту при адсорбції на поверхнях тертя. Одним з таких адсорбантів використана олеїнова кислота. Показано, що при цьому найкращого результату можна досягти протіканням електрохімічної реакції травлення поверхонь спряжених деталей та їх механічного активування. В запропонованих технологіях використовується робоча напруга, яка не перевищує 5 В змінного електричного струму, а щільність струму 10^4 А/м^2. Стравлювання поверхонь відбувається з частотою анодної поляризації. Електрохімічне травлення при припрацюванні базується на законах Фарадея. Реалізація зазначеного стравлювання відбувається за допомогою пасивуючого електроліту, що забезпечує максимальне вирівнювання (еквідистантність) поверхонь впливом відносної швидкості руху і навантаження. Зазначено, що розроблені технології залежать від характеру експлуатації та режимів тертя спряжень деталей вузлів, систем і агрегатів машин.
прецизійні деталі, еквідистантні поверхні, спряження деталей, змінний електричний струм, електрохіміко-механічні процеси, припрацювання

Постановка проблеми. Проблема підвищення надійності мобільної сільськогосподарської (МСГТ) та автотранспортної техніки (АТТ) безпосередньо пов'язана з процесами зміни технічних параметрів спряжень деталей систем і агрегатів [1]. Інтенсивність і характер протікання цих процесів істотно залежать від відхилень форми і точності взаємного розташування робочих поверхонь деталей в спряженнях в процесі експлуатації. Через втрату еквідистантності та точності розташування деталей і їх переміщень в процесі експлуатації машин відбуваються заїдання, заклинювання, удари, вібрації, порушення герметичності спряжень та інші проблеми. Зазначене призводить до відмов, зниження ресурсу, значних енергетичних втрат, перегріву спряжень агрегатів, підвищення витрати паливно-мастильних матеріалів. Ефективність реалізації процесів припрацювання та відновлення ресурсовизначальних спряжень деталей можливо забезпечити високу якість і усунути відхилення взаємного розташування і форми деталей, а також підготовити їх до сприйняття експлуатаційних навантажень [2].

Разом з тим, більшість методів припрацювання і відновлення спрямовані на прискорення процесів, а не на перенесення умов пристосування спряжених поверхонь на початковий період їх роботи, що є недостатньо ефективним при підготовці робочих поверхонь деталей. Відсутність відомостей про динаміку зміни технічного стану спряжень деталей не дає можливості ефективно управляти процесами припрацювання та відновлення, які спостерігаються через певний тривалий час або з надмірним зносом.

Застосування ряду покриттів і захисних плівок в спряженнях деталей створює перехідний шар, що приховує неприпрацьовані поверхні, і після зносу, під час експлуатаційних навантажень, може викликати задири і схоплювання. Використання присадок в оливу зменшує коефіцієнт тертя, але ускладнює припрацювання деталей з геометричними відхиленнями. Їх додавання до палива – призводить до утворення абразивних продуктів зносу, що забезпечує усунення геометричних відхилень за рахунок надлишкового зносу. Використання некерованих електричних полів і неефективних олив обумовлює наявність абразивних продуктів за рахунок електроерозійного дії на робочу поверхню деталі, призводить до максимального локального зміцнення і, в той же час, зменшує ресурс [3].

При використанні змінного електричного струму та електроліту в процесах припрацювання прискорюється взаємне пристосування поверхонь деталей з різних матеріалів, типів спряжень і видів геометричних відхилень і одночасно реалізується ефективне підвищення надійності вузлів, систем і агрегатів машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досвід експлуатації МСГТ і АТТ показав, що застосування гідрооб'ємних приводів (ГОП) замість механічних передач дозволяє підвищити продуктивність машин на 20...45%. ГОП вільно комплектується в просторі та дозволяє здійснювати передачу енергії на великі відстані, простіше в експлуатації, дозволяє надійно охороняти спряження деталей трансмісії від перевантажень, автоматизувати управління МСГТ і АТТ [4]. Недоліками ГОП перед механічною передачею (МП) є: зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) на 5...10%; зменшення моторесурсу до 3...5 тис. мото-год. замість 7...10 тис. мото-год.; зміна параметрів ГОП в процесі експлуатації за рахунок зносу деталей гідромашин, що призводить до збільшення витоків робочої рідини і зниження об'ємного ККД гідромашини. При всьому різноманітті конструкцій прецизійні спряження гідравлічних агрегатів мають характерні ознаки, що дозволяють розділити їх на п'ять типів за умовами навантаження і, як наслідок, по типовим причин підвищення тертя і пошкодження деталей (рис. 1).

Діаметральний зазор прецизійного спряження, в залежності від розміру деталей і призначення, може бути від 2 мкм до декількох десятків мікрометрів. Основними вимогами, що пред'являються до прецизійним спряжень, є висока стабільність малих сил тертя і хороша герметичність. При цьому під ушкодженнями розуміються утворені в процесі роботи будь-які зміни геометрії, що підвищують шорсткість поверхні і структурні зміни матеріалу деталей [5-6].

Важливе місце при дослідженні зношування деталей в процесі експлуатації машин займають роботи [7-9], по вивченню структурних змін в матеріалах деталей спряжень і впливу на них навантаження і зовнішнього середовища. Особливий інтерес при вивченні механізму і причин пошкоджуваності деталей трибоспряжень представляють роботи по дослідженню умов схоплювання металів. Вивченню своєрідного процесу переносу матеріалів деталей при терті без пошкодження поверхні і без істотного підвищення тертя присвячені роботи [10,11].

Необхідною умовою для розуміння ролі зовнішнього середовища в процесах тертя, зношування і пов'язаної з ними пошкоджуваності деталей є результати, досягнуті у вивченні формування на їх поверхнях змащувальних плівок та несучої здатності [12,13]. Особливий напрямок у вивченні впливу поверхнево-активних середовищ (ПАС) на стан матеріалів деталей спряжень в умовах механічного навантаження було розглянуто в роботі [14].

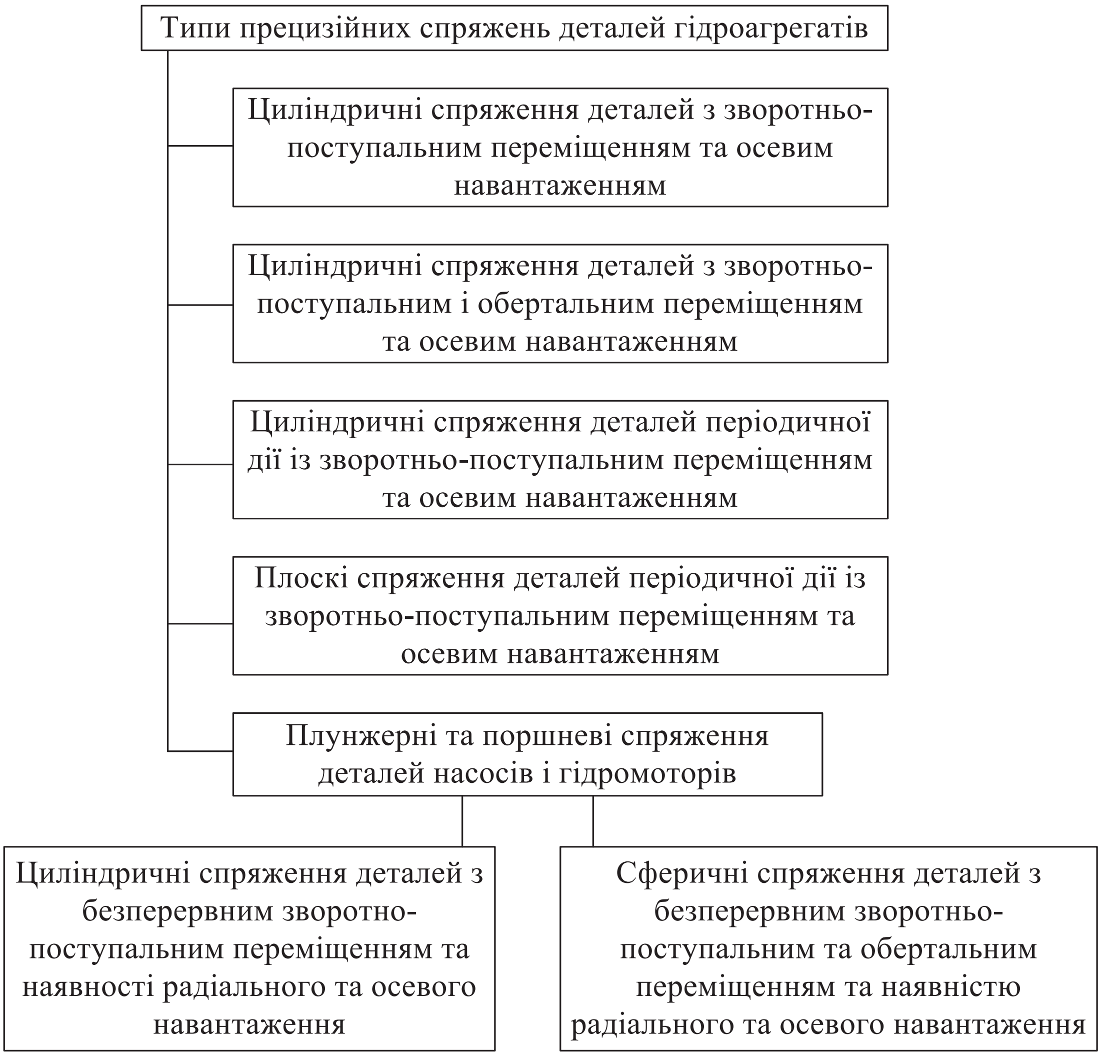


Рисунок 1 – Блок-схема існуючих типів прецизійних спряжень деталей гідроагрегатів
Джерело: розроблено автором

Однією з умов успішного дослідження механізму пошкоджуваності деталей при терті є досягнення в області розв'язання контактних завдань [15-18]. Дослідження впливу шорсткості, механічних властивостей і навантаження на формування площ контакту і контактних тисків відображені в роботах [19-21]. Значний внесок у вивчення процесів тертя і стану поверхневого шару деталей машин при фрикційної контакті відображений в роботах [22-25]. Аналіз режимів припрацювання, її тривалості в випробуваннях, проведених на ряді гідроагрегатних заводів, свідчить, що навіть для однотипних деталей і їх спряжень для гідроприводу час припрацювання змінюється від декількох годин до декількох десятків годин [26].

У гідравлічних об'ємних передачах використовуються гідронасоси і гідромотори аксіально-плунжерного типу. Одним з основних спряжень, що лімітують довговічність цих гідроагрегатів, є сферичне спряження "сталевий плунжер-бронзовий підп'ятник". Під час роботи аксіально-плунжерний насос створює високий тиск, до 300 МПа, основна частина якого, сприймається сферичним спряженням [27].

Технологія ремонту сферичного спряження плунжера із застосуванням абразивного притирання із застосуванням пасти ГОІ і мікропорошків різної зернистості проводиться в два-три етапи (чорнова, чистова, остаточна). Під час притирання електродвигун разом з притиром повертають навколо вертикальної осі каретки верстата, завдяки чому здійснюється обробка всієї площі сфери. У виготовлених підп'ятниках розсвердлюють сферу, розточують її фасонним різцем, потім за допомогою спеціального притиру і додаванням пасти ГОІ здійснюють притирання [28].

Абразивне притирання знайшло широке застосування при ремонті і виготовленні не тільки розглянутого спряження, але й інших типів прецизійних спряжень гідроагрегатів, тому що технологія відновлення аналогічна технології виготовлення [29]. В процесі мікрорізання відбувається зняття припуску металу, необхідного для усунення геометричних відхилень і розмірів оброблюваної заготовки, а також дефектного шару, створеного попередніми операціями. При пластичній деформації відбувається згладжування нерівностей поверхні і заполірування їх западин. Процес завершує формування шорсткості доведеної поверхні, висота мікронерівностей якої, при цьому, дорівнює сотих часток мікрометра [30]. Слід виділити і суттєві недоліки абразивної притирання прецизійних деталей гідроагрегатів: наявність технологічних забруднень; небезпека шаржування абразивних частинок в м'які матеріали; невідповідність шорсткості умов роботи; неповне формування фактичної площі плями контакту; негативний градієнт механічних властивостей по глибині.

В процесі абразивного притирання виникає небезпека шаржування абразивних частинок в поверхню оброблюваних деталей, оскільки підп'ятники аксіально-плунжерного насоса виготовляються з бронзи марки БрАЖ 10-4-4. Ці частинки не вимиваються навіть при використанні ультразвукового очищення. Вони залишаються в деталях і під час роботи, потрапляючи в робочу рідину і викликаючи підвищений знос насоса і всіх систем гідроприводу. Тому деталі, виготовлені з м'яких матеріалів (бронза, алюміній), повинні піддаватися безабразивній обробці [31].

Великі труднощі виникають при невідповідності шорсткості поверхонь деталей спряжень деталей умов роботи. Абразивне притирання в режимі полірування забезпечує зниження висоти шорсткості [32]. Але в результаті аналізу певних експериментів, встановлено, що зі зменшенням шорсткості поверхні зразків зменшується навантаження, необхідна для схоплювання, збільшується площа контакту і одночасно погіршуються умови змащування, що ускладнює проникнення рідини до поверхонь трибоспряжень [33]. Наявність на поверхні пор, які відіграють роль оливних кишень, ефективним чином забезпечує збереження в зоні контакту оливного шару, що розділяє спряжені поверхні. Це особливо важливо для деталей, що працюють в умовах великих контактних навантажень і граничного мащення [34].

Численними дослідженнями встановлено, що зниження ресурсу спряження деталей викликається неповним формуванням фактичної площі плями контакту і фактична опорна поверхня деталей після їх механічної обробки надзвичайно мала [35,36]. Дуже важливо при припрацюванні забезпечити негативний градієнт механічних властивостей по глибині припрацювання поверхні деталі. Аналіз відмов гідроприводів в процесі проведення припрацювання показує, що основне число відмов обумовлено ушкодженнями і руйнуваннями в спряженнях внаслідок схоплювання спряжених поверхонь деталей [37]. Після абразивного притирання, особливо в режимі полірування, має місце наклеп. При цьому твердість поверхневого шару збільшується в 1,5...3,0 рази, а глибина наклепаного шару, в залежності від матеріалу деталі, становить 15...20 мкм. Чим м'якше матеріал, тим більша ступінь його наклепування. Тому має місце негативний градієнт механічних властивостей, тобто міцність адгезійного зв'язку поверхневих шарів вище, ніж міцності нижчих, що і є причиною глибинного схоплювання матеріалу деталі. В цьому випадку руйнування відбувається в більш слабкою локальної області на значній глибині.

Постановка завдання. Метою даної роботи є з'ясування сутності методу формування еквідистантних робочих поверхонь деталей при накладанні змінного електричного струму і використанні електролітів.

Виклад основного матеріалу. Ефективність застосування триботехнологій припрацювання та відновлення для усунення геометричних відхилень спряжень деталей систем і агрегатів МСГТ і АТТ та підвищення їх довговічності спочатку виявлена завдяки проведеним експериментальних досліджень та особливостей процесів тертя [38]. Це дало можливість поліпшити експлуатаційні характеристики поверхонь тертя основних спряжень вузлів і агрегатів машин. Інтерес викликають теоретичні дослідження, спрямовані на розкриття механізму формоутворення еквідистантних спряжених поверхонь тертя деталей в різних режимах тертя [39]. Схема впливу сукупності факторів запропонованого методу на інтенсивність зносу і знімання матеріалів деталей, представлена на рис.2.

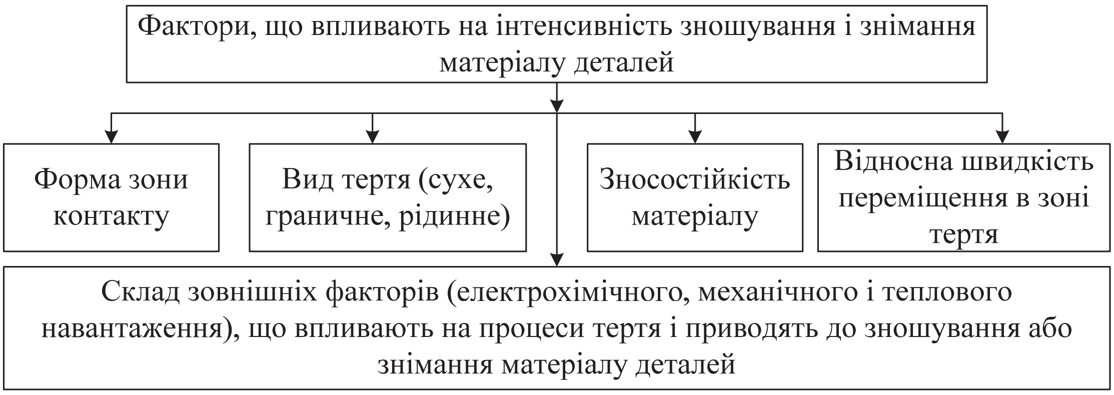


Рисунок 2 – Фактори, що впливають на інтенсивність зношування і знімання матеріалу в процесі реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення з використанням змінного електричного струму

Джерело: розроблено автором

Можна бачити, що основними факторами методу припрацювання і відновлення є: форма зони контакту; вид і режим тертя; властивості поверхонь тертя; фактори зовнішнього впливу [40]. Очевидно, що від початкової геометрії робочих поверхонь деталей істотно залежить процес припрацювання і відновлення, якість робочих поверхонь, зносостійкість і надійність роботи спряжень деталей [41]. Поверхні тертя спряжених деталей при реалізації методів триботехнічного припрацювання та відновлення зазнають три основних етапи (табл.1), режим тертя на даних етапах визначається числом критерію Зоммерфельда S_m.

Таблиця 1 – Етапи припрацювання та відновлення поверхонь тертя спряження деталей при використанні змінного електричного струму

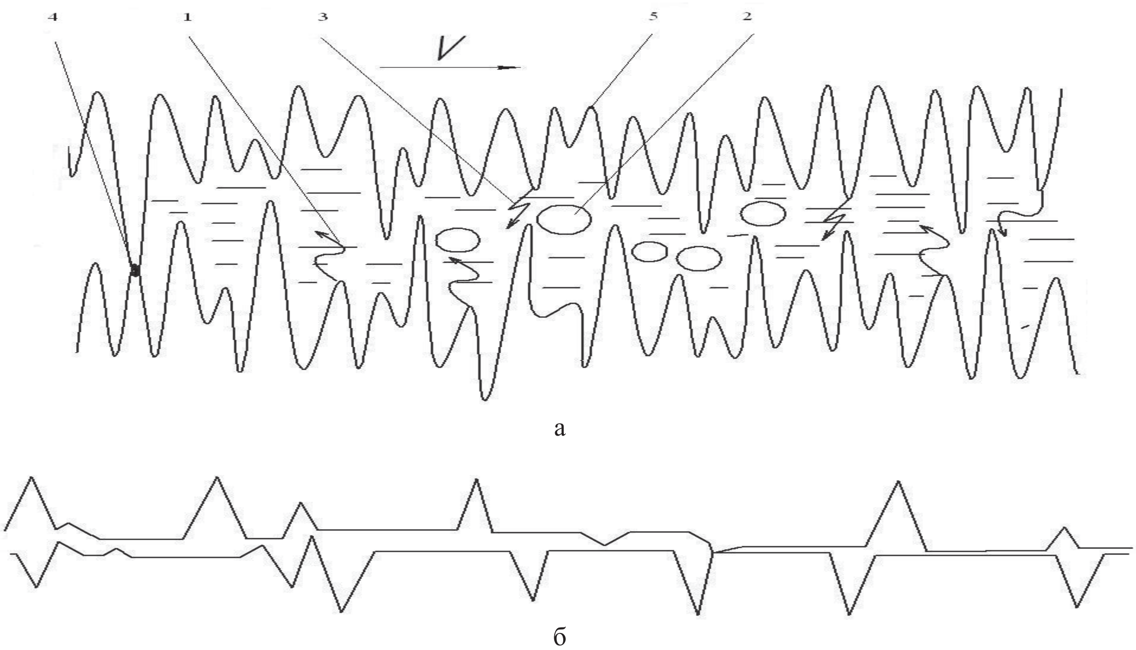
I етап	Формування початкової площі контакту; граничний режим тертя, $S_m<10^{-5}$; прояв механічної складової процесів: механічне стирання або відтискання пластичного матеріалу.
II етап	Зростання площі плями контакту; перехід від напіврідинного режиму тертя до гідродинамічного, $S_m \approx 10^{-5}$; прояв електрохімічної і механічної складових процесів.
III етап	Остаточне формування площі плями контакту; режим гідродинамічного тертя, $S_m>10^{-5}$; прояв електрохімічної складової процесів.

Джерело: розроблено автором

У початковий період часу (S_m<10^{-5}), відбувається механічне стирання або відтискання пластичних матеріалів у поверхневому шарі спряжених деталей та формування початкової площі контакту (І етап) [42]. Знаючи, що значення критерію Зоммерфельда $S_m=10^{-5}$ відповідає перехідному режиму тертя, легко встановити зміну станів оливи при припрацюванні спряжень поверхонь в процесі тертя. З його зростанням можливий перехід від напіврідинного тертя до гідродинамічного (ІІ етап), а при гідродинамічному режимі тертя (S_m>10^{-5}) остаточно формується пляма контакту в трибоспряженні деталей (ІІІ етап) [43].

В запропонованих триботехнологіях інноваційним рішенням є використання методу накладання змінного електричного струму малої напруги і великої по величині струму на спряженнях деталей різного типу. Характерним також є наявність електроліту в зазорі між деталями, трибологічно активних присадок до олив, а також використання матеріалів, що є трибологічно ефективними в режимах сухого тертя [44].

Метод накладання змінного електричного струму покращує триботехнічні характеристики поверхонь тертя, зміна форми робочих поверхонь деталей відбувається на всіх трьох етапах припрацювання і відновлення, що неможливо при звичайних методах, які базуються на механічному зношуванні або створенні різного виду плівок на поверхнях тертя [45]. Формоутворення робочих поверхонь при реалізації запропонованих триботехнологій відбувається завдяки електрохімічної і механічної складових впливу на матеріали деталей в процесі припрацювання і відновлення (рис.3).



а

б

1 – періодичне розчинення матеріалу поверхні деталі; 2 – газоутворення;
3 – періодичне спрацювання під дією електричного поля змінного струму;
4 – механічне спрацювання; 5 – формування поверхневих плівок

Рисунок 3 – Початковий (а) і припрацьований (б) стан поверхонь спряження деталей при реалізації процесів, що впливають на їх формоутворення під дією змінного електричного струму та наявного електроліту

Джерело: розроблено автором

Виявлено, що вплив різних чинників на спряження деталей дозволяє формувати плосковершинний рельєф шорсткості поверхонь. При цьому механічне активування сприяє травленню вершин виступів, а наявність поверхневих плівок і процесу газоутворення – зменшує розтравлювання западини рельєфу поверхонь деталей.

Проблема підвищення надійності, зокрема, довговічності силових агрегатів машин, найбільш гостро відчувається у сфері технічного сервісу. Це спостерігається у випадках коли термін служби відремонтованого агрегату значно менше 80% терміну служби нового, при високій вартості сервісу, і ймовірність безвідмовної роботи багато в чому залежить від технічного стану і показників зношування основних спряжень деталей. Довговічність відремонтованих ДВЗ, перш за все, визначається відхиленнями форми і взаємного розташування корінних і шатунних підшипників колінчастого валу.

Відомо, що геометрія спряжень деталей значно відрізняється від правильної геометрії і шорсткість їх робочих поверхонь після механічної обробки часто не відповідає оптимальним значенням і порушується їх еквідистантність. Це призводить до підвищення питомих тисків в зоні контакту, безпосередньому контактування металевих поверхонь в наслідок чого утворюються задири, схоплювання і підвищеного зношування припрацьованих поверхонь. У цих умовах тільки високоефективні методи і способи припрацювання здатні компенсувати відхилення поверхонь тертя основних спряжень деталей.

Для компенсації неточностей форми деталей і похибок складання вузлів, системи і агрегати МСГТ і ТМ піддають обкатці, при якій відбувається припрацювання і відновлення поверхонь тертя. Найбільш ефективним прийомом прискорення припрацювання і відновлення з підвищенням показників надійності є використання суміщених процесів впливу на припрацьовані поверхні.

Розгляд факторі, що впливають на інтенсивність знімання матеріалу робочих поверхонь спряжених деталей при припрацюванні і відновлені [1,2], впливають: форма зони контакту, вид тертя, властивості поверхонь тертя і фактори зовнішнього впливу. При цьому важливим є вплив початкової геометрії поверхонь тертя на протікання процесу припрацювання і відновлення поверхонь тертя.

Характерним є і той факт, що зміна форми і стану поверхонь у деталей спряжень відбувається на всіх трьох етапах припрацювання. Звичайні методи припрацювання і відновлення, що базуються на механічному зношуванні або створенні на поверхнях тертя різного виду плівок, не забезпечують якісні робочі поверхні. Припрацювання і відновлення спряжень електрохіміко-механічним методом з використанням змінного струму дозволяє компенсувати геометричні відхилення форми деталей, як показано на прикладі циліндричного спряження конусного ролика і опори.

Під впливом різних факторів процесів запропонованих триботехнологій припрацювання і відновлення дозволяє формувати зносостійкі поверхні. Механічне активування сприяє травленню електролітом робочих поверхонь деталей спряжень в зоні їх безпосереднього контакту, а наявність поверхневих плівок і газоутворення зменшує розтравлювання поверхонь, розділених електролітом.

У ряді гідроагрегатів в якості матеріалів спряжених деталей використовуються бронза і сталь, а фінішною обробкою є абразивне доведення. При такій обробці можлива неякісна підготовка робочої поверхні і відхилення геометрії деталей. Через це має місце мала фактична площа плями контакту, що призводить до значного припрацювального зносу при допустимих зазорах в спряженні 0,002...0,006 мм, причому зношування супроводжується схоплюванням, натирами і т.п. [4]. Крім того, в процесі абразивного доведення можливо шаржування поверхні, що значно збільшує знос в експлуатації [32].

Можливим шляхом вирішення завдання підвищення якості припрацювання основних спряжень деталей гідроагрегатів може бути розробка ТТП і ТТВ на основі законів електрохіміко-механічних процесів [46]. Однак для даних спряжень на застосовуваних електролітах вона ускладнена, оскільки при великих навантаженнях і малих зазорах має місце граничний режим тертя, що зменшує дію електрохімічної складової на процес припрацювання і відновлення.

У даній ситуації більш ефективними є використання рідких адсорбентів в складі електроліту, які адсорбуючись на поверхнях тертя запобігають розвитку на них тріщин. У той же час, при механічній взаємодії поверхонь спостерігається їх активація в локальних місцях, очищенням від адсорбентів, і забезпечення електрохімічної взаємодії. Одним з таких адсорбентів є олеїнова кислота, широко застосовувана як присадка до технологічних олив, а в гідравлічних машинах – як протизадирний засіб [47]. Таким чином, на шорсткість спряжених поверхонь деталей впливають як режими припрацювання, так і склад електроліту.

Крім цього в зазорі спряжень деталей виявлено газоутворення і екранізація мікровпадин поверхні бульбашками газу зменшує їх розтравлювання, що сприяє зниженню шорсткості поверхні. Виходячи з такого механізму згладжування шорсткості, можна запропонувати інший шлях блокування поверхні мікровпадин – використанням адсорбентів. При цьому невирішеним завданням залишається виявлення впливу олеїнової кислоти на шорсткість поверхонь при їх електрохіміко-механічній взаємодії. Тому необхідний пошук такого складу електроліту, при якому можливий процес припрацювання при граничному режимі тертя.

Відзначимо, що основною перевагою запропонованої ТТП і ТТВ є поєднання механічного активування спряжених поверхонь деталей при їх безпосередній взаємодії і електрохімічного травлення – при відокремленні шаром електроліту. Найкращих результатів можна досягти, керуючи процесом протікання електрохімічної реакції травлення поверхонь спряжених деталей та їх механічного активування. Спорідненими до електрохімічного травлення є наступні процеси: електрохімічна обробка (ЕХО), електрохімічна розмірна обробка (ЕХРО), електрохімічне полірування (ЕХП). Основними відмінностями цих процесів є більш низька робоча електрична напруга і щільність струму. При використанні пропонованої ТТП і ТТВ звичайна робоча напруга електричного змінного струму не перевищує 5 В, а щільність струму – 10^4 А/м^2, в той час як, при ЕХП електрична напруга становить – 10...20 В, а щільність струму – 10^5 А/м^2.

Пропоновані ТТП і ТТВ використовують змінний електричний струм, що дозволяє стравлювати поверхні спряжених деталей з частотою анодної поляризації. ТТП і ТТВ подібне до електрохімічного полірування, хоча тип електроліту, протікання електрохімічних реакцій і механізми впливу на поверхні спряжених деталей різні.

Електрохімічне травлення при припрацюванні базується на фундаментальній електрохімічній теорії, основу якої складають закони Фарадея. Маса стравленого металу при цьому визначається за рівнянням:

$$m_{cmm} = \frac{M_a It}{nF_ф} = c_{эх} It \,, \tag{1}$$

де m_{cmp} – маса стравленого металу, г;

M_a – атомна вага;

I – струм, А;

n – валентність;

$F_ф$ – постійна Фарадея;

t – тривалість процесу, год;

$C_{ex}=M_a/n\cdot F$ – електрохімічний еквівалент металу, г/А·год.

Відзначимо, що за рівнянням (1) в ідеальному випадку, можна оцінити кількість стравленого матеріалу при електрохімічній реакції. Хоча, реальний стан спряжених поверхонь деталей, газоутворення в зазорі, концентрація електроліту і багато інших чинників можуть змінити отримані результати.

Наявність шару електроліту з низькою електропровідністю між спряженими поверхнями тертя деталей буде, в основному, визначати електрична робоча напруга процесу U_p. При граничному режимі тертя спостерігається безпосередній металевий контакт, а електрична робоча напруга процесу є мінімальною. Малі напруги електричного струму при припрацюванні не призводять до електрохімічного травлення поверхонь, а основним фактором в таких умовах є механічне зношування.

З формуванням початкової площі контакту режим змащення переходить у перехідній [48]. Робоча напруга збільшується і починається процес електрохімічного травлення. З ростом розділової плівки електроліту в зазорі спряжених деталей відбувається повне розділення їх поверхонь, що характерно для гідродинамічного режиму змащення. Електрична робоча напруга процесу U_p при цьому наближається до напруги холостого ходу U_{xx} джерела струму. Виявлено, що наявність розділової плівки електроліту можна визначити за критерієм Зоммерфельда S_m, рівному відношенню добутку динамічної в'язкості електроліту μ, та швидкості взаємного переміщення v до тиску в контакті p: $S_m = \eta v/p$.

Підвищення ефективності ТТП і ТТВ забезпечується критерієм Зоммерфельда S_m зі значенням порядку 10^{-5}, а значення робочої напруги електричного струму – U_p має наближатися до напруги холостого ходу U_{xx}, яке підбирається експериментально для забезпечення максимальної швидкості електрохімічного знімання. Реалізація зазначеного стравлювання відбувається за допомогою пасивуючого електроліту, що забезпечує максимальне вирівнювання поверхні:

$$\begin{cases} S_m = \eta \upsilon / p \to 10^{-5}; \\ U_p \to U_{xx}; \\ \left(E_c - E_a\right) \to \max. \end{cases} \tag{2}$$

Змінити значення критерію Зоммерфельда S_m можна за допомогою швидкості взаємного переміщення припрацьовуваних поверхонь v, тиску в контакті спряжених поверхонь p і зміною в'язкості електроліту η.

Технологічно на припрацювання і відновлення спряжень найлегше впливати за допомогою швидкості v і навантаження p, а відгуком процесу можна взяти електричну робочу напругу процесу U_p, що визначаються співвідношенням:

$$\begin{cases} U_p < U_{xx};\ v \to \max; \\ U_p \approx U_{xx};\ v = const;\ p \to n_н \cdot p, \end{cases} \tag{3}$$

де $n_н$ – коефіцієнт підвищення навантаження.

Якщо робоча напруга процесу U_p змінного електричного струму нижче напруги холостого ходу U_{xx}, то швидкість взаємного переміщення робочих поверхонь деталей слід підвищити, для створення мінімальної розділової плівки електроліту, при якій ефективність протікання просів максимальна. Показано, що в разі підвищення робочої напруги U_p до значень близьких до напруги холостого ходу U_{xx}, доцільно забезпечити мінімальну роздільну плівку електроліту підвищенням навантаження p на трибоспряження деталей.

Протікання процесів припрацювання і відновлення поверхонь тертя спряжених деталей залежить від характеру їх експлуатації та умов тертя. Умови зовнішнього тертя поверхонь спряжених деталей визначаються наявністю розділового мастильного матеріалу між ними [49]. Режим тертя можливо визначити за діаграмою Герси-Штрибека, тобто за числом Зоммерфельда $\eta\omega/p$ або характеристикою режиму тертя – $\eta n/p$, де η – динамічна в'язкість мастильного матеріалу, ω,n – кутова швидкість і частота обертання валу. З ростом числа Зоммерфельда тертя в спряженнях переходить від граничного до перехідного режиму, а потім до гідродинамічного [50]. Викристовуючи формулу залежності коефіцієнта тертя від режимів тертя в спряженні можливо розглянути добуток коефіцієнта тертя $f_{тр}$ на товщину розділового шару мастила h від умов тертя:

$$f_{тр}h=\eta\,\nu/p, \tag{4}$$

де ν – швидкість переміщення поверхні тертя. Права частина цього виразу $\eta\nu/\rho$ є характеристикою режиму рідинного тертя. З цього випливає, що процес припрацювання і відновлення за однакових зовнішніх навантажень залежатиме від того, як розвивається площа плями контакту $S_к$ в спряженні деталей. Вид спряження деталей в свою чергу впливає на зміну площі контакту $S_к$ в процесі припрацювання. Крім цього на характер припрацьовуваності і відновлення, здійснює вплив величина триботехнічних характеристик контакту деталей, що істотно впливає на геометричні відхилення, які виникають в процесі виготовлення і ремонту деталей.

Висновки.

1. Дано порівняльний аналіз різних технологій припрацювання при формуванні еквідистантних спряжених поверхонь деталей вузлів, систем і агрегатів машин.

2. З'ясовані фактори, що впливають на інтенсивність зносу і знімання матеріалу та побудовано схему їх впливу на процеси тертя і зношування.

3. Виділені основні етапи припрацювання та відновлення поверхонь тертя спряжених деталей при використанні змінного електричного струму. При цьому на основі критерію Зоммерфельда дано характеристики процесів, що відбуваються і впливають на режим тертя у спряженнях деталей.

4. Розглянуто процеси, що беруть участь у формуванні робочих поверхонь при реалізації запропонованих триботехнологій припрацювання і відновлення. Визначено механізм формування рельєфу шорсткості поверхонь деталей. З'ясовано які процеси є активуючими, а які стримують розтравлювання.

5. Обґрунтовано сукупність факторів запропонованих триботехнологій припрацювання і відновлення, що дозволяють формувати зносостійкі поверхні. Розглянуто це на прикладі основних спряжень деталей гідроагрегатів, в яких використовуються бронза і сталь.

6. Виявлено, що в зазорі спряжень деталей газоутворення і екранізація мікровпадин поверхні бульбашками газу зменшує їх розтравлюванню, що сприяє зниженню шорсткості поверхонь деталей, а отже підвищенню їх якості.

7. Показано, що механізм електрохімічного травлення з формуванням еквідистантності і застосуванні змінного електричного струму базується на фундаментальній електрохімічній теорії з наявністю пасивуючого електроліта.

Список літератури

1. Аулін В.В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / Хмельниц. нац. ун-т. Хмельницький, 2015. 360 с.

2. Замота Т.Н., Аулин В.В. Управление процессами приработки основных сопряжений деталей машин при изготовлении и ремонте: монография. Кировоград: Издатель Лысенко В.Ф., 2015. 304 с.
3. Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення: монографія. / Аулін В.В. та ін. Кропивницький: Лисенко В. Ф., 2016. 303 с.
4. Повышение функциональной надежности гидропривода грузоподъемных устройств / Бекаев А. А. и др. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. 2014. №2 (20). С. 8-13.
5. Четошников В. И., Деев А. Г. Обоснование возможности уменьшения зазора в сопряжении поршень-цилиндр тракторного двигателя с воздушным охлаждением. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2010. №65 (3). С. 89-94.
6. Гасангусенов О. Г. Расчетно-экспериментальное исследование влияния температуры, нагрузки и скорости скольжения на долговечность сопряжения канавка поршня – поршневое кольцо малоразмерного дизеля. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. 2013. №1. С. 111-116.
7. Гусев А.С., Щербаков В.И., Стародубцева С.А., Гребенкина М.И. Расчет прочностной надежности и усталостной долговечности элементов конструкций мобильных машин, нагруженных случайными изгибающими и крутящими моментами. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. 2013. 1. №2 (16). С. 54-57.
8. Ибатуллин И. Д. Кинетический критерий повреждаемости и разрушения поверхностных слоев, деформируемых трением. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*. 2006. №2(2). С.204-209.
9. Надежкин А. В., Даничкин В. Н. Идентификация технического состояния крейцкопфного дизеля по данным трибомониторинга на основе имитационного моделирования. *Научные труды Дальрыбвтуза*. 2011. № 23. С. 89-97.
10. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е., Колодкин П.С. Влияние динамических свойств взаимодействующих подсистем на эволюцию формирования избирательного переноса в узлах трения. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2019. №19 (2). С. 104-112.
11. Механические свойства сервовитных пленок, формирующихся при трении в водных растворах карбоновых кислот / Бурлакова В.Э., Дроган Е.Г., Тюрин А.И., Пирожкова Т.С. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2018. № 18 (3). С. 280-288.
12. Почкайло К. А. Моделирование противоизносных свойств моторных масел в присутствии присадок. Успехи в химии и химической технологии. 2015. №29 (160). С. 89-91.
13. Траскин В. Ю., Скворцова З. Н. Оценка адгезионной прочности на разрыв и истирание по работе адгезии жидкости к твердому телу. *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия*. 2004. № 45 (6). С. 376-381.
14. Щукин Е.Д. Влияние активной среды на механическую устойчивость и повреждаемость поверхности твердого тела. *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия*. 2012. № 53 (1). С. 50-72.
15. Кузьменко А. Г., Диха О. В., Дослідження зносоконтактної взаємодії змащених поверхонь тертя: Монографія. Хмельницький: ХНУ, 2005. 183 с.
16. Кузьменко А.Г. Методи розрахунків і випробувань на зношування та надійність: монографія. Хмельницький: ТУП, 2002. 151 с.
17. Сорокатый Р.В. Метод трибоэлементов: монография. Хмельницкий: Изд-во ХНУ. 2013. 240 с.
18. Аулін В.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В. Модель надійності деталей транспортних машин за процесами реалізації триботехнологій їх припрацювання і відновлення. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр.* Кропивницький : ЦНТУ. 2019. Вип. 2 (33). С. 50-64.
19. Родимов Г. А., Папшев В. А. Обеспечение качества соединений путем фрикционного упрочнения поверхностей при сборке. *Труды Международного симпозиума "Надежность и качество"*. 2012. №2. С. 178-180.
20. Влияние физико-механических характеристик материала изделия на его износостойкость / Волков И.В., Дегтярева Ю.Ю., Лубенская Л.М., Николаенко А.П. *Вісник двигунобудування*. 2006. №4. С. 126-130.
21. Прохоров В. Ю., Быков В. В. Пути повышения долговечности и износостойкости подшипника скольжения навесного технологического оборудования. *Труды Международного симпозиума "Надежность и качество"*. 2017. №1. С. 77-79.

22. Силаев Б.М. Решение задач о трении и изнашивании поверхностей на основе обобщенной модели контактного взаимодействия твердых тел. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. № 13 (4-3). С. 1235-1237.
23. Колесников И. В. Трибоэлектрические явления на фрикционном металлополимерном контакте и их зависимости от температуры. *Инженерный вестник Дона*. 2014. № 31 (4-1). С. 70-75.
24. Корнев В. М. Количественное описание эффекта ребиндера (хрупкие и квазихрупкие тела): от замедления разрушения до самопроизвольного диспегирования. *Физическая мезомеханика*. 2003. № 6 (3). С. 9-18.
25. Жорник В.И. Формирование композитного слоя триботехнического назначения электрохимическим хромированием и химической обработкой в водной оксидосодержащей суспензии. *Вестник Витебского государственного технологического университета*. 2014. № 26. С. 121-135.
26. Дроздовский Г. П., Юсенхан В. И. Обеспечение функциональной надежности элементов гидропривода оборудования лесных машин их тестовым диагностированием. *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2008. № 21. С. 200-206.
27. Аулін В.В., Чернай А.Є., Замота Т.М. Шляхи розв'язання проблеми підвищення ресурсу золотникового гідророзподільника мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки. *Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь*: ІІІ Всеукр. наук.- практ. конф. : тез. доп., 29-30 бер. 2017 р., Житомир. Житомир, 2017. С. 236-237.
28. Аулін В.В., Замота Т.М., Чернай А.Є. Підвищення довговічності золотникового гідророзподільника МСГТ та АТТ триботехнологіями припрацювання і відновлення. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів : науковий журнал*. 2017. № 8. С.121-127.
29. Величко С. А., Чумаков П. В., Коломейченко А. В. Оценка технического состояния силовых гидроцилиндров серии с навесных гидросистем тракторов. *Инженерные технологии и системы*. 2019. № 29 (3). С. 396-413.
30. Дмитриев В. А. Стратегии внедрения инновационных технологий механической обработки. *Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования*. 2015. №4 (9). С. 95-100.
31. Озерский А. И. Повышение эффективности гидросистем мобильных машин и оборудования, работающих в тяжёлых условиях эксплуатации. Известия высших учебных заведений. *Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2009. №3. С. 79-84.
32. Ковалев М. А. Упреждающее обслуживание гидросистем на основе анализа параметров частиц загрязнения рабочей жидкости. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*. 2009. №3(1). С. 89-96.
33. Кузьмінський Р. Д. Структура, параметри та ефективність технологічних процесів ремонту. *Вісник ЛДАУ: Агроінженерні дослідження*. Львів. 2005. №9. С.50-60.
34. Калимуллин Р. Ф., Коваленко С. Ю. Концепция ресурсосберегающей эксплуатации автомобильных двигателей. *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2013. № 2 (71). С. 29-34.
35. Чуфистов Е. А., Родайкин Н. В., Чуфистов О. Е. Конструкторско-технологическое повышение надежности подшипниковых узлов коленчатых валов среднеоборотных дизельных двигателей. *Известия высших учебных заведений, Поволжский регион. Технические науки*. 2009. № 2. С. 156-165.
36. Храмцов Н. В., Королев А. Е., Бай Р. Ф. Влияние конструкторско-технологических факторов на износостойкость автотракторных двигателей. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2013. №6(1). С. 127-131.
37. Корнилович, С. А. Повышение контактной выносливости поверхностного слоя зубьев шестерен при их изготовлении и ремонте. *Омский научный вестник*. 2012. №2 (110). С. 75-76.
38. Можливості технологій триботехнічного відновлення для підвищення зносостійкості і довговічності спряжень деталей транспортних засобів / Аулін В.В. та ін.. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті : наук. жур*. Луцьк : Луцький НТУ. 2018. №1(10). С. 5-11.
39. Aulin V., Lysenko S., Hrynkiv A., Velykodnyi D., Chernai A., Lukashuk A. Regularities of dynamics of change in tribotechnical characteristics of coatings formed by tribotechnologies of restoration. *Problems of tribology*. 2019. №1. P.73-80.
40. Aulin V., Lysenko S., Hrynkiv A. et al. Creation of theoretical bases of tribotechnologies of running-in and restoration as means of effective increase of operational wear resistance of motor transport and mobile agricultural machinery. *Problems of tribology*. 2021. № 1. С. 51-58.

41. Dykha A., Aulin V., Makovkin O., Lysenko S., Posonskiy S. Determining the characteristics of viscous friction in the sliding supports using the method of pendulum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 3 (7-87). Pp. 4-10.
42. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: монографія. Кіровоград: Вид. Лисенко В.Ф., 2014. 370 с.
43. Aulin V., Hrinkiv A., Dykha A. et al. Substantiation of diagnostic parameters for determining the technical condition of transmission assemblies in trucks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018. 2 (1-92). Pp. 4-13.
44. Замота Т. Н., Аулин В. В. Доводка торцевого уплотнения турбокомпрессора электрохимико-механическим способом. *Наука- образованию, производству, экономике*: Материалы Восьмой международной научно-технической конференции, г. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2010. С.92-93.
45. Aulin V., Lysenko S., Lyashuk O., Hrinkiv A., Velykodnyi D., Vovk Y., Holub D., Chernai A. Wear resistance increase of samples tribomating in oil composite with geo modifier КgMf-1. *Tribology in Industry*. 2019. 41 (2). Pp. 156-165.
46. Кроитору Д. М., Гурьянов Г.В., Бобанова Ж.И., Ботошан Н.И. Технология восстановления и упрочнения цилиндров двигателей износостойкими покрытиями. *Электронная обработка материалов*. 2008. №6. С. 16−26.
47. Замота Т. Н., Аулин В. В. Исследование процессов выделения пузырьков газа в смазывающей среде при приработке и их влияние на изменение режима трения. *Проблеми трибології,* ХНУ. 2011. №1. С.95-99.
48. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Zamota T., Pankov A., Tykhyi A. Determining the rational composition of tribologically active additive to oil to improve characteristics of tribosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 6 (12-102). Pp. 52-64.
49. Моделирование параметров трения и износа цилиндропоршневой группы двигателя в реальном эксплуатационном цикле / Шабанов А. Ю., Зайцев А. Б., Метелев А. А., Пустовалов Ю. П. *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки.* 2015. № 1 (214). С. 22-29.
50. Слободянюк Д. И., Колегаев М. А., Горюк А. А. Экспериментальные изотермы расклинивающего давления в пленках цилиндрового масла судового дизеля. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2014. № 1 (23). 42-48.

References

1. Aulin, V.V. (2015). Trybofizychni osnovy pidvyshchennia znosostiikosti detalei ta robochykh orhaniv silskohospodarskoi tekhniky [Tribophysical bases of increase of wear resistance of details and working bodies of agricultural machinery]. *Candidate's thesis*. Khmelnyts. nats. un-t. Khmelnytskyi [in Ukrainian].
2. Zamota, T.N. & Aulin, V.V. (2015). *Upravlenie processami prirabotki osnovnyh soprjazhenij detalej mashin pri izgotovlenii i remonte* [*Management of the processes of running-in of the main interfaces of machine parts in the manufacture and repair*]. Izdatel' Lysenko V.F. [in Russian].
3. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Kuzyk, O.V., Hrynkiv, A.V. & Holub, D.V. (2016). *Trybofizychni osnovy pidvyshchennia nadiinosti mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniky tekhnolohiiamy trybotekhnichnoho vidnovlennia [Tribophysical bases of increase of reliability of mobile agricultural and motor transport technics by technologies of tribotechnical restoration]*. Kropyvnytskyi: Lysenko V. F. [in Ukrainian].
4. Bekaev, A.A., Maksimov, Yu.V., Strokov, P.I., Musakova, T.V., Paponov, A.V. (2014). Povyishenie funktsionalnoy nadezhnosti gidroprivoda gruzopod'emnyih ustroystv [Improving the functional reliability of the hydraulic drive of load-lifting devices]. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta MAMI - Proceedings of the Moscow State Technical University MAMI*, *2 (20),* 8-13 [in Russian].
5. Chetoshnikov, V.I. & Deev, A.G. (2010). Obosnovanie vozmozhnosti umensheniya zazora v sopryazhenii porshen-tsilindr traktornogo dvigatelya s vozdushnyim ohlazhdeniem [Substantiation of the possibility of reducing the gap in the piston-cylinder interface of an air-cooled tractor engine]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta - Bulletin of the Altai State Agrarian University*, *65 (3)*, 89-94 [in Russian].
6. Gasangusenov, O.G. (2013). Raschetno-eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya temperaturyi, nagruzki i skorosti skolzheniya na dolgovechnost sopryazheniya kanavka porshnya – porshnevoe koltso malorazmernogo dizelya [Calculation and experimental study of the effect of temperature, load and sliding speed on the durability of the piston groove-piston ring coupling of a small diesel engine]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tehnika i tehnologiya -*

Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine equipment and technology, *1*, 111-116 [in Russian].
7. Gusev, A.S., Scherbakov, V.I., Starodubtseva, S.A. & Grebenkina, M.I. (2013). Raschet prochnostnoy nadezhnosti i ustalostnoy dolgovechnosti elementov konstruktsiy mobilnyih mashin, nagruzhennyih sluchaynyimi izgibayuschimi i krutyaschimi momentami [Calculation of Strength Reliability and Fatigue Life of Structural Elements of Mobile Machines Loaded with Random Bending and Torque Moments]. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta MAMI - Bulletin of the Moscow State Technical University MAMI, 1, 2 (16),* 54-57 [in Russian].
8. Ibatullin, I.D. (2006). Kineticheskiy kriteriy povrezhdaemosti i razrusheniya poverhnostnyih sloev, deformiruemyih treniem [Kinetic criterion for damage and fracture of surface layers deformed by friction]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Korolyova - Bulletin of the Samara State Aerospace University. Academician S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovatelskogo universiteta), 2(2),* 204-209 [in Russian].
9. Nadezhkin, A.V.& Danichkin, V.N. (2011). Identifikatsiya tehnicheskogo sostoyaniya kreytskopfnogo dizelya po dannyim tribomonitoringa na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Identification of the technical condition of a crosshead diesel engine according to tribomonitoring data based on simulation]. *Nauchnyie trudyi Dalryibvtuza - Scientific works of Dalrybvtuz, 23,* 89-97 [in Russian].
10. Zakovorotnyiy, V.L., Gvindzhiliya, V.E. & Kolodkin, P.S. (2019). Vliyanie dinamicheskih svoystv vzaimodeystvuyuschih podsistem na evolyutsiyu formirovaniya izbiratelnogo perenosa v uzlah treniya [Influence of dynamic properties of interacting subsystems on the evolution of formation of selective transfer in friction units]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta - Bulletin of the Don State Technical University*, *19 (2)*, 104-112 [in Russian].
11. Burlakova, V.E., Drogan, E.G., Tyurin, A.I. & Pirozhkova, T.S. (2018). Mehanicheskie svoystva servovitnyih plenok, formiruyuschihsya pri trenii v vodnyih rastvorah karbonovyih kislot [Mechanical properties of servovite films formed during friction in aqueous solutions of carboxylic acids]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta - Bulletin of the Don State Technical University, 18 (3),* 280-288 [in Russian].
12. Pochkaylo, K.A. (2015). Modelirovanie protivoiznosnyih svoystv motornyih masel v prisutstvii prisadok [Modeling of anti-wear properties of motor oils in the presence of additives]. *Uspehi v himii i himicheskoy tehnologii - Advances in Chemistry and Chemical Technology*, *29 (160)*, 89-91 [in Russian].
13. Traskin, V.Yu. & Skvortsova, Z.N. (2004). Otsenka adgezionnoy prochnosti na razryiv i istiranie po rabote adgezii zhidkosti k tverdomu telu [Estimation of adhesive tensile strength and abrasion according to the work of adhesion of a liquid to a solid body]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Himiya - Bulletin of Moscow University. Series 2. Chemistry*, *45 (6)*, 376-381 [in Russian].
14. Schukin, E.D. (2012). Vliyanie aktivnoy sredyi na mehanicheskuyu ustoychivost i povrezhdaemost poverhnosti tverdogo tela [Influence of the active medium on the mechanical stability and damage of the surface of a solid body]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Himiya - Bulletin of Moscow University. Series 2. Chemistry*, *53 (1)*, 50-72 [in Russian].
15. Kuzmenko, A.H. & Dykha, O.V. (2005). *Doslidzhennia znosokontaktnoi vzaiemodii zmashchenykh poverkhon tertia: Monohrafiia [Investigation of wear-contact interaction of lubricated friction surfaces: Monograph]*. Khmelnytskyi: KhNU [in Ukrainian].
16. Kuzmenko, A.H. (2002). *Metody rozrakhunkiv i vyprobuvan na znoshuvannia ta nadiinist. [Methods of calculations and tests for wear and reliability]*. Khmelnytskyi: TUP [in Ukrainian].
17. Sorokatyiy, R.V. (2013). *Metod triboelementov [Method of triboelements]*. Hmelnitskiy: Izd-vo HNU [in Russian].
18. Aulin, V.V., Lysenko, S.V. & Hrynkiv, A.V. (2019). Model nadiinosti detalei transportnykh mashyn za protsesamy realizatsii trybotekhnolohii yikh prypratsiuvannia i vidnovlennia [Model of reliability of details of transport cars on processes of realization of tribotechnologies of their running in and restoration]. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky: zb. nauk. pr. - Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences: coll. Science.* Kropyvnytskyi: TsNTU, *Vol. 2 (33),* 50-64 [in Ukrainian].
19. Rodimov, G.A. & Papshev, V.A. (2012). Obespechenie kachestva soedineniy putem friktsionnogo uprochneniya poverhnostey pri sborke [Ensuring the quality of joints by friction hardening of surfaces during assembly]. *Trudyi Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost i kachestvo" - Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality", 2,* 178-180 [in Russian].
20. Volkov, I.V., Degtyareva, Yu.Yu., Lubenskaya, L.M. & Nikolaenko, A.P. (2006). Vliyanie fiziko-mehanicheskih harakteristik materiala izdeliya na ego iznosostoykost [Influence of physical and mechanical characteristics of the product material on its wear resistance]. *Visnik dvigunobuduvannya - Bulletin of movement industry, 4,* 126-130 [in Russian].

21. Prohorov, V.Yu. & Byikov, V.V. (2017). Puti povyisheniya dolgovechnosti i iznosostoykosti podshipnika skolzheniya navesnogo tehnologicheskogo oborudovaniya [Ways to improve the durability and wear resistance of the sliding bearing of mounted technological equipment]. *Trudyi Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost i kachestvo" - Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*, *1*, 77-79 [in Russian].
22. Silaev, B.M. (2011). Reshenie zadach o trenii i iznashivanii poverhnostey na osnove obobschennoy modeli kontaktnogo vzaimodeystviya tverdyih tel [Solving problems of friction and wear of surfaces based on a generalized model of contact interaction of solids]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk - Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, *13 (4-3)*, 1235-1237 [in Russian].
23. Kolesnikov, I.V. (2014). Triboelektricheskie yavleniya na friktsionnom metallopolimernom kontakte i ih zavisimosti ot temperaturyi [Triboelectric Phenomena on a Friction Metal-Polymer Contact and Their Dependence on Temperature]. *Inzhenernyiy vestnik Dona - Engineering bulletin of the Don*, *31 (4-1)*, 70-75 [in Russian].
24. Kornev, V.M. (2003). Kolichestvennoe opisanie effekta rebindera (hrupkie i kvazihrupkie tela): ot zamedleniya razrusheniya do samoproizvolnogo dispegirovaniya [Quantitative description of the rebinder effect (brittle and quasi-brittle bodies): from fracture retardation to spontaneous dispersion]. *Fizicheskaya mezomehanika - Physical mesomechanics*, *6 (3)*, 9-18 [in Russian].
25. Zhornik, V.I. (2014). Formirovanie kompozitnogo sloya tribotehnicheskogo naznacheniya elektrohimicheskim hromirovaniem i himicheskoy obrabotkoy v vodnoy oksidosoderzhaschey suspenzii [Formation of a composite layer for tribotechnical purposes by electrochemical chromium plating and chemical treatment in an aqueous oxide-containing suspension]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta - Bulletin of the vitebsk state technological university*, *26*, 121-135 [in Russian].
26. Drozdovskiy, G.P. & Yusenhan, V.I. (2008). Obespechenie funktsionalnoy nadezhnosti elementov gidroprivoda oborudovaniya lesnyih mashin ih testovyim diagnostirovaniem [Ensuring the functional reliability of the elements of the hydraulic drive of the equipment of forest machines by their test diagnostics]. *Aktualnyie problemyi lesnogo kompleksa - Actual problems of the forest complex*, *21*, 200-206 [in Russian].
27. Aulin, V.V., Chernai, A.Ie. & Zamota, T.M. (2017). Shliakhy rozviazannia problemy pidvyshchennia resursu zolotnykovoho hidrorozpodilnyka mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniky [Ways to solve the problem of increasing the life of the spool hydraulic distributor of mobile agricultural and motor vehicles]. Prospects and trends in the development of structures and technical service of agricultural machinery and implements*: III Vseukr. nauk.- prakt. konf. : (29-30 ber. 2017 r.) – 3d All-Ukrainian Scientific and Practical Conference* (pp. 236-237). Zhytomyr [in Ukrainian].
28. Aulin, V.V., Zamota, T.M. & Chernai, A.Ie. (2017). Pidvyshchennia dovhovichnosti zolotnykovoho hidrorozpodilnyka MSHT ta ATT trybotekhnolohiiamy prypratsiuvannia i vidnovlennia [Increasing the durability of the spool hydrodistributor MSGT and ATT tribotechnologii running-in and recovery]. *Tekhnichnyi servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv: naukovyi zhurnal - Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes: scientific journal*, *8*, 121-127 [in Ukrainian].
29. Velichko, S.A., Chumakov, P.V. & Kolomeychenko, A.V. (2019). Otsenka tehnicheskogo sostoyaniya silovyih gidrotsilindrov serii s navesnyih gidrosistem traktorov [Assessment of the technical condition of power hydraulic cylinders of a series with mounted hydraulic systems of tractors]. *Inzhenernyie tehnologii i sistemyi - Engineering technologies and systems*, *29 (3)*, 396-413 [in Russian].
30. Dmitriev, V.A. (2015). Strategii vnedreniya innovatsionnyih tehnologiy mehanicheskoy obrabotki - Strategies for the implementation of innovative machining technologies. *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivyi razvitiya i sovershenstvovaniya - Innovative economy: prospects for development and improvement*, *4 (9)*, 95-100 [in Russian].
31. Ozerskiy, A.I. (2009). Povyishenie effektivnosti gidrosistem mobilnyih mashin i oborudovaniya, rabotayuschih v tyazhyolyih usloviyah ekspluatatsii [Improving the efficiency of hydraulic systems of mobile machines and equipment operating in difficult operating conditions]. *Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tehnicheskie nauki - News of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical Sciences*, *3*, 79-84 [in Russian].
32. Kovalev, M.A. (2009). Uprezhdayuschee obsluzhivanie gidrosistem na osnove analiza parametrov chastits zagryazneniya rabochey zhidkosti [Predictive maintenance of hydraulic systems based on the analysis of the parameters of particles of contamination of the working fluid]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Korolyova (natsionalnogo issledovatelskogo universiteta) - Bulletin of the Samara State Aerospace University. Academician S.P. Koroleva (National*

Research University), 3(1), 89-96 [in Russian].

33. Kuzminskyi, R.D. (2005). Struktura, parametry ta efektyvnist tekhnolohichnykh protsesiv remontu [Structure, parameters and efficiency of technological processes of repair]. *Visnyk LDAU: Ahroinzhenerni doslidzhennia - Bulletin of LSAU: Agroengineering research*, *9*, 50-60 [in Ukrainian].
34. Kalimullin, R.F. & Kovalenko, S.Yu. (2013). Kontseptsiya resursosberegayuschey ekspluatatsii avtomobilnyih dvigateley [The concept of resource-saving operation of automobile engines]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta - Bulletin of the saratov state technical university*, *2 (71)*, 29-34 [in Russian].
35. Chufistov, E.A., Rodaykin, N.V. & Chufistov, O.E. (2009). Konstruktorsko-tehnologicheskoe povyishenie nadezhnosti podshipnikovyih uzlov kolenchatyih valov sredneoborotnyih dizelnyih dvigateley [Design and technological improvement of the reliability of bearing assemblies of crankshafts of medium-speed diesel engines]. *Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy, Povolzhskiy region. Tehnicheskie nauki - News of higher educational institutions, Volga region. Technical Sciences*, *2*, 156-165 [in Russian].
36. Hramtsov, N.V., Korolev, A.E. & Bay, R.F. (2013). Vliyanie konstruktorsko-tehnologicheskih faktorov na iznosostoykost avtotraktornyih dvigateley [Influence of design and technological factors on the wear resistance of autotractor engines]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki - News of the Tula State University. Technical Sciences*, *6(1)*, 127-131 [in Russian].
37. Kornilovich, S.A. (2012). Povyishenie kontaktnoy vyinoslivosti poverhnostnogo sloya zubev shesteren pri ih izgotovlenii i remonte [Increasing the contact endurance of the surface layer of gear teeth during their manufacture and repair]. *Omskiy nauchnyiy vestnik - Omsk scientific bulletin*, *2 (110)*, 75-76 [in Russian].
38. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Hrynkiv, A.V. et al. (2018). Mozhlyvosti tekhnolohii trybotekhnichnoho vidnovlennia dlia pidvyshchennia znosostiikosti i dovhovichnosti spriazhen detalei transportnykh zasobiv [Possibilities of tribotechnical restoration technologies for increase of wear resistance and durability of couplings of details of vehicles]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti: nauk. zhur. Lutsk - Modern technologies in mechanical engineering and transport: science. jury Lutsk*, *1(10)*, 5-11 [in Ukrainian].
39. Aulin, V., Lysenko, S., Hrynkiv, A., Velykodnyi, D., Chernai, A. & Lukashuk, A. (2019). Regularities of dynamics of change in tribotechnical characteristics of coatings formed by tribotechnologies of restoration. *Problems of tribology*, *1*, P.73-80 [in English].
40. Aulin, V., Lysenko, S., Hrynkiv, A. et al. (2021). Creation of theoretical bases of tribotechnologies of running-in and restoration as means of effective increase of operational wear resistance of motor transport and mobile agricultural machinery. *Problems of tribology*, *1*, 51-58 [in English].
41. Dykha, A., Aulin, V., Makovkin, O., Lysenko & S., Posonskiy, S. (2017). Determining the characteristics of viscous friction in the sliding supports using the method of pendulum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *3(7-87)*, pp. 4-10 [in English].
42. Aulin, V.V. (2014). *Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorhanizatsii v trybotekhnichnykh systemakh: monohrafiia [Physical bases of processes and states of self-organization in tribotechnical systems: monograph]*. Kirovohrad: Vyd. Lysenko V.F. [in Ukrainian].
43. Aulin, V., Hrinkiv, A., Dykha, A. et al. (2018). Substantiation of diagnostic parameters for determining the technical condition of transmission assemblies in trucks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *2(1-92)*, pp. 4-13 [in English].
44. Zamota, T.N. & Aulin, V.V. (2010). Dovodka tortsevogo uplotneniya turbokompressora elektrohimiko-mehanicheskim sposobom [Fine-tuning of the mechanical seal of a turbocharger by an electrochemical-mechanical method]. Science - education, production, economics: *Vosma mezhdunarodna nauchno-tehnicheska konferentsiia – 8 th Eighth International Scientific and Technical Conference (pp.92-93). Minsk: Belorusskiy natsionalnyiy tehnicheskiy universitet* [in Russian].
45. Aulin, V., Lysenko, S., Lyashuk, O., Hrinkiv, A., Velykodnyi, D., Vovk, Y., Holub, D. & Chernai, A. (2019). Wear resistance increase of samples tribomating in oil composite with geo modifier KgMf-1. *Tribology in Industry*, *41(2)*, pp. 156-165 [in English].
46. Kroitoru, D.M., Guryanov, G.V., Bobanova, Zh.I. & Botoshan, N.I. (2008). Tehnologiya vosstanovleniya i uprochneniya tsilindrov dvigateley iznosostoykimi pokryitiyami [Technology of restoration and hardening of engine cylinders with wear-resistant coatings]. *Elektronnaya obrabotka materialov - Electronic processing of materials*, *6*, 16 [in Russian].
47. Zamota, T.N. & Aulin, V.V. (2011). Issledovanie protsessov vyideleniya puzyirkov gaza v smazyivayuschey srede pri prirabotke i ih vliyanie na izmenenie rezhima treniya [Investigation of the processes of release of gas bubbles in a lubricating medium during running-in and their influence on the change in the friction mode]. *Problemi tribologiyi - Problems of tribology*, *1*, 95-99 [in Russian].
48. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Zamota, T., Pankov, A. & Tykhyi, A. (2019). Determining the

rational composition of tribologically active additive to oil to improve characteristics of tribosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *6(12-102)*, pp. 52-64 [in English].

49. Shabanov, A.Yu., Zaytsev, A.B., Metelev, A.A. & Pustovalov, Yu.P. (2015). Modelirovanie parametrov treniya i iznosa tsilindroporshnevoy gruppyi dvigatelya v realnom ekspluatatsionnom tsikle [Simulation of friction and wear parameters of the engine cylinder-piston group in a real operating cycle.]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennyie i inzhenernyie nauki - Scientific and technical statements of SPbPU. Natural and Engineering Sciences*, *1 (214)*, 22-29 [in Russian].
50. Slobodyanyuk, D.I., Kolegaev, M.A. & Goryuk, A.A. (2014). Eksperimentalnyie izotermyi rasklinivayuschego davleniya v plenkah tsilindrovogo masla sudovogo dizelya [Experimental isotherms of disjoining pressure in marine diesel cylinder oil films]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova - Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet. Admiral S.O. Makarova*, *1 (23)*, 42-48 [in Russian].

Andrii Chernai, Post-graduate
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Formation of Equidistant Working surfaces of Precision Conjugations of Machine parts

The purpose of this work is to clarify the essence of the method of forming equidistant working surfaces of parts when applying an alternating electric current and using electrolytes.

It is shown that the processes of tribotechnologies of running-in and recovery with the application of alternating current and the formation of equidistant conjugate surfaces are the most effective in comparison with other methods. The main factors are highlighted and their characteristics are given. The stages of running in and restoration of friction surfaces using alternating electric current are considered. The essence of the method of applying alternating current on conjugate parts of machines and obtaining equidistant working surfaces is clarified. Significant improvement of tribotechnical characteristics of friction surfaces, their formation under the action of electrochemical and mechanical components is revealed. Possibility of running-in of the main couplings of details of hydraulic units, use of the developed tribotechnologies of running-in and restoration on the basis of laws of electrochemical-mechanical processes is shown. The action of the electrolyte as a liquid adsorbent during adsorption on friction surfaces has been elucidated. One of these adsorbents used oleic acid. It is shown that the best result can be achieved by the electrochemical reaction of etching the surfaces of conjugate parts and their mechanical activation. The proposed technologies use an operating voltage not exceeding 5 V AC, and a current density of 10^4 A/m^2. Surface erosion occurs with the frequency of anodic polarization. Electrochemical etching during running-in is based on Faraday's laws. Realization of the specified draining occurs by means of the passivating electrolyte providing the maximum alignment (equidistance) of surfaces by influence of relative speed of movement and loading.

It is noted that the developed technologies depend on the nature of operation and modes of friction of the joints of components, systems and units of machines.

precision parts, equidistant surfaces, conjugation of parts, alternating electric current, electrochemical and mechanical processes, running-in

Одержано (Received) 11.02.2022 *Прорецензовано (Reviewed) 21.02.2022*
Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022