

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗАМОТА ТАРАС МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 631.372+62-192

**НАУКОВІ ОСНОВИ ПРИПРАЦЮВАННЯ СПРЯЖЕНЬ ДЕТАЛЕЙ
МОБІЛЬНОЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ
ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ТА РЕМОНТІ МЕТОДОМ НАКЛАДАННЯ
ЗМІННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ**

Спеціальність 05.05.11 – машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Кропивницький – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Луганському національному аграрному університеті, Східноукраїнському національному університеті ім. В.Даля, Кіровоградському національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Аулін Віктор Васильович,
Кіровоградський національний технічний
університет, професор кафедри експлуатації
та ремонту машин.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Козаченко Олексій Васильович,
Харківський національний технічний
університет сільського господарства
ім. П. Василенка, професор кафедри надійності,
міцності та технічного сервісу машин
ім. В.Я. Аніловича;

доктор технічних наук, професор
Кузьмінський Роман Данилович,
Львівський національний аграрний університет,
завідувач кафедри експлуатації та технічного
сервісу машин імені професора О.Д. Семковича;

доктор технічних наук, доцент
Ляшук Олег Леонтійович,
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя,
завідувач кафедри автомобілів.

Захист відбудеться "3" березня 2017 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 23.073.01 у Кіровоградському національному технічному університеті за адресою: 25030, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Кіровоградського національного технічного університету за адресою: 25030, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

Автореферат розісланий "25" січня 2017 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.М. Каліч

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема підвищення довговічності мобільної сільськогосподарської техніки (МСГТ) безпосередньо пов'язана з процесами зміни технічних параметрів спряжень вузлів і агрегатів. Інтенсивність та характер протікання цих процесів істотно залежать від макрогеометричних відхилень форми та точності взаємного розташування робочих поверхонь деталей в спряженнях. Різні види відхилень обумовлені порушеннями технології виготовлення та збирання вузлів і агрегатів МСГТ у виробництві та ремонті. Через втрату точності розташування деталей і їх переміщень в процесі експлуатації відбуваються заклинювання, удари, вібрації, порушення герметичності спряжень та ін. Зазначене приводить до відмов, зниження ресурсу, втрат енергії, перегрівання спряжень агрегатів, підвищення витрат паливно-мастильних матеріалів. Поліпшенням ефективності процесів припрацювання ресурсовизначальних спряжень, забезпеченням високої якості та усунення макрогеометричних відхилень взаємного розташування і форми деталей, підготовкою їх до сприйняття експлуатаційних навантажень можливо вирішити проблему підвищення довговічності вузлів і агрегатів.

Разом з тим, більшість методів припрацювання спрямовані на прискорення процесів, а не на перенесення умов пристосування спряжених поверхонь на початковий період їх роботи, що є недостатньо ефективним при припрацюванні деталей з макрогеометричними відхиленнями. Відсутність відомостей про динаміку зміни технічного стану спряжень деталей не дає змоги ефективно керувати процесами припрацювання, яке може відбутися через тривалий час або з надлишковим зношуванням. Застосування ряду покриттів та захисних плівок в спряженнях деталей створює перехідний шар, який приховує неприпрацьовані поверхні, і після зношування, під час експлуатаційних навантажень, може викликати задири та схоплювання. Використання присадок до оливи зменшує коефіцієнт тертя, але ускладнює припрацювання деталей з макрогеометричними відхиленнями, а додавання присадок до палива – приводить до утворення абразивних продуктів зносу, що забезпечує усунення макрогеометричних відхилень за рахунок надлишкового зносу. Використання постійного електричного струму і оливи обумовлює наявність абразивних продуктів за рахунок електроерозійної дії на робочу поверхню деталі, призводить до максимального локального зміцнення і, в той же час, зменшує ресурс.

При використанні змінного електричного струму і електроліту в процесах припрацювання можливо прискорити взаємне пристосування поверхонь деталей з різних матеріалів, типів спряжень та видів макрогеометричних відхилень і одночасно реалізувати підвищення довговічності. Розробка наукових основ методу припрацювання деталей з накладанням змінного електричного струму із можливістю керування процесами і вирішення проблеми підвищення довговічності вузлів і агрегатів МСГТ є безумовно актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами та темами. Дисертаційна робота виконувалась у відповідності до "Національної програми розвитку агропромислового виробництва і відродження села України" на 1999-2010 роки; згідно стратегічних пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в Україні на 2007-2012 роки, а саме – новітні та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі; згідно тематичних напрямів наукових досліджень Луганського національного аграрного університету за темою "Розробка конструкції технологічного оснащення процесу електрохіміко-механічного припрацювання деталей двигунів для впровадження технології у виробництво" (№ДР 0109U002708); у відповідності до тематичних напрямів наукових досліджень та розробок Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля по темі "Підвищення ефективності експлуатації автомобільного транспорту" та Кіровоградського національного технічного університету (КНТУ) за темами "Розробка та впровадження нових технологій у виробництві та ремонт сільськогосподарської та автотракторної техніки"(№ДР 0116U008106) та "Трибологічні основи підвищення надійності деталей і робочих органів сільськогосподарської техніки" (№ДР 0114U003656).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка наукових основ припрацювання спряжень деталей з макрогеометричними відхиленнями методом накладання змінного електричного струму із забезпеченням керованості процесів для розв'язання проблеми підвищення довговічності вузлів і агрегатів МСГТ при виготовленні та ремонті.

Для реалізації поставленої мети вирішувались наступні основні завдання:

- провести аналіз різноманітних видів макрогеометричних відхилень форми і розташування деталей та методів підвищення довговічності ресурсовизначальних спряжень вузлів і агрегатів МСГТ їх припрацюванням при виготовленні і ремонті ;
- розробити методологію вирішення проблеми підвищення довговічності вузлів і агрегатів МСГТ на підставі дослідження припрацювання різних типів спряжень деталей з різних матеріалів і макрогеометричними відхиленнями накладанням змінного електричного струму;
- теоретично обґрунтувати закономірності протікання процесів припрацювання при накладанні змінного електричного струму і усунення макрогеометричних відхилень деталей спряжень для підвищення довговічності МСГТ;
- за результатами експериментальних досліджень виявити закономірності зміни мікрогеометрії, властивостей контакту і триботехнічних характеристик робочих поверхонь спряжень деталей двигунів, гідроагрегатів, турбокомпресорів і зубчастих зачеплень методом припрацювання та встановити їх вплив на довговічність вузлів і агрегатів МСГТ;
- обґрунтувати можливість керування параметрами і процесами методу припрацювання основних спряжень деталей вузлів і агрегатів МСГТ з різними матеріалами та видами макрогеометричних відхилень;

- розробити технології припрацювання деталей спряжень вузлів і агрегатів МСГТ при виготовленні і ремонті з урахуванням наукових основ запропонованого методу та дати рекомендації по їх впровадженню у виробництво.

Об'єкт дослідження - процеси припрацювання та усунення макрогеометричних відхилень робочих поверхонь деталей основних спряжень вузлів і агрегатів МСГТ при їх виготовленні і ремонті.

Предмет дослідження – наукові основи методу припрацювання спряжень деталей з макрогеометричними відхиленнями з урахуванням керованості і ефективності процесів припрацювання для підвищення довговічності вузлів і агрегатів МСГТ при виготовленні і ремонті.

Методи дослідження. Методологічним підґрунтям вирішення проблеми підвищення довговічності вузлів і агрегатів МСГТ є метод припрацювання накладанням змінного електричного струму при виготовленні і ремонті. Аналіз проблеми і підходів до її вирішення приведений з технологічної, трибофізичної, математичної та інформаційної позицій. Використані методи теорії надійності машин, технології ремонту сільськогосподарської техніки, теорії ймовірності та математичної статистики, трибології, гідродинамічної теорії тертя, механіки руйнування, теорії електрохімічних процесів.

Дослідження процесів припрацювання та усунення макрогеометричних відхилень робочих поверхонь деталей основних спряжень вузлів і агрегатів МСГТ проводили із застосуванням апробованих і розроблених методів та методик лабораторних, стендових та експлуатаційних випробувань. Використана спеціальна вимірювальна апаратура та модернізовані установки для визначення характеристик та параметрів припрацювання робочих поверхонь циліндричних, плоских, сферичних і зубчастих спряжень, різних матеріалів деталей і видів макрогеометричних відхилень, показників довговічності вузлів і агрегатів, характеристик і властивостей технологічних середовищ (електроліт, олива). Обробку результатів теоретичних і експериментальних досліджень здійснювали методами комп'ютерного моделювання та математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в обґрунтуванні й подальшому розвитку наукових основ припрацювання накладанням змінного електричного струму на спряження деталей з макрогеометричними відхиленнями при виготовленні і ремонті, які, на відміну від відомих раніше, враховують закономірності процесів припрацювання із забезпеченням їх керованості для підвищення довговічності вузлів і агрегатів МСГТ.

Вперше:

- виявлені особливості, етапи, закономірності зміни протікання процесів припрацювання деталей ресурсовизначальних спряжень вузлів і агрегатів МСГТ, які дають можливість використати їх для усунення макрогеометричних відхилень і підвищити довговічність розробкою технологій припрацювання та обкатки;

- отримано аналітичні вирази для оцінки видалення необхідного об'єму матеріалу при припрацюванні різноманітних спряжень деталей двигунів,

гідроагрегатів, турбокомпресорів і зубчастих зачеплень МСГТ, за якими можна визначити раціональні режими припрацювання і досягти максимальної ефективності усунення макрогеометричних відхилень та підвищення довговічності;

- виявлено закономірності впливу різних видів макрогеометричних відхилень деталей в спряженнях вузлів і агрегатів на величини зносу, моменту і коефіцієнту тертя та шорсткості їх поверхонь, які можливо використати при визначенні ресурсу спряжень вузлів і агрегатів та МСГТ в цілому;

- отримано залежності швидкості усунення макрогеометричних відхилень в спряженнях деталей вузлів і агрегатів МСГТ від електрохімічних, геометричних і механічних параметрів та розроблені теоретичні основи керуваності процесів припрацювання.

Удосконалені:

- обґрунтування використання трифазного змінного струму для припрацювання спряжень деталей двигунів при обкатці;

- обґрунтування впливу складу електроліту на перебіг процесів припрацювання запропонованим методом та виявлено універсальний електроліт для припрацювання спряжень деталей різних матеріалів.

Одержали подальший розвиток:

- теоретичне та експериментальне обґрунтування закономірностей протікання процесів припрацювання з урахуванням газоутворення в електроліті, пасиваційних явищ та зміни режимів тертя;

- закономірності динаміки зміни технічних параметрів спряжених поверхонь деталей та їх вплив на протікання процесів припрацювання.

Практичне значення одержаних результатів. На основі виконаних експериментальних та теоретичних досліджень процесів припрацювання при накладанні змінного електричного струму вирішена проблема підвищення довговічності спряжень вузлів і агрегатів МСГТ при їх виготовленні та ремонті:

- запропонований метод припрацювання застосовано для таких спряжень як "поршневі кільця - гільза" і "підшипники ковзання – вал" двигунів, "бокова і торцева поверхні ущільнюючого кільця - втулка" турбокомпресора, "плунжер – гільза" та "головка плунжеру - підп'ятник" гідроагрегатів, зубчасті зачеплення;

- для розділення поверхонь деталей у спряженнях різного типу запропоновано використання електроліту з додаванням 4% олеїнової кислоти, що підвищує ефективність процесу припрацювання поверхонь з макрогеометричними відхиленнями (патент України на корисну модель № 24735);

- розроблені способи керування процесами припрацювання зміною режимів тертя за рахунок зміни струмових (патент України на корисну модель № 88977) та швидко-навантажувальних параметрів (патент України на корисну модель № 88978);

- при реалізації запропонованого методу припрацювання використано трифазний змінний електричний струм, що дало можливість проводити

припрацювання всіх спряжень двигуна за одну операцію з достатньо якісним припрацюванням шатунних підшипників (патент України на корисну модель № 48905);

- розроблено спосіб підвищення ресурсу спряжень деталей вузлів і агрегатів МСГТ суміщенням процесів припрацювання і відновлення, що дозволяє швидко завершити пристосування поверхонь з наступним формуванням на них захисних покриттів (патент України на корисну модель № 108788);

- удосконалені технології методу уточнення значень параметрів припрацювання на основі їх взаємозв'язку математичним плануванням експерименту;

- запропонована фізична модель багатоопорного валу, яка дає можливість припрацьовувати систему спряжень незалежно від початкових макрогеометричних відхилень кожного з них;

- запропонована фізична модель спряження "повзун – гільза", яка дозволяє оцінити якість припрацювання деталей з різною величиною макрогеометричних відхилень за моментом тертя;

- запропоновані фізичні моделі зубчастих зачеплень (прямозубі, гепойдні) для реалізації методу припрацювання, що дозволило визначити збільшення площ плям контакту при їх різних перекосах;

- запропонована фізична модель спряження "головка плунжеру - під'ятник" для реалізації методу припрацювання, яка дала можливість розробити умови припрацювання сферичних спряжень деталей;

- запропоновані установки одноциліндрових та багатоциліндрових двигунів для реалізації методу припрацювання деталей їх спряжень;

- розроблено технологічне оснащення для реалізації процесів перед-ремонтного доведення деталей різних типів спряжень з накладанням змінного електричного струму.

На основі результатів дослідження розроблені технологічні рекомендації для підвищення довговічності вузлів і агрегатів виробникам і споживачам, які прийняті до впровадження в ПАТ "Автобусний парк" 13527, м. Кропивницького і у ТОВ "СВК Україна" Добровеличківського району Кіровоградської області та використовуються у навчальному процесі кафедри "Експлуатація та ремонт машин" КНТУ при проведенні лекційних, лабораторних та практичних занять по дисциплінам "Експлуатація та ремонт машин", "Надійність автомобілів", "Надійність сільськогосподарської техніки", "Основи інженерії поверхні деталей машин" і виконанні студентами кваліфікаційних робіт.

Особистий внесок здобувача. Всі положення, які виносяться на захист, а також результати їх застосування отримані автором самостійно. У колективних публікаціях автором: розроблені наукові основи керування процесами методу припрацювання основних спряжень деталей машин при виготовленні і ремонті [1,27,29,45]; запропоновано методологічний підхід вирішення проблеми припрацювання деталей з макрогеометричними відхиленнями [47]; проведено

порівняльну оцінку існуючих методів припрацювання, розроблені фізичні і математичні моделі для дослідження закономірностей процесів припрацювання ресурсовизначальних спряжень МСГТ, з урахуванням впливу механічних і електрохімічних факторів [4,6,15,40]; обґрунтовано межі зміни мікро- і макрогеометрії поверхонь деталей при припрацюванні [5,8,31,32,34,43,46] і підвищення зносостійкості деталей після доведення [33]; визначено закономірності впливу електрохімічних і механічних факторів на протікання процесів припрацювання [2,3,7,14,16,17,36-39]; розглянуто зміну режимів тертя від газоутворення в електроліті і розвиток площі плями контакту при припрацюванні спряжень деталей [18,21]; обґрунтовано вибір складу електроліту для припрацювання [9,11]; визначено умови підвищення ефективності процесу припрацювання деталей різних типів спряжень [10-12,23-26,28,42,48]; обґрунтовано використання електроліту з додаванням олеїнової кислоти для припрацювання прецизійних пар гідроагрегатів [49]; розроблено способи керування процесами методу припрацювання зміною струмових [51] і навантажувально-швидкісних факторів [52]; запропоновано використання трифазного підключення змінного електричного струму для припрацювання ресурсовизначальних спряжень двигунів [50]; розроблено спосіб підвищення ресурсу деталей поєднанням процесів методу припрацювання при обкатці і технологій відновлення під час експлуатації [53].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на наукових конференціях: співробітників та викладачів Луганського національного аграрного університету, 2002-2008 рр., Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, 2009-2013 рр., Кіровоградського національного технічного університету, 2014-2016 рр.; III Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми триботехніки" (м. Миколаїв, 2009 р.); 9-й Міжнародній науково-технічній конференції "Инженерия поверхности и реновация изделий" (м. Ялта, 2009 р.); 8-9 Міжнародній науково-технічній конференції "Наука - образованию, производству, экономике" (м. Мінськ, 2010, 2011 р.р.); VI Міжнародній науково-технічній конференції "Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств" (Росія, м. Пенза, 2010 р.); LXVI і LXVII науковій конференції професорсько-викладацького складу та робітників Національного транспортного університету (м. Київ, 2010, 2011р.р.); VII Всеросійській науково-технічній конференції "Политранспортные системы" (м. Красноярськ, 2010 р.); XVI Міжнародній науково-технічній конференції "Транспорт, экология, устойчивое развитие" (м. Варна, 2010 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях "Ольвийський форум – 2010, 2011, 2013: Стратегії України в геополітичному просторі"; Міжнародній науково-технічній конференції "Актуальні проблеми інженерної механіки" (м. Миколаїв, 2011 р.); VIII Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту", (м. Вінниця, 2015 р.); IV Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції (м. Харків, 2015р.); VII-X Міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми конструювання,

виробництва та експлуатації с.-г. техніки" (м. Кіровоград, 2009, 2011, 2013, 2015 р.р.). Результати дисертації в повному обсязі доповідалися в Дніпропетровському державному аграрно-економічному університеті на розширеному науково-технічному семінарі факультету механізації сільського господарства (м. Дніпропетровськ, 2016 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 53 наукових праці, зокрема, 1 монографія, 22 статті в наукових фахових виданнях України, 6 статей у закордонних періодичних виданнях, 19 публікацій тез наукових конференцій та отримано 5 патентів України на корисну модель.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновків, переліку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи складає 422 сторінки, у т.ч. основного тексту – 347 сторінок. Робота містить 50 таблиць, 158 рисунків і 1 додаток.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет досліджень, описано використані методи і методики досліджень і зв'язок роботи з науковими програмами, визначено наукову новизну та практичну цінність, вказані дані апробації основних положень дисертації, подано загальну характеристику роботи.

В **першому розділі** наведено огляд стану проблеми підвищення довговічності деталей ресурсовизначальних спряжень вузлів і агрегатів МСГТ. Виявлено, що основною причиною втрати роботоздатності та відмов деталей МСГТ є процеси зміни технічних параметрів при терті та зношуванні. Ряд вітчизняних та зарубіжних вчених: І.П. Погорєлий, Ю.М. Петров, В.П. Алексєєв, І.А. Кравець, І.Є. Дюмін, М.Т. Голубнічий, Г.П. Шаронов, О.Г. Терхунов, М.І. Черновол, М.З. Савченко, В.В. Аулін, Р. Blau, К. Ludema, S. Furuchama та ін. визначили, що процеси припрацювання спряжень деталей істотно впливають на підвищення довговічності машин. Характер і інтенсивність припрацювання залежить від умов експлуатації, типу спряжень та виду макрогеометричних відхилень деталей.

Розроблено схему взаємозв'язку змін макрогеометрії деталей спряжень при виготовленні, збиранні, обкатуванні, експлуатації та ремонті вузлів і агрегатів МСГТ (рис.1).

Показано, що первинною проблемою при вивченні процесів припрацювання деталей є контактування поверхонь та особливості взаємного переміщення. З'ясовано, що для розробки ефективних методів підвищення довговічності спряжень деталей необхідно усунути їх макрогеометричні відхилення при припрацюванні. Розглянуто основні фактори, що впливають на процеси припрацювання. Проаналізовано особливості і проблеми припрацювання підшипників ковзання двигунів, спряжень деталей турбокомпресорів, гідроагрегатів, зубчастих зачеплень.

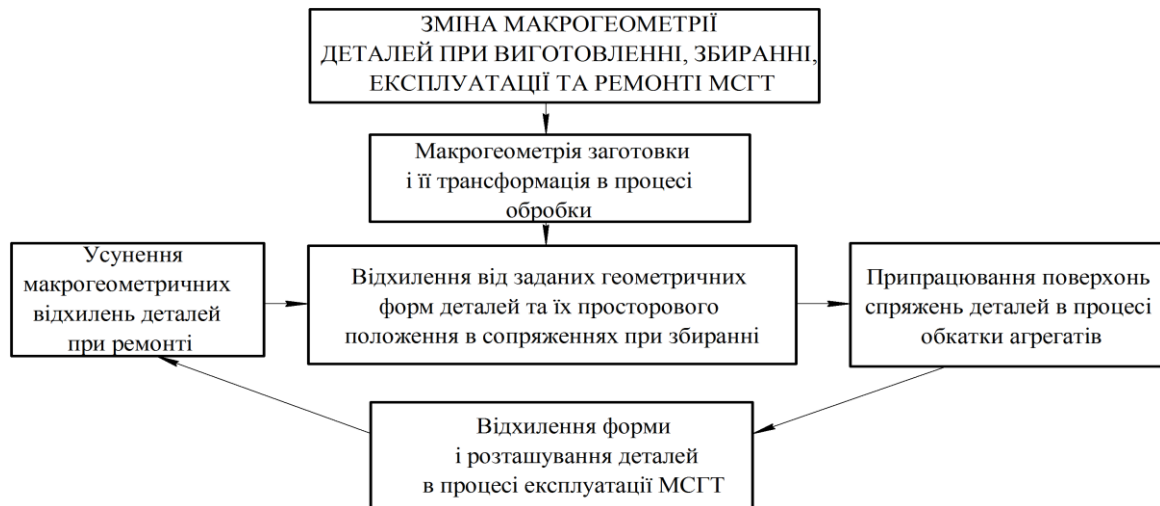


Рисунок 1 – Схема взаємозв'язку зміни макрогеометрії деталей спряжень при виготовленні, збиранні, обкатці, експлуатації і ремонті

Проведено порівняльний аналіз існуючих методів їх припрацювання. Розроблено десять критеріїв оцінки цих методів, за допомогою яких визначено, що найбільш ефективним є метод електрохіміко-механічного припрацювання. Проведено аналіз методів усунення макрогеометричних відхилень спряжень деталей вузлів і агрегатів без використання та з використанням суміщених процесів впливу на їх робочі поверхні. Встановлено, що істотно підвищують довговічність методи з суміщенням процесів припрацювання. Дано аналіз електрохіміко-механічного припрацювання з накладанням змінного електричного струму. З'ясовано, що метод потребує теоретичного обґрунтування процесів, розкриття механізму припрацювання різних типів спряжень з різними матеріалами і видами макрогеометричних відхилень і розроблення методології дослідження та створення наукових основ припрацювання для розв'язання проблеми підвищення довговічності МСГТ.

В другому розділі наведено методологію дослідження і розв'язання проблеми припрацювання спряжень деталей вузлів і агрегатів МСГТ з різними матеріалами та видами макрогеометричних відхилень, структуру, методи та методики теоретичних і експериментальних досліджень процесів і параметрів припрацювання деталей, дано характеристику використаного та запропонованого устаткування. Обґрунтовано, що для ефективного підвищення довговічності основних спряжень деталей МСГТ та розв'язання поставлених завдань необхідний системно-спрямований підхід та розробка ефективних способів усунення макрогеометричних відхилень і отримання еквідистантності спряжених поверхонь (рис.2). Запропонована методологія має самостійне наукове значення, оскільки дозволяє уточнити предметне уявлення про підвищення довговічності припрацюванням деталей з різних матеріалів і видів макрогеометричних відхилень та розширити відомості протікання процесів і встановлення режимів тертя. У відповідності до запропонованої методології розроблено структуру та методи теоретичних досліджень процесів припрацювання спряжень деталей, закономірностей їх взаємодії, динаміки та механізму зношування, а також виявлення можливостей підвищення довговічності методами припрацювання.

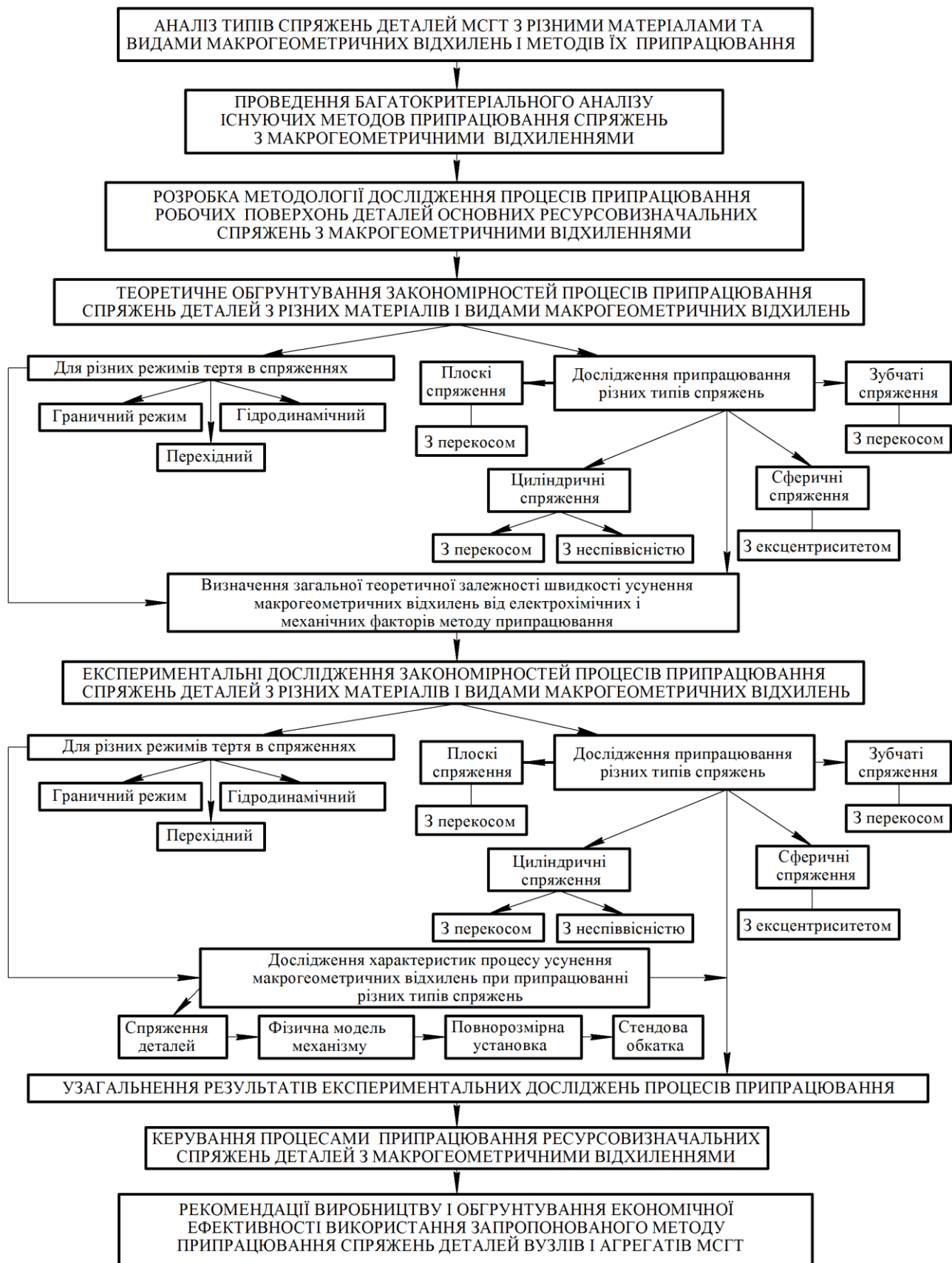


Рисунок 2 - Структурна послідовність методології дослідження процесів припрацювання спряжень деталей з різними матеріалами і видами макрогеометричних відхилень для вирішення проблеми підвищення довговічності вузлів і агрегатів МСГТ

Визначено структуру, методи і методики експериментальних досліджень процесів припрацювання. Особливу увагу надано методам і методикам дослідження процесів усунення різних видів макрогеометричних відхилень деталей спряжень та закономірностей зміни параметрів їх робочих поверхонь, а також теоретичному обґрунтуванню можливостей керування процесами припрацювання.

В третьому розділі наведено теоретичний аналіз можливостей методу припрацювання для усунення макрогеометричних відхилень спряжень деталей вузлів і агрегатів МСГТ завдяки особливостям протікання процесів. Запропонований метод припрацювання спряжень деталей дає нові можливості розв'язання проблеми довговічності вузлів і агрегатів машин, розглядаючи складові властивості надійності не як адитивні, а як синергетичні компоненти, теоретичні основи яких розроблено проф. В.В. Ауліним. Виходячи з цього, метод ефективно об'єднує чотири основні властивості надійності і забезпечує: безвідмовність спряжень деталей – зменшенням припрацювального зносу, що не дозволяє вийти за межі граничних зазорів; підвищення довговічності спряжень деталей – зменшенням тривалості припрацювання і величини зносу; ремонтпридатність – розширенням полів допусків спряжень деталей; збережуваність експлуатаційних показників – можливістю суміщення процесів припрацювання з процесами відновлення при обкатці вузлів і агрегатів та під час експлуатації МСГТ.

Механізм формоутворення робочих поверхонь деталей при припрацюванні досліджували для різних матеріалів і видів макрогеометричних відхилень в умовах різних режимів тертя. Виявлено, що більшість спряжень деталей при реалізації методу проходять три основні етапи припрацювання, режим тертя на яких визначається числом критерію Зоммерфельда S_m (табл.1).

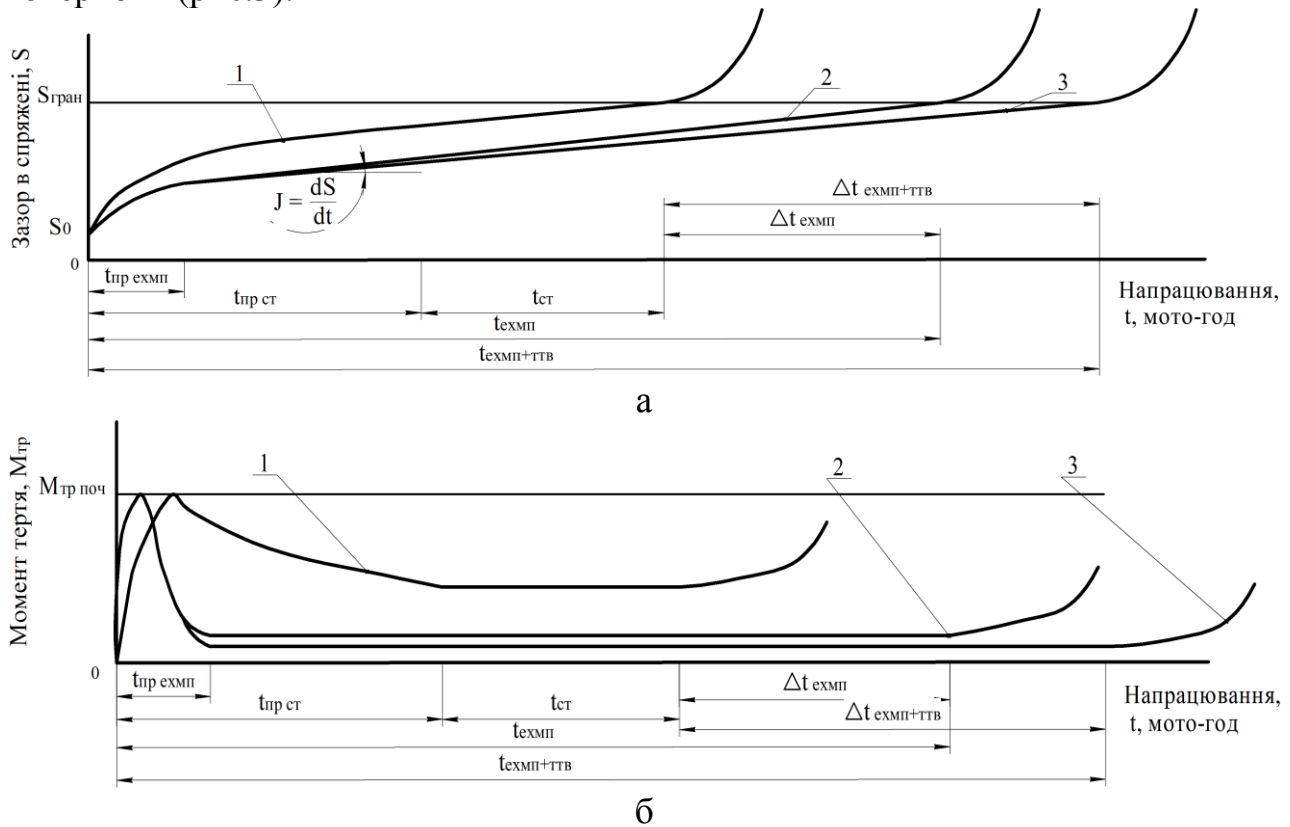
Розроблено алгоритм підвищення ефективності припрацювання деталей спряжень усуненням макрогеометричних відхилень методом накладання змінного електричного струму.

Таблиця 1 - Етапи методу припрацювання поверхонь спряжених деталей

I етап	Формування початкової площі контакту; граничний режим тертя, $S_m < 10^{-5}$; прояв механічної складової процесів: механічне стирання або відтиснення пластичних матеріалів.
II етап	Зростання площі плями контакту; перехід від напіврідинного 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

Виявлено, що запропонований метод припрацювання як сучасний технологічний метод забезпечує збільшення ресурсу на різних етапах життєвого циклу, в той час як основний рівень надійності закладається при проектуванні та виготовленні машин.

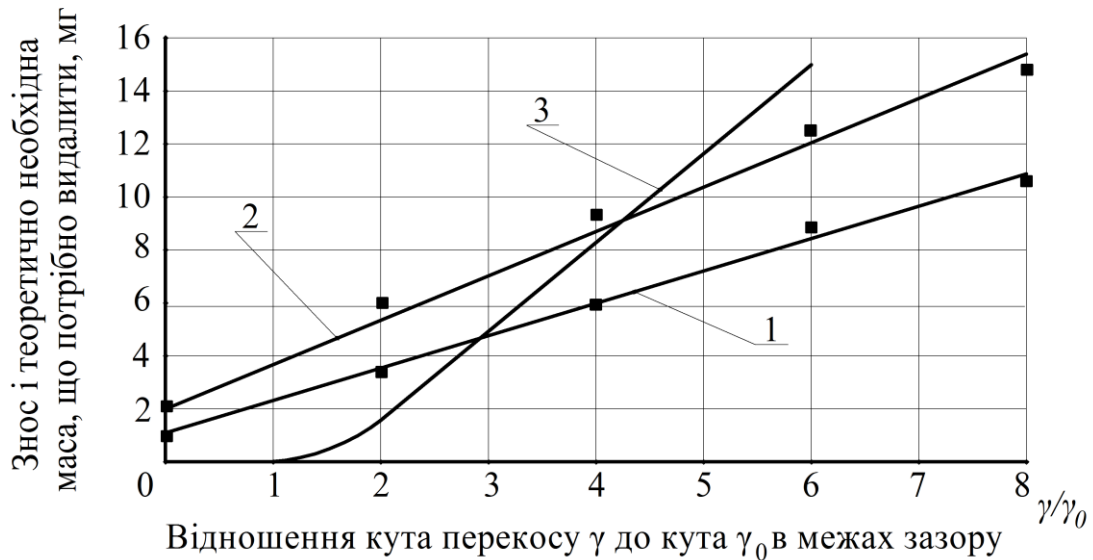
Показано, що підготовка робочих поверхонь деталей до сприйняття експлуатаційних навантажень при припрацюванні ефективно підвищує ресурс при мінімальному зносі і швидкій стабілізації моменту тертя робочих поверхонь (рис.3).



1 – звичайний метод припрацювання; 2 - запропонований метод припрацювання; 3 - запропонований метод при обкатці і ТТВ під час експлуатації

Рисунок 3 - Вплив технологій припрацювання на зміну величини зазору (а) і моменту тертя (б) спряжень деталей від напрацювання на етапах життєвого циклу

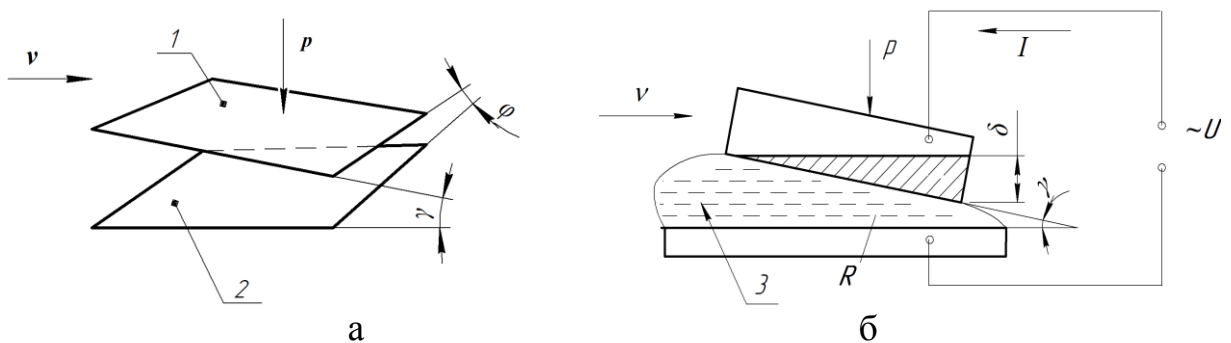
Розроблено теоретичні основи припрацювання спряжень деталей кривошипно-шатунного механізму (КШМ) двигунів МСГТ при наявності макрогеометричних відхилень з врахуванням характеру взаємного переміщення. Виявлено закономірності впливу макрогеометричних відхилень спряжень деталей двигунів на триботехнічні характеристики поверхонь припрацювання. Виходячи з геометричних міркувань, отримано аналітичні залежності розвитку площі плями контакту від величини макрогеометричного відхилення при припрацюванні від початкового стану до припрацьованого. Обґрунтовано вплив макрогеометричних відхилень деталей на закономірності зміни характеристик контакту робочих поверхонь в спряженнях деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ) при припрацюванні (рис.4).



1 – без струму; 2 - зі струмом ($I=5A$); 3 – теоретична оцінка величини маси для видалення з перекошеного поршня

Рисунок 4 - Зміна зносу знімних алюмінієвих кілець залежно від перекосу осей повзуна і гільзи

Для створення узагальнених теоретичних основ запропонованого методу передусім досліджені процеси припрацювання двох непаралельних поверхонь спряжених деталей. Показано, що знаючи кути перекосу γ і ϕ (рис.5), за рахунок процесів припрацювання можливо забезпечити еквідистантність спряжених поверхонь деталей з мінімально можливим зносом.



p - тиск; v – швидкість взаємного переміщення; U , I – струмові параметри процесу припрацювання; δ - товщина зношуваного матеріалу; R – опір шару електроліту; γ , ϕ – кути перекосу; 1,2 - спряжені поверхні; 3 - електроліт

Рисунок 5 - Загальна схема припрацювання спряжених поверхонь деталей:

а - загальний випадок нееквідистантності плоских поверхонь;

б - окремий випадок (за відсутності поперечного перекосу)

Виявлено, що для підвищення ефективності методу повинно, щоб критерій Зоммерфельда S_m був на рівні 10^{-5} , а значення робочої напруги електричного струму U_p - наближалася до напруги холостого ходу U_{xx} . Реалізується це за допомогою пасивуючого електроліту, що забезпечує максимальне вирівнювання поверхні.

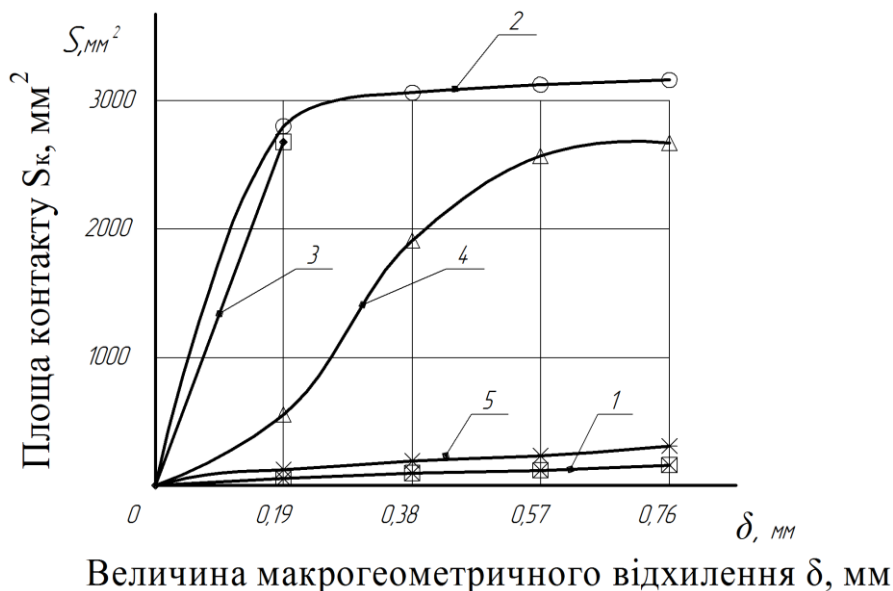
З'ясовано, що технологічно впливати на процеси припрацювання можливо за допомогою швидкості v і навантаження p , а в якості відгуку взяти U_p :

$$\begin{cases} S_m = \mu v / p \rightarrow 10^{-5}; \\ U_p \rightarrow U_{xx} \end{cases} \quad \begin{cases} U_p < U_{xx}; v \rightarrow \max; \\ U_p \approx U_{xx}; v = \text{const}; p \rightarrow n_n \cdot p, \end{cases} \quad (1)$$

де n_n – коефіцієнт підвищення навантаження.

Показано, що при підвищенні напруги U_p до U_{xx} доцільно забезпечити мінімальну товщину роздільної плівки електроліту підвищенням навантаження на спряження деталей.

Теоретично обґрунтовано розвиток площі плями контакту різних типів спряжень деталей та видів макрогеометричних відхилень. Отримані відповідні формули для оцінки площі плям контакту та визначено характер їх теоретичних залежностей від величини макрогеометричних відхилень (рис. 6).



1 – циліндричне з перекосом $S_{цп}$; 2 – циліндричне з неспіввісністю $S_{цн}$; 3 – плоский повзун $S_{пв}$; 4 – сферичне спряження $S_{сф}$; 5 – зубчасте зачеплення $S_{зз}$

Рисунок 6 – Розвиток площі плями контакту S_k від величини макрогеометричних відхилень для спряжень деталей

Теоретично обґрунтовано збільшення швидкості усунення макрогеометричних відхилень спряжень деталей МСГТ при припрацюванні за рахунок забезпечення мінімального зазору та максимальної швидкості з'єму матеріалу. В якості прикладів реалізації методу наведено схеми спряжень деталей з зворотно-поступальним і обертальним взаємним переміщенням (рис. 7).

Можливо бачити, що на поверхні деталі виділяються характерні ділянки макрогеометричного відхилення і збереження еквідистантності поверхонь. В зоні макрогеометричного відхилення при припрацюванні відбувається тільки процес анодного травлення, а в зоні безпосереднього контакту – чергуються механічне активування і анодне травлення.

Рисунок 7 - Схеми реалізації методу припрацювання спряжень деталей із зворотно-поступальним (а) і обертальним переміщеннями (б)

$$v_{\max} = v_{\mathcal{M}} + \frac{1}{2} \cdot (1 - k_1) \cdot \frac{\chi \mathcal{E}}{\rho} \cdot (\eta_{a\partial} \cdot (U - \varphi_{a\partial} + \varphi_k) / \left(h_{\min}^2 + (1 - k_1) \cdot \frac{\chi \mathcal{E}}{\rho} \cdot \eta_{a\partial} \cdot (U - \varphi_{a\partial} + \varphi_k) \cdot t \right)^{1/2} - \eta_a \cdot (U - \varphi_a + \varphi_k) / \left((h_{\min}^2 + \delta_{\max} - ax - c)^2 + (1 - k_1) \cdot \frac{\chi \mathcal{E}}{\rho} \cdot \eta_a \cdot (U - \varphi_a + \varphi_k) \cdot t \right)^{1/2}), \quad (2)$$

При цьому зазор h в спряженні деталей змінюється в часі:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k_{\mathfrak{J}}}{h}; \quad k_{\mathfrak{J}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a \cdot (U - \varphi_a + \varphi_k), \quad (3)$$

Теоретично визначено зміну зазору в зоні макрогометричного відхилення h , площу епюри зміни перерізу деталі $S_{\varepsilon nh}$ і об'єм матеріалу, що знімається $V_{\varepsilon nh}$:

$$h = \left((h_{\min} + \delta_{\max} - ax - c)^2 + 2kt \right)^{1/2} = \left((h_{\min} + \delta_{\max} - ax - c)^2 + \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) \cdot t \right)^{1/2}; \quad (4)$$

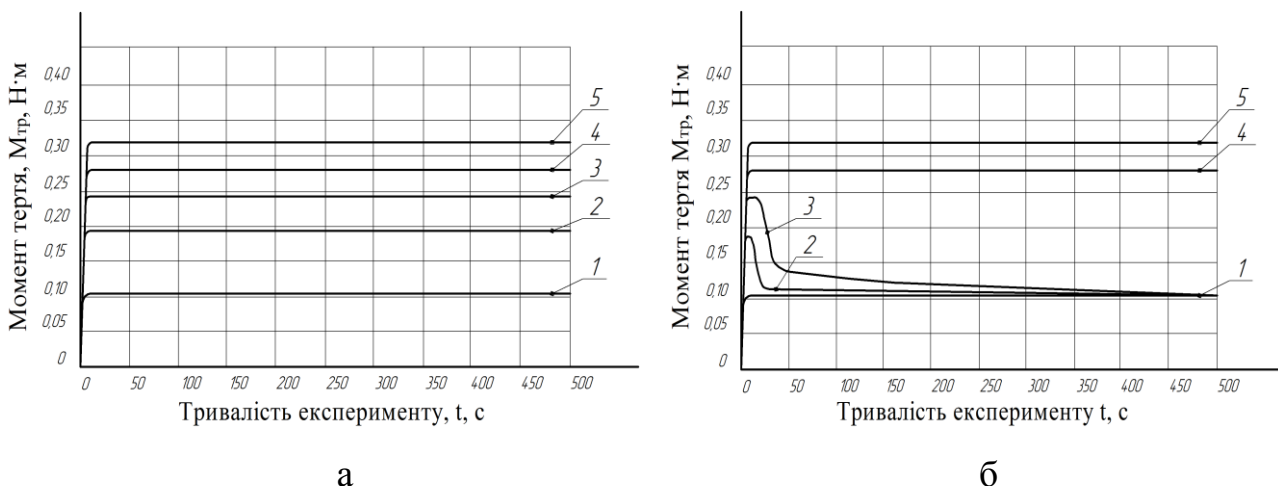
$$S_{\text{anh}} = \int_{x=0}^{x=L} \left((h_{\min} + \delta_{\max} - ax - c)^2 + \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a \cdot (U - \varphi_a + \varphi_k) \cdot t \right)^{1/2} dx; \quad (5)$$

$$V_{\text{anh}} = b \int_{x=0}^{x=L} \left((h_{\min} + \delta_{\max} - ax - c)^2 + \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) t \right)^{1/2} dx, \quad (6)$$

де b – ширина деталі.

Досліджено розподіл опору протікання струму в спряженні деталей з макрогеометричними відхиленнями та епюри швидкості знімання металу при припрацюванні. Для різних типів спряжень деталей вузлів і агрегатів МСГТ отримані формули для необхідних величин об'єму матеріалу, що знімається, та товщини шару електроліту.

В четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень закономірностей процесів припрацювання спряжень дизелів МСГТ, здійснено вибір складу електроліту при суміщенні процесів в запропонованому методі. Дано результати експериментальних досліджень процесів припрацювання зразків на фізичних моделях та реальних деталях двигунів. Визначено та обґрунтовано найбільш раціональні склади електролітів та отримані рівняння залежності електропровідності від концентрації гліцерину. Досліджено вплив процесів припрацювання на характеристики тертя і зношування спряження "повзун - циліндр". Виявлено закономірності зміни величини моменту тертя від тривалості проведення експерименту при реалізації методу припрацювання для різних перекосів поршня (рис. 8).



1, 2, 3, 4, 5 – для перекосу поршня 0; 0,38; 0,76; 1,14;
1,52 мм на 100 мм довжини

Рисунок 8 – Закономірності зміни величини моменту тертя від тривалості припрацювання для різних перекосів поршня без накладення (а) та з накладанням змінного електричного струму (б)

Виявлено, що при методі накладання змінного електричного струму вдається ефективно припрацювати спряження деталей з перекосами до 0,76 мм / 100 мм довжини, в той час, як припрацювання з більшою дефектністю ускладнено (рис.8б). Зазначено, що стабілізація моменту тертя свідчить про закінчення процесу припрацювання. Визначено, що без накладання електричного струму досліджувані спряження деталей не припрацьовувались (рис. 8а).

Експериментальне підтвердження теоретичних досліджень припрацювання багатоопорних валів отримано на їх фізичній моделі. Експериментально показано, що при різних початкових перекосах (кратність відносно перекосу в межах зазору від 0 до 8) в спряженнях п'ятиопорного валу, при визначених параметрах процесів методу припрацювання, вдається сформувати однакові площі плям контактів (рис.9).

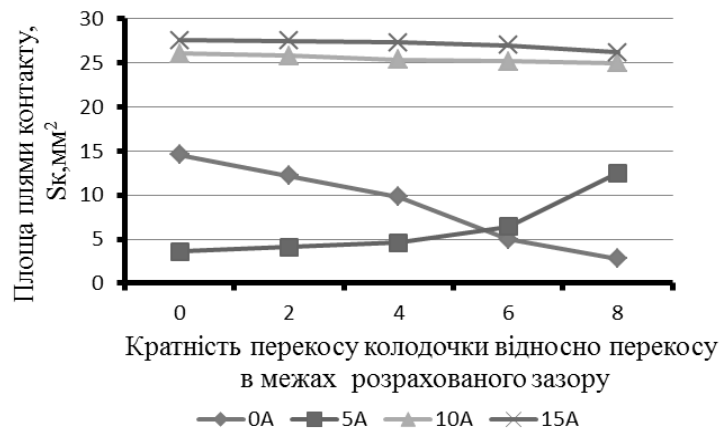


Рисунок 9 – Закономірність зміни площі плям контакту при різних перекосах колодочок фізичної моделі п'ятиопорного валу

Накладання на спряження змінного електричного струму кардинально змінює закономірність розвитку площі плям контакту на зразках вкладишів колінчастого валу. Експериментально доведено, що для підвищення ефективності припрацювання слід розділити спряжені поверхні деталей електролітом. Виявлено, що ефективність процесів припрацювання у запропонованому методі за розвитком питомої площі плями контакту на одиницю величини зносу в 4 рази вище методів на основі механічних процесів. Досліджено режими і закономірності процесів методу: з роздільними етапами проведення припрацювання та накладанням однофазного змінного електричного струму на окремі спряження деталей та їх системи (двигуни); з суміщеними етапами проведення припрацювання та накладанням трифазного змінного електричного струму для одночасного припрацювання системи спряжень деталей. Встановлено їх вплив на показники припрацювання методом математичного планування експерименту, отримані рівняння регресії питомого розвитку площі плями контакту на одиницю зносу від навантаження, тривалості припрацювання і сили струму. Визначено, що оптимальними для моделі багатоопорного валу є режими припрацювання: $P=24H$, $t=5xв$, $I=11A$.

За результатами експериментальних досліджень отримані закономірності зносу і зменшення конусності роликів від напруги електричного струму (рис. 10). Можна бачити, що припрацювання дозволяє покращити макрогеометрію циліндричних поверхонь деталей, оскільки конусність роликів зменшилась на 80% при нарузі 4В. Виявлені закономірності зміни шорсткості, моменту тертя і величини зносу деталей спряжень "повзун-циліндр" при припрацюванні: радіальна шорсткість по твірній зменшувалась, а по колу зростала; при чотирикратному перекосі і силі струму 5 і 8 А стабілізація моменту тертя наступала після трьох хвилин припрацювання, а при збільшенні сили струму до 11А – стабілізація відбулася на другій хвилині; збільшення сили струму сприяло зростанню величини зносу алюмінієвих кілець.

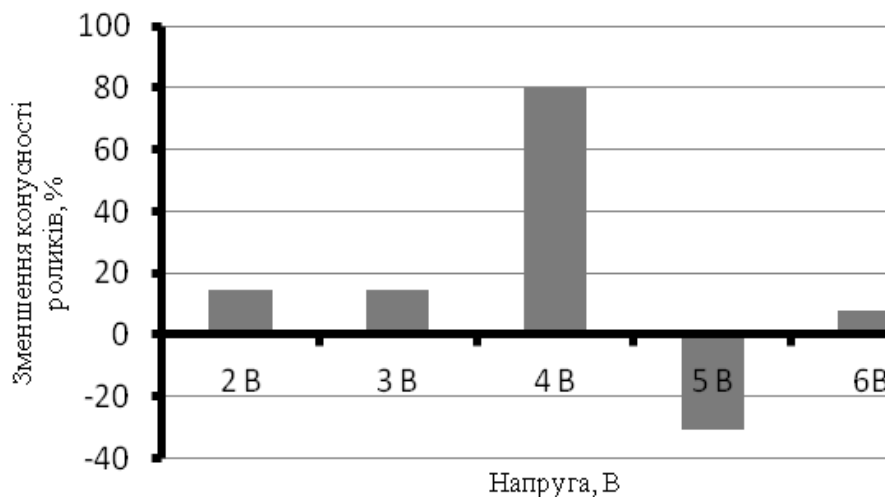


Рисунок 10 - Залежність зменшення конусності ролика від електричної напруги

Визначено підвищення зносостійкості поршневих кілець передремонтною доводкою методом накладання змінного електричного струму.

В п'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень закономірностей припрацювання основних спряжень деталей гідроагрегатів, турбокомпресорів, зубчастих зацеплень МСХТ методом накладання змінного електричного струму. Досліджено зміни макро- і мікрогеометрії, втрати маси робочих поверхонь спряжень зразків і деталей з різних матеріалів і видів макрогеометричних відхилень при припрацюванні в умовах граничного та гідродинамічного режимів тертя. Виявлені закономірності процесів припрацювання і триботехнічних характеристик спряжень "бронза-сталь" на електроліті з додаванням різної концентрації олеїнової кислоти. Показано покращення робочих поверхонь торцевого ущільнення та ущільнюючих кілець турбокомпресорів, отримані диференціальні та інтегральні функції розподілу кутів зазору для ущільнюючих кілець турбокомпресора. Визначено, що на капітальний ремонт, згідно технічних умов, допускається поставка кілець з радіальним зазором 0,02 мм на сумарній дузі не більше 70° і при застосуванні запропонованого методу з тридцяти дефектних кілець не були припрацьовані два.

Розглянуто закономірності процесів припрацювання зубчастих зачеплень. Виявлено, що їх поверхні працюють при різних умовах тертя і метод припрацювання з накладанням змінного електричного струму можливо застосувати для доведення зубчастих зачеплень для виправлення робочих поверхонь. При цьому збільшується площа плями контакту на 41,6% від початкової величини і можливо ефективно доводити зубчасті поверхні з перекосами, що перевищують до чотирьох разів перекіс в межах зазору. Дослідженнями закономірностей зміни шорсткості, площі контакту, величини зносу встановлено покращення характеристик робочих поверхонь основних спряжень аксіально-поршневих насосів методом накладання змінного електричного струму. Визначено вплив навантаження в спряженнях деталей на показники припрацювання та закономірності зміни площі плям контакту в залежності від частоти обертання та сили змінного електричного струму.

Встановлено закономірності зміни зносу, овальностей, висоти нерівностей хвилястого профілю сферичних спряжених поверхонь від напруги холостого ходу при припрацюванні. Зменшення овальності та висоти нерівностей хвилястого профілю представлено на рис.11. Запропонований метод припрацювання сферичних спряжень гідроагрегатів дозволяє ефективно виправляти їх макрогеометричні відхилення. Максимальне зменшення овальності на 23,5% і хвилястості на 12% спостерігається при режимах методу: $U_{xx}=4,5\text{В}$; $I_p=2\text{А}$. Для заданих умов експериментів електрохімічна складова в шість разів більш ефективна за швидкістю вирівнювання макрогеометричних відхилень і за 10 хв. припрацювання овальність сферичної поверхні плунжера зменшилась на 7 мкм.

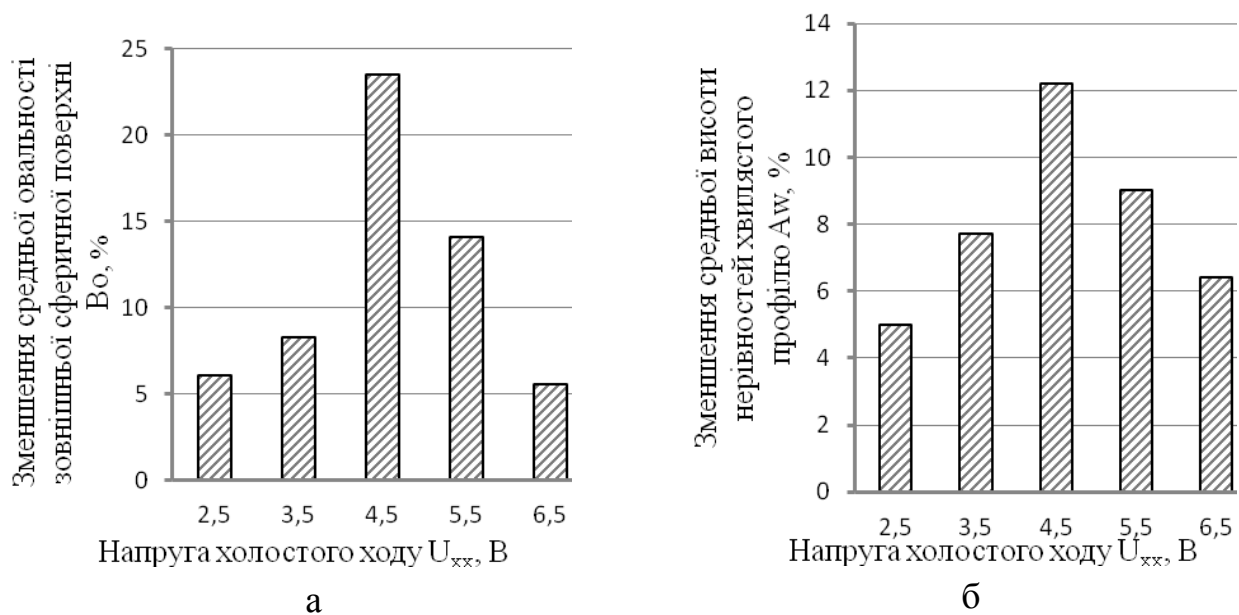
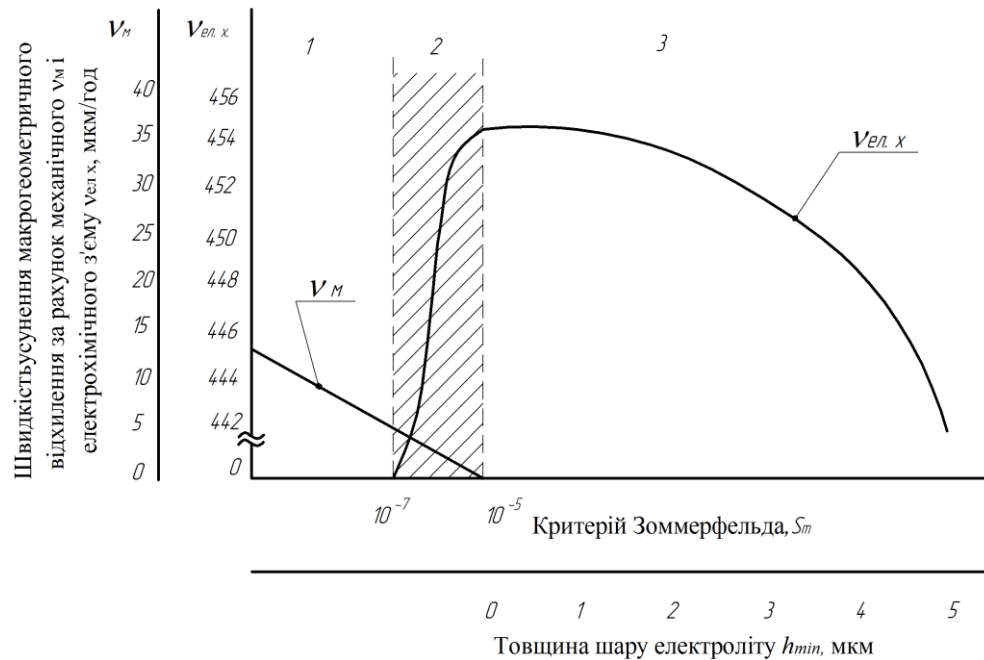


Рисунок 11 - Гістограми впливу напруги холостого ходу на зміну овальності сферичної поверхні (а) і висоти нерівності хвилястого профілю (б)

У шостому розділі наведено теоретичні основи керування процесами припрацювання спряжень деталей з накладанням змінного електричного

струму, отримані аналітичні вирази, які використовуються при керуванні процесами усунення макрогеометричних відхилень різних типів спряжень деталей, побудовані моделі керування технологічними параметрами запропонованого методу припрацювання вузлів і агрегатів МСГТ. Дано аналіз факторів і відгуків процесів та побудовано алгоритм керування припрацюванням.

Використовуючи умови припрацювання, розраховано швидкість знімання матеріалу деталей в залежності від товщини шару електроліту в зазорі їх спряжень і режиму тертя (рис.12).



режими тертя: 1 - граничний; 2 - перехідний; 3 – гідродинамічний

Рисунок 12 - Залежність швидкості усунення макрогеометричного відхилення деталі при припрацюванні від режиму тертя і товщини шару електроліту в спряженні

Показано, що режим тертя істотно впливає на протікання процесів методу: при граничному і перехідному режимах тертя наявне механічне зношування, але відносно малі навантаження в спряженнях деталей спричиняють низьку швидкість механічного знімання матеріалу; з розвитком гідродинамічного режиму тертя спряжені поверхні розділяє шар електроліту, механічний контакт відсутній, і виникають сприятливі умови для електрохімічного травлення робочих поверхонь; із зростанням зазору збільшується опір шару електроліту і швидкість знімання матеріалу знижується. При цьому спряжені поверхні самоорганізуються з встановленням оптимальних характеристик їх контактів для подальшої експлуатації. Виявлено, що для отримання максимальної швидкості усунення макрогеометричних відхилень деталей при припрацюванні основним контрольованим параметром може бути товщина шару електроліту, яка залежить від критерію Зоммерфельда. Алгоритм керування процесами методу представлено на рис. 13.

Наведений алгоритм свідчить, що при припрацюванні різних типів спряжень деталей вузлів і агрегатів МСГТ з'являються реальна можливість керування процесами за рахунок цілого комплексу факторів і активних відгуків.

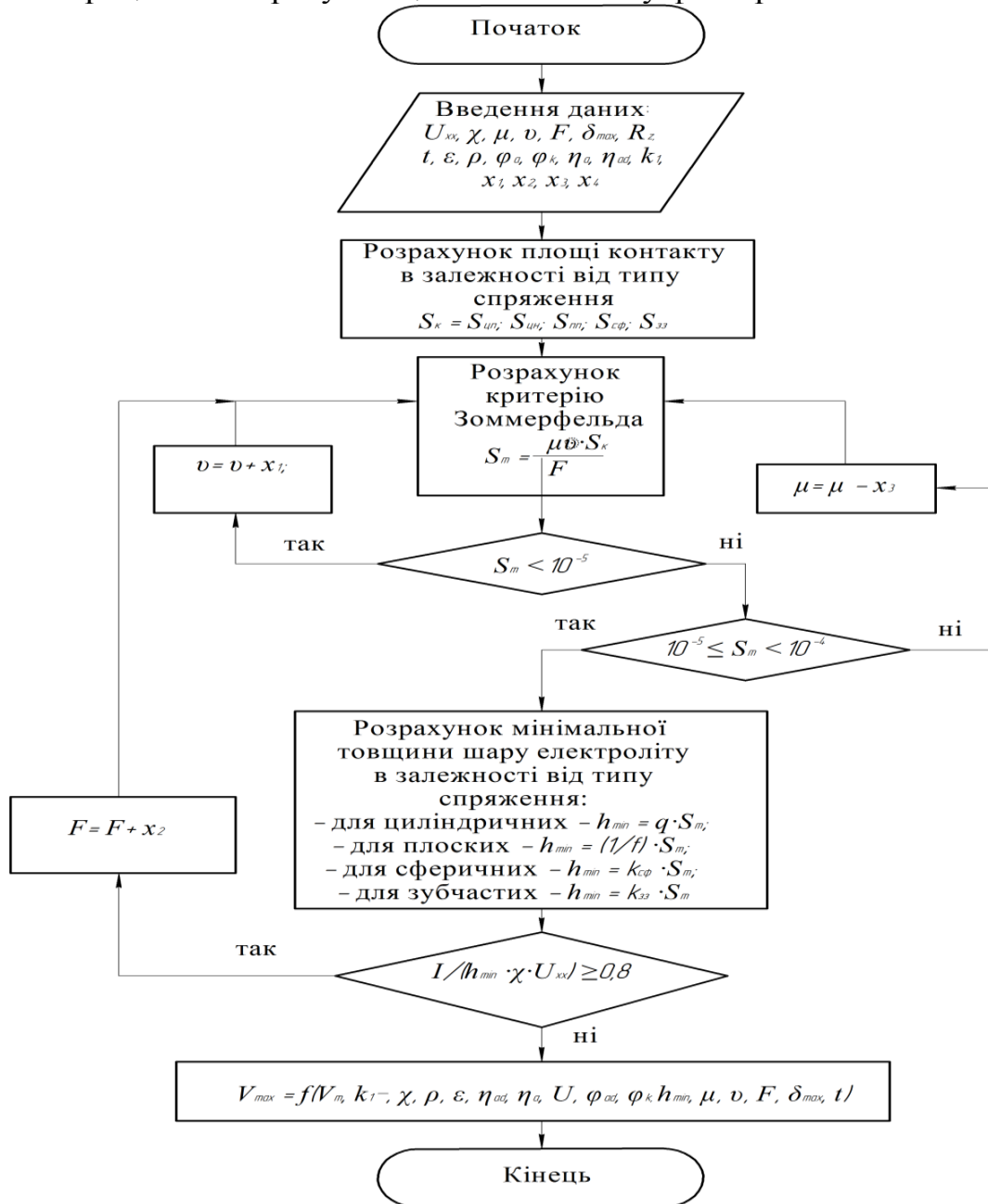
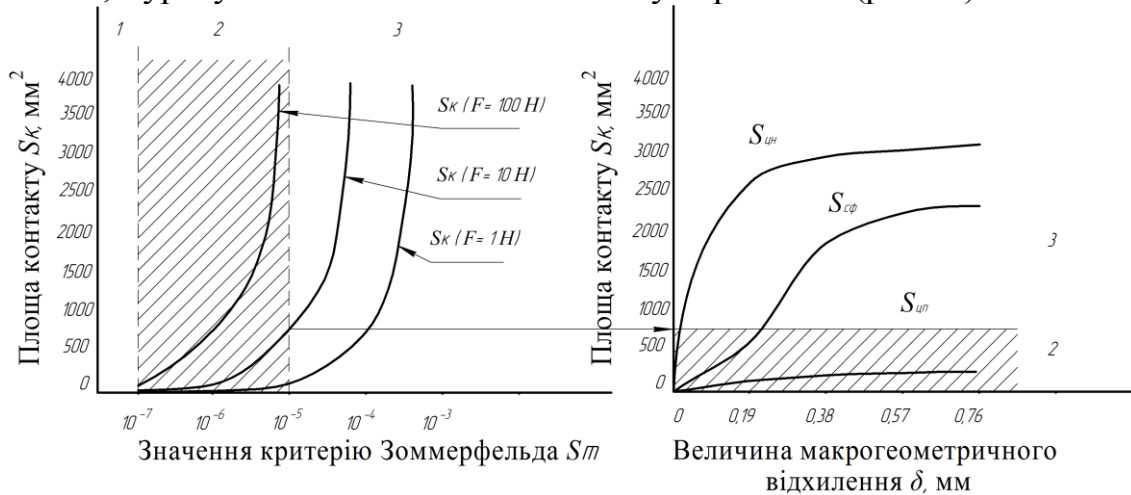


Рисунок 13 – Алгоритм керування процесами припрацювання спряжень деталей з максимальною ефективністю усунення макрогеометричних відхилень

Цим запропонований метод позитивно відрізняється від існуючих методів припрацювання. Доведено, що керування режимами припрацювання можна здійснити за рахунок зміни швидкісного і навантажувального параметрів процесів. В роботі обґрунтовано керування процесами швидкості усунення макрогеометричних відхилень зміною відношення анодного виходу по струму при механічній депасивації до анодного виходу по струму без неї, від мінімальної товщини шару електроліту та від величини макрогеометричних відхилень, електричної напруги і тривалості процесу.

Показано, що формування площі плями контакту істотно залежить від типу спряжень деталей. Тому, для визначення вибору найбільш ефективних технологічних параметрів методу виникає необхідність поєднання інформації про залежність площі контакту від критерію Зоммерфельда і макрогеометричного відхилення, з урахуванням навантаження і типу спряження (рис.14).



режими тертя: 1 - граничний; 2 - перехідний; 3 – гідродинамічний
 $S_{цн}$, $S_{сф}$, $S_{цп}$ – площі контакту спряжень: циліндричного з неспіввісністю, сферичного і циліндричного з перекосом, відповідно

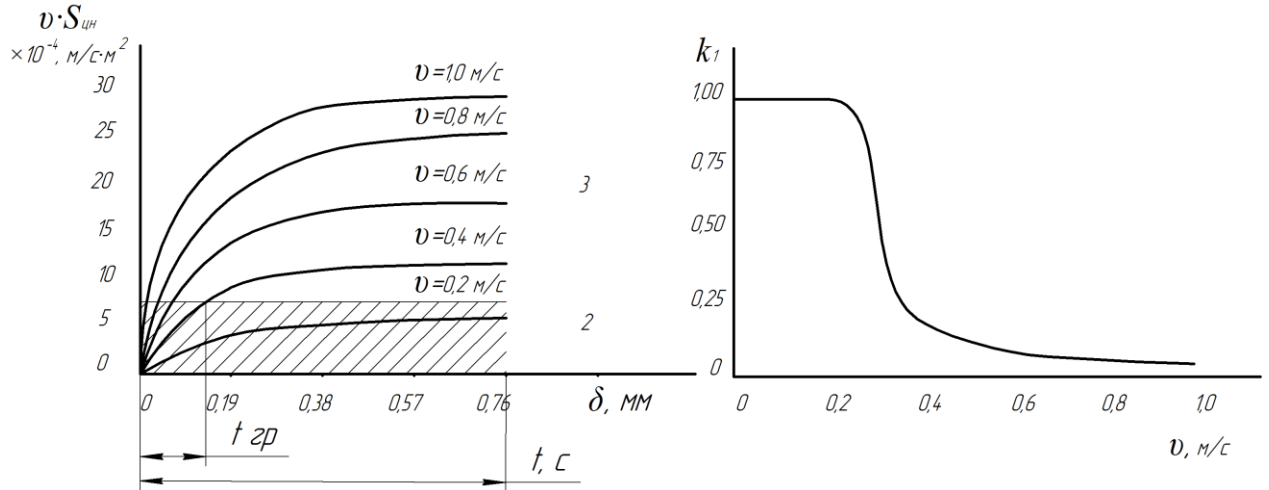
Рисунок 14 – Формування режимів тертя в спряженнях деталей за залежностями площі їх контакту від критерію Зоммерфельда (а) і величини макрогеометричного відхилення (б), з урахуванням сили взаємодії поверхонь і типу спряжень

Визначено, що для циліндричного спряження з неспіввісністю швидко формується така площа контакту, яка дозволяє спряженню перейти на гідродинамічний режим тертя, в той час для циліндричного спряження деталей з перекосом такого режиму тертя не досягається, що викликає необхідність зниження на нього навантаження. Суміщенням представлених графічних залежностей за площею контакту для будь-якого спряження деталей визначаємо навантаження, при якому буде забезпечено гідродинамічний режим тертя з мінімальним шаром електроліту.

Показано, що важливим чинником процесів припрацювання є коефіцієнт k_1 , що враховує частку граничного тертя у загальному циклі роботи спряження деталей. Для більшої ефективності процесів запропонованого методу необхідно прагнути знижувати значення цього коефіцієнта, а чергування граничного і гідродинамічного режимів тертя буде сприяти інтенсифікації припрацювання спряжень деталей за рахунок механічного активування поверхні.

У результаті проведених досліджень виявлено, що найбільш технологічно змінювати режим тертя, змінюючи швидкість взаємного переміщення поверхонь спряжених деталей. Показано, що при цьому більш доцільно розглядати зміну добутку величин $v \cdot S_{цн}$, який враховує крім швидкості і площу контакту (рис. 15). Доведено, що при відносно низьких швидкостях взаємного переміщення деталей спряження досягти умов гідродинамічного режиму тертя

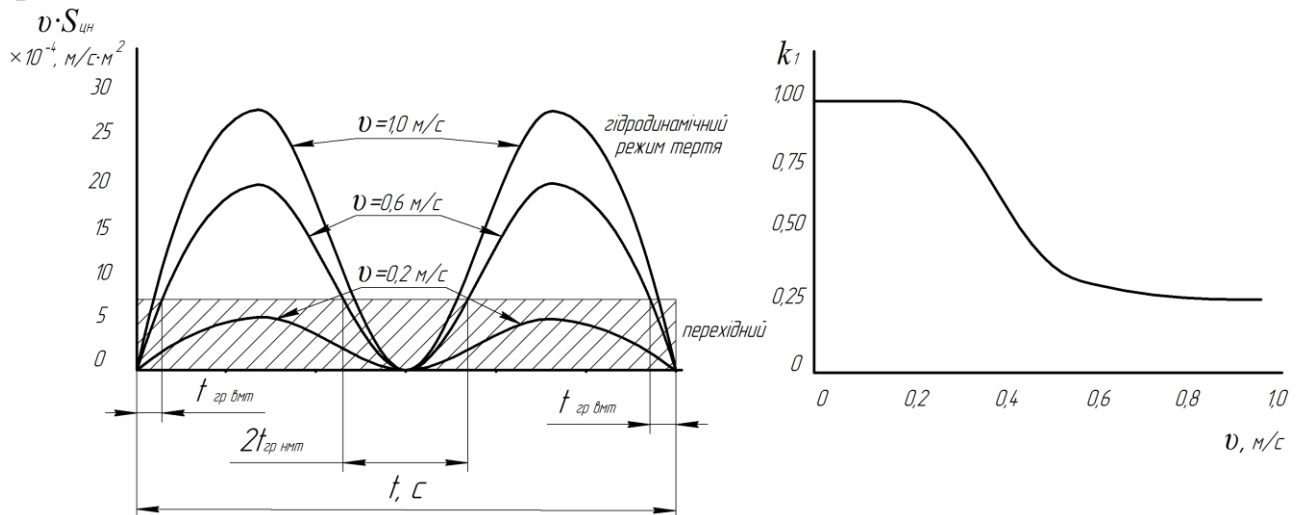
не вдається ($k_1=1$). Збільшуючи швидкість переміщення v до 0,4 м/с можливо знизити значення коефіцієнту k_1 і розділити поверхні шаром електроліту, що створює умови для швидкого припрацювання деталей з макрогеометричними відхиленнями за рахунок анодного травлення. Подальше підвищення швидкості призводить до більш раннього настання гідродинамічного режиму.



режими тертя: 2 - перехідний; 3 – гідродинамічний

Рисунок 15 – Залежність величини $v \cdot S_{\text{сн}}$ від величини макрогеометричного відхилення для односпрямованого руху для циліндричних спряжень з неспіввісністю і різними режимами тертя (а) для визначення коефіцієнта k_1 при зміні швидкості відносного переміщення поверхонь (б)

Протікання процесів припрацювання також залежить від характеру взаємного переміщення деталей спряжень. Для аналогічних умов був визначений коефіцієнт k_1 , але при зворотно-поступальному русі деталей (рис.16).



$t_{\text{зр внт}}$, $t_{\text{зр ннт}}$ – середня тривалість граничного режиму тертя у верхній та нижній мертвих точках

Рисунок 16 – Залежність величини $v \cdot S_{\text{сн}}$ від тривалості циклу зворотно-поступального руху для циліндричних спряжень з неспіввісністю і різними режимами тертя (а) для визначення коефіцієнта k_1 при зміні швидкості відносного переміщення поверхонь (б)

Виявлено, що при зворотно-поступальному русі через більшу частку граничного режиму тертя умови припрацювання деталей ускладнені, ніж при односпрямованому русі.

На рис.17 наведені залежності швидкості усунення макроеометричних відхилень від ряду факторів механічної та електрохімічної складових процесів припрацювання спряжень деталей.

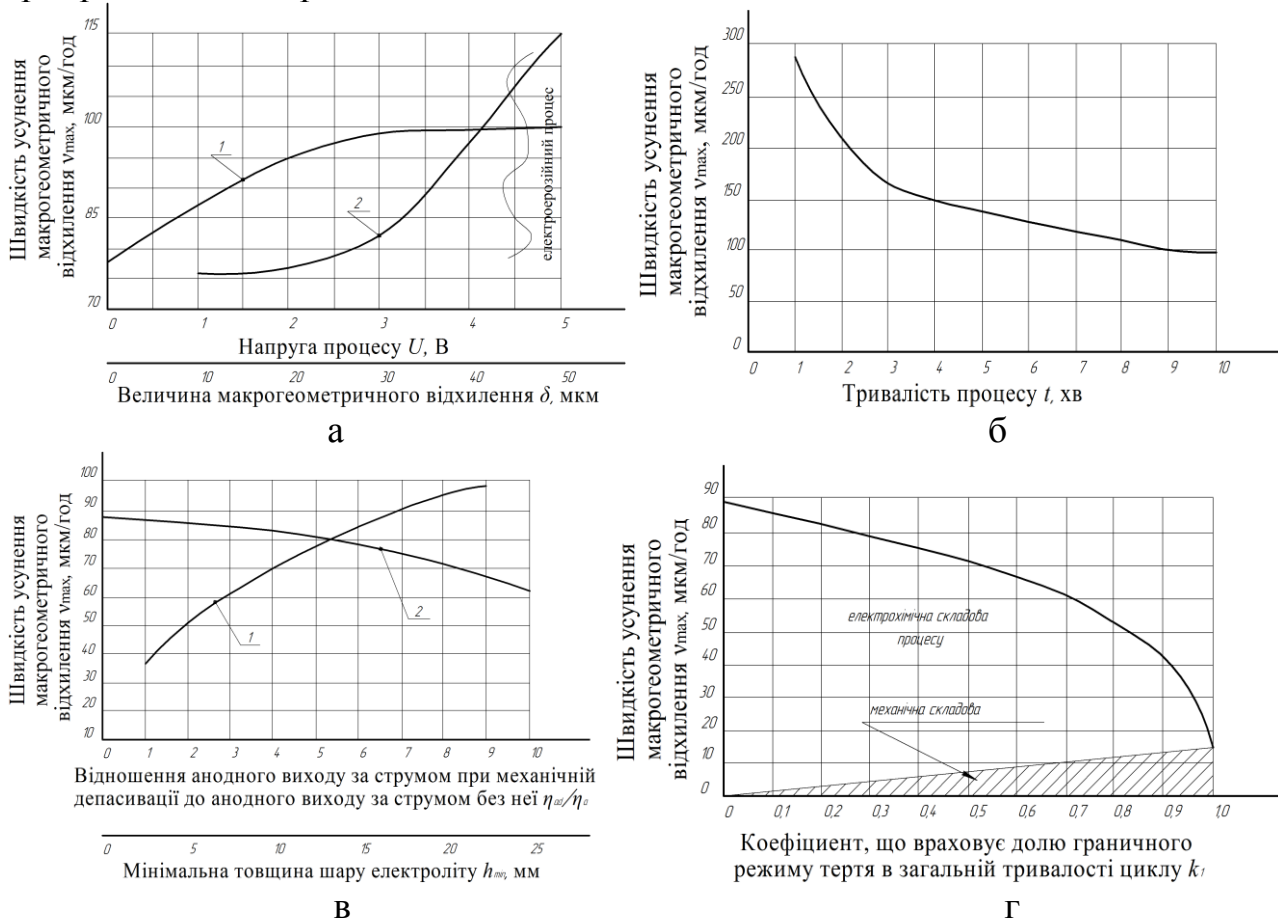


Рисунок 17 – Залежність швидкості усунення макроеометричних відхилень деталей спряжень від факторів процесу припрацювання:

- а – величини відхилень (1) і напруги електричного струму (2);
- б - тривалості процесу; в – відношення анодного виходу за струмом при механічній депасивації до анодного виходу за струмом без неї (1) і товщини шару електроліту (2); г – коефіцієнту k_1

Виявлено, що зі збільшенням напруги електричного струму до 4В швидкість усунення макроеометричних відхилень при реалізації методу збільшується, а інтенсивність припрацювання вища у початковий період. Збільшення площі контакту обумовлює зростання товщини шару електроліту між деталями і знімання матеріалу з їх поверхні припиняється, виключаючи підвищений припрацювальний знос. Показано, що прискорене припрацювання можливе при використанні електролітів, що підвищують відношення анодного виходу за струмом при механічній депасивації, в зоні безпосереднього контакту, до анодного виходу за струмом без депасивації, в зоні макроеометричного відхилення. Залежність швидкості усунення макро-

геометричного відхилення від значення коефіцієнту k_1 свідчить, що електрохімічна складова методу значно більш ефективна механічної, а при проведенні припрацювання необхідно забезпечити швидкий вихід на гідродинамічний режим тертя в спряженнях деталей із формуванням мінімального шару електроліту.

У сьомому розділі наведено розроблені технології на основі запропонованого методу припрацювання для підвищення довговічності вузлів і агрегатів МСГТ. Розглянуто технологічні процеси припрацювання спряжень деталей при виготовленні і ремонті двигунів: комплектування деталей і складальних одиниць; технологічний процес способу роздільного припрацювання з накладанням однофазного змінного електричного струму при припрацюванні корінних підшипників колінчастого валу та спряжень ЦПГ; технологічний процес сумісного припрацювання з накладанням трифазного змінного електричного струму. Наведено результати стендових та експлуатаційних випробувань двигунів Д-240 та дизелів серії ЯМЗ МСГТ.

Виявлено, що середній міжремонтний ресурс експериментальних двигунів Д-240 при сумісних етапах методу припрацювання з накладанням трифазного змінного електричного струму на 15% вище ніж ресурс двигунів, КШМ і ЦПГ яких були піддані роздільному припрацюванню. Визначено, що швидкість зношування хромованих поршневих кілець у контрольних двигунів - $41,5 \cdot 10^{-12}$ м/с, при накладанні однофазного змінного електричного струму і роздільних етапах припрацювання - $9 \cdot 10^{-12}$ м/с, а при накладанні трифазного змінного електричного струму і сумісному припрацюванні - $8,5 \cdot 10^{-12}$ м/с. Отримані при однаковому напрацюванні зазначені дані свідчать про те, що режими вдосконаленої технології методу припрацювання деталей КШМ і ЦПГ сприяють підвищенню зносостійкості деталей спряжень, збільшенню міжремонтного ресурсу двигунів.

За результатами експлуатаційних випробувань двигунів ЯМЗ-238 визначено, що з використанням методу накладання змінного електричного струму значно підвищується ущільнююча здатність ЦПГ: прорив газів в картер зменшився з 72,5 до 42 л/хв., а вигар оливи – з 0,195 до 0,171 кг/год. Більш якісне припрацювання основних спряжень двигуна запропонованим методом дозволило підвищити його потужність на 5,98% і знизити погодинну витрату палива на 6,98%. Експлуатаційні випробування двигунів ЯМЗ-238, обкатаних з використанням методу, підтвердили результати стендових випробувань, що показали меншу потужність механічних втрат більш якісним припрацюванням спряжень КШМ і ЦПГ.

Розроблені технологічні процеси запропонованого методу припрацювання основних спряжень турбокомпресорів, гідроагрегатів, зубчастих зачеплень для підвищення їх довговічності, обґрунтовано їх режими (табл.2,3).

Результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень удосконалених сумісних процесів методу припрацювання спряжень деталей вузлів і агрегатів з накладанням змінного електричного струму показали:

ресурс агрегатів при виготовлені і ремонті підвищився на 15...30%, що скоротить витрати, як мінімум, на один капітальний ремонт за повний термін експлуатації; зменшується собівартість припрацювання і обкатки за рахунок скорочення часу на довідні і обкатні роботи в 1,7 і зменшення вартості необхідних основних фондів для виконання робіт в 1,9 разів; витрата електроенергії і палива на обкатування одного двигуна скорочується, відповідно, у 8,2 та 3,4 рази; проведення довідних операцій по поліпшенню якості поршневих кілець ДВЗ, ущільнювальних кілець турбокомпресорів, циліндричних і сферичних спряжень гідроагрегатів, зубчатих зачеплень дозволяє зберегти значну кількість запасних частин, що відбраковувалися раніше.

Таблиця 2 - Режими припрацювання основних спряжень гідроагрегатів
(на прикладі НПА-64)

Спряження деталей, що доводяться	Оптимальні технологічні режими	Склад електроліту
циліндричні спряження "плунжер-втулка"	$I=4A$; $U_{xx}=4B$, $n=700 \text{ хв}^{-1}$; $t=10 \text{ хв.}$; навантаження - 40 Н	суміш гліцерину з 20% водним розчином Na_2CO_3 в співвідношенні 84:16 з додаванням до нього 4% олеїнової кислоти
сферичні спряження "плунжер-п'ята"	$U_{xx}=4B$; $n=150 \text{ хв}^{-1}$; $t=10 \text{ хв.}$; навантаження - 1 Н	суміш гліцерину з 25% водним розчином $NaNO_3$ і 5% розчином Na_3PO_4 в співвідношенні 5,25:1 з додаванням до нього 3% олеїнової кислоти

Таблиця 3 - Режими припрацювання основних спряжень зубчастих зачеплень

Спряження деталей, що доводяться	Оптимальні технологічні режими	Склад електроліту
прямозубе зачеплення оливного насосу двигуна 4Ч12/14	$I=4A$; $n=50 \text{ хв}^{-1}$; $t=10 \text{ хв.}$;	суміш гліцерину з 20% водним розчином Na_2CO_3 в співвідношенні 84:16
редуктор головної передачі колісного трактора 3 тягового класу	$U_{xx}=4B$; $I=100A$; $n=7,5 \text{ хв}^{-1}$; $t=10 \text{ хв.}$	

Економічний ефект від впровадження технології припрацювання накладанням змінного електричного струму при експлуатації досягається за рахунок підвищення ресурсу вузлів і агрегатів та зменшення витрат палива і картерної оливи на угар при експлуатації. Розроблено рекомендації виробництву і споживачу для впровадження запропонованого методу припрацювання при виготовленні і ремонті вузлів і агрегатів МСГТ.

ВИСНОВКИ

У роботі розв'язана науково-прикладна проблема створення теоретичних основ методу припрацювання накладанням змінного електричного струму на спряження деталей з різними матеріалами і видами макрогеометричних відхилень із забезпеченням керування процесами і технологічними параметрами для підвищення довговічності вузлів і агрегатів мобільної сільськогосподарської техніки при виготовленні і ремонті.

1. Проведеним аналізом робіт вітчизняних і зарубіжних учених з механізмів та закономірностей процесів припрацювання основних спряжень деталей з макрогеометричними відхиленнями виявлено, що більшість технологічних прийомів, спрямованих на прискорення припрацювання, виявляються недостатньо ефективними при усуненні цих відхилень, оскільки поверхні тертя не являють собою сімейства еквідистантних поверхонь, і остаточне припрацювання на мікрорівні можливе тільки після усунення макрогеометричних відхилень. Одним з перспективних напрямів дослідження прискорення припрацювання є використання суміщених електрохіміко-механічних процесів, які дозволяють ефективно усувати макрогеометричні відхилення, поліпшити технічні параметри робочих поверхонь деталей та керувати процесами припрацювання. Проте цей метод досліджений недостатньо і вимагає розробки теоретичних основ процесів припрацювання, системного методологічного підходу та експериментального підтвердження при вирішенні проблеми підвищення довговічності вузлів і агрегатів МСГТ.

2. Показано, що вирішити проблему створення теоретичних основ припрацювання з накладанням змінного електричного струму для підвищення довговічності ресурсовизначальних спряжень вузлів і агрегатів МСГТ можливо на основі комплексу теоретичних і експериментальних досліджень процесів з виявленням принципів і методів керування. Розроблена структурна послідовність методології дослідження і вирішення проблеми, вибрані основні методи і методики теоретичних і експериментальних досліджень процесів припрацювання, характеристик і властивостей робочих поверхонь деталей спряжень і режимів тертя в них. Дослідження припрацювання різних типів спряжень деталей вузлів і агрегатів і видів макрогеометричних відхилень проведено на спроектованих і виготовлених лабораторних установках.

3. Теоретично обґрунтовано доцільність використання методу для припрацювання спряжень деталей: циліндричних з перекосом і неспіввісністю; плоских з перекосами; сферичних з ексцентриситетом і зубчастих з перекосом.

Виявлений механізм формоутворення робочих поверхонь спряжень деталей в різних режимах тертя. Встановлено, що істотний вплив на інтенсивність знімання матеріалу деталі здійснюють: форма зони контакту, режим тертя, властивості спряжених поверхонь і фактори зовнішнього впливу. Визначено, що зміна форми і стану робочих поверхонь деталей відбувається на усіх етапах припрацювання, а вплив сукупності факторів на спряження деталей дозволяє формувати плосковершинний рельєф шорсткості поверхні. При цьому механічне активування сприяє травленню вершин виступів, а наявність поверхневих плівок і процесу газоутворення - зменшує розтравлення западин мікрорельєфу.

4. Отримані аналітичні залежності площі зношеного перерізу, об'єму і маси матеріалу різних типів спряжень деталей з макрогеометричними відхиленнями, які необхідно усунути. Розроблені теоретичні основи методу припрацювання спряжень деталей вузлів і агрегатів МСГТ. Показано, що припрацювання повинно відбуватися в пасивуючому електроліті розділенням спряжених поверхонь і забезпеченням гідродинамічного режиму тертя і протіканням електрохімічних процесів травлення з механічним активуванням та максимально швидким усунення макрогеометричних відхилень. Виявлено, що прискорення припрацювання можливе за рахунок підбору оптимального складу електроліту, який має низьку електропровідність. Показано, що при збільшенні робочої напруги до значень напруги холостого ходу, доцільно забезпечити мінімальний шар електроліту в спряженні деталей, підвищенням навантаження на нього.

5. При припрацюванні спряжень деталей вузлів і агрегатів з різними матеріалами і видами макрогеометричних відхилень встановлені закономірності розвитку плями контакту. Отримані аналітичні вирази для оцінки площі контакту в них, розрахунку мінімальної товщини шару електроліту і максимальної швидкості усунення макрогеометричних відхилень залежно від електрохіміко-механічних та геометричних факторів. Запропоновано фізико-хімічне обґрунтування процесів припрацювання при усуненні макрогеометричних відхилень у плоских, циліндричних, сферичних і зубчастих спряженнях деталей. Показано, що при реалізації методу з'являється можливість припрацювання спряжень деталей з розширеними полями допусків.

6. Експериментально виявлено і теоретично обґрунтовано, що тип спряжень і вид макрогеометричних відхилень форми і розміщення деталей здійснюють значний вплив на розвиток площі плями контакту при припрацюванні методом накладання змінного електричного струму. Визначено, що при неспіввідності циліндричного спряження площі контакту в десятки разів вище, ніж при перекосі. Показано, що призначення однакових режимів припрацювання, без урахування особливостей геометрії контакту, може привести до значного скорочення ресурсу спряжень деталей вузлів і агрегатів МСГТ.

7. Експериментальними дослідженнями доведена можливість керування характером протікання процесів припрацювання в спряженнях деталей двигунів за рахунок зміни частоти обертання колінчастого валу, параметрів

змінного електричного струму, режимів тертя та вибором складу електроліту. Виявлено, що раціональні режими припрацювання забезпечують високий вихід за струмом, мінімальний зазор в спряженнях деталей і дозволяють покращити макрогеометрію їх поверхонь: конусність роликів зменшувалася на 80% при напрузі змінного електричного струму 4В. Додавання 4% олеїнової кислоти в електроліт сприяє зростанню плями контакту на колодочці з 6 мм², на чистому електроліті, до 20 мм². Подальше збільшення вмісту олеїнової кислоти до 5% в електроліті приводить до зростання питомого розвитку площі плями контакту в порівнянні з результатами, отриманими на базовому електроліті: з 4 мм²/мг до 16,49 мм²/мг, що є граничним в умовах експерименту.

8. В результаті експериментальних і теоретичних досліджень виявлено, що найбільш ефективно процеси припрацювання протікають при значенні критерію Зоммерфельда $S_m=10^{-5}$ і для забезпечення максимальної швидкості електрохімічного знімання матеріалу деталі значення робочої напруги змінного електричного струму повинне наближатися до напруги холостого ходу. Визначено, що процеси припрацювання можна контролювати електрохімічними і механічними факторами. При анодному травленні поверхні деталі її вирівнювання залежатиме від різниці сили струму в зоні механічного активування поверхні і макрогеометричного відхилення. Чим більше ця різниця, тим швидше і ефективніше усуваються макрогеометричні відхилення.

9. Результати досліджень макрогеометричних відхилень у спряженнях деталей КШМ і ЦПГ показали істотний вплив їх характеру і величини на об'єм, що знімається, і площу контакту. Відхилення теоретичних розрахунків від експериментальних даних становить 8%. Отримані залежності маси матеріалу, що знімається, зі зразків та деталей при припрацюванні циліндричних спряжень із зворотно-поступальним рухом свідчать, що метод в 1,5...2,0 рази є більш ефективним: в експериментах без накладення змінного електричного струму можливе припрацювання механізмів з триразовим перекосом, а при накладанні струму – можливе збільшення дефектності до 5-кратного перекосу і при цьому забезпечується необхідне знімання матеріалу з поршня. У багатоопорних валів відхилення від правильних геометричних форм, навіть однієї опори, впливає на припрацювання усіх опор в цілому, і застосовувати формулу для визначення мінімальної товщини плівки мастильного матеріалу в спряженні "вал-підшипник" з макрогеометричними відхиленнями не можна без урахування величини цих відхилень.

10. Експериментально показано, що метод припрацювання з накладанням змінного електричного струму можна ефективно застосовувати для припрацювання різних спряжень деталей машин: для зменшення припрацювальних зносів і підвищення зносостійкості поверхонь деталей ЦПГ двигунів і чавунних поршневих кілець при доведенні за схемою "кільце по кільцю"; у зубчастих зачепленнях, які мають перекіс осей шестерень в допустимих межах, збільшується площа плями контакту на 41,6% від початкової величини і забезпечується припрацювання при перекосах зубчастих поверхонь до 3...4 разів, що перевищують допустимі значення; для доведення

торцевих поверхонь канавок втулок кільцевого ущільнення турбокомпресора і усунення відхилень макрогеометрії, що призводить до формування зносостійкого мікрорельєфу з пониженим припрацювальним зносом деталей на 30...40% і, відповідно, підвищенню їх ресурсу; для забезпечення якісного припрацювання основних спряжень гідроагрегатів за допомогою електроліту: суміш гліцерину з 20% водним розчином Na_2CO_3 у співвідношенні 84:16 і 4%, від цього об'єму, олеїнової кислоти; у спряженні деталей з матеріалів "бронза-сталь" дозволяє розвивати питому площі плями контакту в 3 рази більше у порівнянні з результатами припрацювання без подання змінного електричного струму; для найбільш якісного припрацювання циліндричних спряжень при напрузі 4В, частоті обертання 700хв^{-1} і навантаженні 40Н; для доведення ущільнюючих кілець турбокомпресора за схемою "кільце по кільцю", що дозволяє відновлювати їх з 95% довірчою ймовірністю, знос при цьому знаходиться в межах 4...12 мг, а збільшення зазорів в замку не перевищує 0,08 мм, що відповідає вимогам ТУ.

11. З урахуванням результатів досліджень створено теоретичні основи керування процесами методу припрацювання та розроблено алгоритм керування ефективністю усунення макрогеометричних відхилень. Виявлено, що контролювати протікання процесів припрацювання робочих поверхонь деталей можна електрохімічними і механічними факторами. Аналіз зазначених факторів свідчить, що зі збільшенням напруги електричного струму до 4В швидкість усунення макрогеометричних відхилень при реалізації запропонованого методу збільшується, а інтенсивність припрацювання вища у початковий період. Збільшення площі контакту обумовлює зростання товщини шару електроліту між деталями і знімання матеріалу з їх поверхні припиняється, виключаючи підвищений припрацювальний знос. Прискорення припрацювання можливе при використанні електролітів, що підвищують відношення анодного виходу за струмом при механічній депасивації, в зоні безпосереднього контакту, до анодного виходу за струмом без неї в зоні макрогеометричного відхилення. Залежність швидкості усунення макрогеометричного відхилення від значення коефіцієнту k_1 свідчить, що електрохімічна складова методу значно більш ефективна механічної, а при проведенні припрацювання необхідно забезпечити швидкий вихід на гідродинамічний режим тертя в спряженнях із мінімальним шаром електроліту. Механічна складова цих процесів є каталізатором анодного травлення і підвищує вихід за струмом при депасивації. Обґрунтовано, що тільки поєднання складових процесів в методі дозволяє якісно і керовано проводити припрацювання деталей спряжень вузлів і агрегатів МСГТ та сформулювати необхідний мікрорельєф, тим самим істотно підвищити їх довговічність.

12. Розроблені технологічні режими запропонованого методу припрацювання для різних типів спряжень деталей вузлів і агрегатів МСГТ дозволяють покращити характеристики робочих поверхонь деталей та підвищити їх довговічність. Виявлено, що ресурс турбокомпресорів, гідроагрегатів, і зубчатих зачеплень при припрацюванні підвищується на

15...30%, що дозволяє скоротити витрати, як мінімум, на один капітальний ремонт за повний термін експлуатації, підтверджуючи техніко-економічну ефективність запропонованого методу. Середній міжремонтний ресурс двигунів Д-240 при суміщених етапах методу припрацювання з накладанням трифазного змінного електричного струму на 15% вище, ніж ресурс двигунів, КШМ і ЦПГ яких були піддані роздільному припрацюванню. Визначено, що швидкість зношування хромованих поршневих кілець у контрольних двигунів складала $41,5 \cdot 10^{-12}$ м/с, при накладанні однофазного змінного електричного струму і роздільних етапах методу - $9 \cdot 10^{-12}$ м/с, а при накладанні трифазного змінного електричного струму і суміщеному припрацюванні - $8,5 \cdot 10^{-12}$ м/с. За результатами експлуатаційних випробувань двигунів ЯМЗ-238 визначено значне підвищення ущільнюючої здатності ЦПГ: прорив газів в картер зменшився з 72,5 до 42 л/хв., а вигар оливи – з 0,195 до 0,171 кг/год. Більш якісне припрацювання основних спряжень двигуна запропонованим методом дозволило підвищити його потужність на 5,98% і знизити погодинну витрату палива на 6,98%. Експлуатаційні випробування двигунів ЯМЗ-238 підтвердили результати стендових випробувань і показали меншу потужність механічних втрат більш якісним припрацюванням спряжень КШМ і ЦПГ та збільшення міжремонтного ресурсу на 23...28%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Замота Т.Н. Управление процессами приработки основных сопряжений деталей машин при изготовлении и ремонте: Монография // Т.Н. Замота, В.В. Аулин. – Кировоград: издатель Лысенко В.Ф.; 2015. – 303 с.
2. Замота Т.Н. Исследование влияния электролита с водным раствором Na_2CO_3 на показатели прирабатываемости пары трения сталь-сплав АО20-1 / В. П. Алексеев, Т. Н. Замота, В. В. Парфилко // Зб. наук. праць Кіровоградського державного технічного університету / Техніка в сільгосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Вип. 10. – Кіровоград: КДТУ, 2001. – С. 287-289.
3. Замота Т.Н. Исследование влияния электролита с водным раствором Na_2CO_3 на показатели прирабатываемости хромированной поверхности кольца к чугуну/ В. П. Алексеев, Т. Н. Замота, В. В. Парфилко // Зб. наук. праць Луганського національного аграрного університету: Технічні науки. – Луганськ: Луганск: ЛНАУ, 2002. – С. 9-12.
4. Замота Т.Н. Влияние электрохимико-механических процессов на трение и износ поверхностей в механизме "ползун-цилиндр" / В.П. Алексеев, Т.Н. Замота, Р.В. Зорин, М.А. Домбровский // Зб. наук. праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2003. – №31(43). – С. 4 – 9.
5. Замота Т.Н. Оценка радиальной шероховатости поршня при ЭХМП сопряжения "ползун-цилиндр" / В.П. Алексеев, Т.Н. Замота, М.А. Домбровский

// Зб. наук. праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2004 – №42(54). – С. 3-10.

6. Замота Т.Н. Моделирование процесса ЭХМП(Д) сопряжений "шейки многоопорного вала-подшипники" / В.П. Алексеев, Т.Н. Замота, Р.В. Зорин, В.А. Изюмский // Зб. наук. праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2005. – №49(72). – С. 12-16.

7. Замота Т.Н. Влияние силы тока на показатели процесса ЭХМП(Д) цилиндрично-поршневой группы при перекосе поршня / В.П. Алексеев, Т.Н. Замота, М.А. Домбровский // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин/ КНТУ, 2005, Випуск 35.1. – С. 187-189.

8. Замота Т.Н. Электрохимико-механическая доводка рабочих поверхностей втулок торцевого уплотнения турбокомпрессора. / В.П. Алексеев, А.И. Бойко, Т.Н. Замота, В. А. Изюмский. // Проблемы трибологии (Problems of tribology). – Хмельницький: ХНУ, 2006. – С. 92-95.

9. Замота Т.Н. ЭХМП(Д) пары трения на электролите с добавлением олеиновой кислоты / В.П. Алексеев, Т.Н. Замота, С.С. Иванов // Зб. наук. праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2006 – №65(88). – С. 3-7.

10. Замота Т.Н. О возможности электрохимико-механической приработки (доводки) основных сопряжений аксиально-поршневых насосов / В.П. Алексеев, Т.Н. Замота, С.С. Иванов // Зб. наук. праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2006. – №64(87). – С. 8-11.

11. Замота Т.Н. Основы теории процесса электрохимико-механической доводки сферического сопряжения / В.П. Алексеев, Т.Н. Замота, С.С. Иванов // Зб. наук. праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2007 – №76(99). – С. 3-6.

12. Замота Т.Н. Влияние токовых параметров на изменение макрогеометрии наружной поверхности стального плунжера при ЭХМП сферического сопряжения с добавлением олеиновой кислоты / В.П. Алексеев, Т.Н. Замота, С.С. Иванов // Зб. наук. праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2008. – №91. – С. 5-12.

13. Замота Т.Н. Изменение триботехнических характеристик контактных поверхностей зубчатого зацепления шестерен при электрохимико-механической приработке / В. В. Аулин, Т. Н. Замота, В. А. Изюмский // Вісник інженерної академії України, Випуск 3-4. – Київ, 2008. – С. 169-172.

14. Замота Т.Н. Влияние макрогеометрических отклонений в сопряжениях двигателей на триботехнические характеристики приработки / Т.Н. Замота, В.В. Аулин // Проблемы трибологии (Problems of tribology). – Хмельницький: ХНУ, 2009. – №4 – С. 68-75.

15. Замота Т.Н. Определение выхода по току при ЭХМП(Д) сопряжения вал-вкладыш при наличии макрогеометрических отклонений / Т.Н. Замота, Р.В. Зорин // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2010. – Випуск 40. – Частина 1. – С. 263-268.
16. Замота Т.Н. Влияние перекоса поршня в гильзе на триботехнические характеристики их контакта / Т.Н. Замота, В.В. Аулин // Вісник інженерної академії України, Випуск 1. – Київ, 2010. – С. 196-200.
17. Замота Т.Н. Сравнение различных способов ЭХМП(Д) при приработке подшипников скольжения / А.П. Кравченко, Т.Н. Замота, Р.В. Зорин // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 122/2011. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь, 2011. – С. 151-153.
18. Замота Т.Н. Исследование процессов выделения пузырьков газа в смазывающей среде при приработке и их влияние на изменение режима трения / Т.Н. Замота, В.В. Аулин // Проблеми трибології (Problems of tribology). – Хмельницький: ХНУ, 2011. – №1 – С. 95-99.
19. Замота Т.Н. Физико-химические основы процесса макроприработки плоских поверхностей трения / Т.Н. Замота // Проблеми трибології (Problems of tribology). – Хмельницький: ХНУ, 2011. – №2 – С. 26-30.
20. Замота Т.Н. Электрохимические основы процесса макроприработки плоских поверхностей трения при ЭХМП(Д) / Т.Н. Замота // Проблеми трибології (Problems of tribology). – Хмельницький: ХНУ, 2011. – №4 – С. 56-61.
21. Замота Т.Н. Развитие площади пятна контакта при макроприработке поверхностей трения / Т.Н. Замота, В.В. Аулин // Проблеми трибології (Problems of tribology). – Хмельницький: ХНУ, 2012. – №1 – С. 9-13.
22. Замота Т.Н. Повышение эффективности приработки ресурсопределяющих сопряжений транспортных средств / Т.Н. Замота // Загальнодержавний міжвідомчий наук.-техн. зб. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2015. – Випуск 45. – Частина 1. – С. 142-150.
23. Замота Т.Н. Эффективность метода ЭХМП по устранению различных макрогеометрических отклонений сопряжений деталей при изготовлении и ремонте. / Т.Н. Замота, В.В. Аулин, М.И. Черновол. // Вісник інженерної академії України. – 2015. – №4. – С. 168-174.
24. Taras Zamota. Improvement of tribotechnical characteristics of piston ring surface at running in / Taras Zamota, Alexander Kravchenko // ТЕКА, Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. – Vol. XB. – Lublin, 2010. – P. 323-330. (Закордонне періодичне видання).
25. Taras Zamota. Electrochemical-mechanical running in of the main engine's conjugations / Taras Zamota, Alexander Kravchenko // ТЕКА, Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. – Vol. XD. – Lublin, 2010. – P. 58-65. (Закордонне періодичне видання).
26. Taras Zamota, Victor Aulin. Improvement of Tribotechnical Characteristics of the Main Engine's Pairings at Electrochemical-Mechanical

running-in // TEKA, Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. – Vol. 13, № 3 – Lublin, 2013. – P. 244-251. (Закордонне періодичне видання).

27. Taras Zamota. Selective wear of cuttings elements of working organs of tillage machines with realization of self-sharpening effect / Victor Aulin, Taras Zamota // TEKA, Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. – Vol. 13, № 4 – Lublin, 2013. – P. 9-17. (Закордонне періодичне видання).

28. Замота Т.Н. Повышение качества приработки сферических трибосопряжений гидроагрегатов электрохимико-механическим методом. / Т.Н. Замота, В.В. Аулин. // Трение и смазка в машинах и механизмах. – М.: Машиностроение, 2015. – №5. – С. 19-22. (Закордонне періодичне видання).

29. Замота Т.Н. Повышение эксплуатационной износостойкости деталей машин их триботехническим восстановлением и управлением процессами приработки. / Т.Н. Замота, В.В. Аулин, С.В. Лысенко. // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2016. Vol.18 – No.2. – pp. 89-96. (Закордонне періодичне видання).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

30. Замота Т.Н. Обеспечение макрогеометрической приспособляемости трущихся поверхностей деталей машин электрохимико-механической приработкой (доводкой) / Т.Н. Замота // Сучасні проблеми триботехніки: Матеріали III Міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2009. – С. 101-102.

31. Замота Т.Н. Улучшение макрогеометрии цилиндрических поверхностей трения при электрохимико-механической доводке / Т. Н. Замота, А.П. Кравченко, В.В. Аулин // Политранспортные системы: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф., Красноярск, 25-27 ноября 2010 г. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2010. – С. 235-240.

32. Замота Т.Н. Улучшение триботехнических характеристик подшипников скольжения двигателей / Т.Н. Замота, Р.В. Зорін // Сучасні проблеми триботехніки: Матеріали III Міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2009. – С. 99-100.

33. Замота Т.Н. Повышение износостойкости чугунных поршневых колец дизелей / Т.Н. Замота, Р.В. Зорин, В.В. Аулин // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 9-й Междунар. научн.-техн. конф., г. Ялта – Киев: АТМ України, 2009. – С. 60-63.

34. Замота Т.Н. Доводка торцевого уплотнения турбокомпрессора электрохимико-механическим способом / Т.Н. Замота, В.В. Аулин // Наука-образованию, производству, экономике: Материалы Восьмой междунар. научн.-техн. конф., г. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2010. – С. 92-93.

35. Замота Т.Н. Теоретические предпосылки ЭХМП машин / Т.Н. Замота // Тези Міжнар. наук.-практ. конф. "Ольвійський форум-2010": Стратегії України в геополітичному просторі, 11-15 червня, 2010. – Ялта, Крим, Україна. – С. 18-19.

36. Замота Т.Н. Исследование процесса ЭХМП(Д) подшипников скольжения ДВС с макрогеометрическими отклонениями на трехфазном токе / Т.Н. Замота, Р.В. Зорин, А.П. Кравченко // Материалы 6-й Междунар. научн.-техн. конф. "Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств". – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2010. – С. 92-97.

37. Taras Zamota. Improvement of roughness at running-in surfaces of details / Taras Zamota, Alexander Kravchenko, Viktor Aulin // Сборник доклады XVI научно-технической конференции с международно участие " Транспорт, экология, устойчиво развитие", 20-22 май 2010, Ековарна – 2010. – С. 607-614.

38. Замота Т.Н. Улучшение приработки поверхностей трения / А.П. Кравченко, Т.Н. Замота, В.В. Аулин // Материалы Междунар. научн. конф. "Двигатели внутреннего сгорания: актуальные проблемы и пути решения", 24-28 октября, 2011. – Минск, Белоруссия. – С. 98-104.

39. Замота Т.Н. Влияние электрохимических процессов, протекающих в смазывающей среде, на приработку трущихся поверхностей при ЭХМП(Д) / Т.Н. Замота // Тези Міжнар. наук.-практ. конф."Ольвійський форум-2011": Стратегії України в геополітичному просторі, 8-12 червня, 2011. – Ялта, Крим, Україна. – С. 38-39.

40. Замота Т.М. Особливості процесу ЕХМП сполучень шийки багато опорного вала-підшипники / Т.М. Замота, Р.В. Зорин, О.Э. Беляков // Матеріали 67-ої наук. конф. професорсько-викладацького складу. – К: НТУ, 2011. – С. 14-15.

41. Замота Т.Н. Выравнивание поверхностей трения с макрогеометрическими отклонениями при ЭХМП(Д) / Т.М. Замота // Актуальні проблеми інженерної механіки: Матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2011. – С. 76-77.

42. Замота Т.Н. Ускорение макрогеометрической приработки неэквидистантных поверхностей / Т.Н. Замота, В.В. Аулин // Материалы Девятой Междунар. научн.-техн. конф. "Наука – образованию, производству, экономике", 2011. – Минск, Белоруссия. – С. 107-108.

43. Замота Т.Н. Закономерности приработки деталей различных типов сопряжений / Т.Н. Замота, В.В. Аулин // Тези Міжнар. наук.-практ. конф. "Ольвійський форум-2012: Стратегії України в геополітичному просторі", "Трибологія, енерго- та ресурсозбереження", 7-8 червня, 2012. – Ялта, Крим, Україна. – С. 69-72.

44. Замота Т.Н. Управление процессом электрохимико-механической приработки деталей сельскохозяйственной техники / Т.Н. Замота, В.В. Аулин // Матеріали IX-ої Міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки". – Кіровоград. КНТУ. – 2013. – С. 221-223.

45. Замота Т.Н. Повышение ресурса основных сопряжений транспортных машин управлением процесса приработки электрохимико-механическим методом/ Т.Н. Замота, В.В. Аулин // Матеріали VIII Міжн. наук.-практ. конф. "Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту", 19-21 жовтня 2015 року: зб. наук. праць. / Вінницький національний технічний університет [та ін.]. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – С. 19-22.

46. Замота Т.Н. Управление процессом приработки поверхностей деталей основных сопряжений машин / Т.Н. Замота // Тези Міжнар. наук.-практ. конф. "Ольвійський форум-2013: Стратегії України в геополітичному просторі", "Трибологія, енерго- та ресурсозбереження", 7-8 червня, 2013. – Ялта, Крим, Україна. – С. 68-70.

47. Замота Т.Н. Методологический подход к повышению качества приработки сопряжений транспортных средств / Аулин В.В., Замота Т.Н. // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології [Збірка матеріалів IV Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф. (17-19 листопада 2015 р., м. Харків)]. – Харків: ХНАДУ, 2015. – С. 85-87.

48. Zamota T. Increase of efficiency of running-in process of the basic machines' units. / Zamota T., Aulin V. // Матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф. Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації с.-г. техніки. – Кіровоград: КНТУ. – 2015. – С. 165-166.

*Наукові праці, в яких додатково опубліковані
основні наукові результати дисертації:*

49. Пат. 24735 України на корисну модель, МПК (2006), G01M 15/00. Спосіб припрацювання деталей / В.П. Алексєєв, Т.М. Замота та ін.; заявник і патентотримувач ЛНАУ. – №u200702811; заявл. 16.03.2007; опубл. 10.07.2007; Бюл. №10.

50. Пат. 48905 України на корисну модель, МПК (2009) B23H 9/00, F02B 79/00. Спосіб припрацювання сполучень деталей дизеля / В.В. Аулін, Т.М. Замота, О.В. Кузик та ін.; заявник і патентотримувач КНТУ. – №u200910482; заявл. 16.10.2009; опубл. 12.04.2010; Бюл. №7.

51. Пат. 88977 України на корисну модель, МПК (2014.01), G01M 13/00. Спосіб припрацювання трибоспряжень / В.В. Аулін, Т.М. Замота та ін.; заявник і патентотримувач КНТУ. – №u201312052; заявл. 14.10.2013; опубл. 10.04.2014; Бюл. №7.

52. Пат. 88978 України на корисну модель, МПК (2014.01), G01M 13/00. Спосіб припрацювання трибоспряжень / В.В. Аулін, Т.М. Замота та ін.; заявник і патентотримувач КНТУ. – №u201312057; заявл. 14.10.2013; опубл. 10.04.2014; Бюл. №7.

53. Пат. 108788 України на корисну модель, МПК (2016.01), G01M 15/00. Спосіб припрацювання деталей / В.В. Аулін, Т.М. Замота та ін.; заявник і патентотримувач КНТУ. – №u201601984; заявл. 25.07.2016; опубл. 25.07.2016; Бюл. №14.

АНОТАЦІЯ

Замота Т.М. Наукові основи припрацювання спряжень деталей мобільної сільськогосподарської техніки при виготовленні та ремонті методом накладання змінного електричного струму. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. – Кіровоградський національний технічний університет, Кропивницький, 2016.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми створення теоретичних основ припрацювання методом накладання змінного електричного струму на спряження деталей з різними матеріалами і видами макрогеометричних відхилень із забезпеченням керування процесами і технологічними параметрами для підвищення довговічності вузлів і агрегатів мобільної сільськогосподарської техніки при виготовленні і ремонті. Розроблена структурна послідовність методології дослідження і вирішення проблеми, вибрані основні методи і методики теоретичних і експериментальних досліджень процесів припрацювання, характеристик і властивостей робочих поверхонь деталей спряжень і режимів тертя в них. Спроектовані і виготовлені установки і фізичні моделі для дослідження закономірностей процесів припрацювання різних типів спряжень деталей вузлів і агрегатів і видів макрогеометричних відхилень.

Теоретично обґрунтовано доцільність використання методу для припрацювання спряжень деталей: циліндричних з перекосом і неспіввісністю; плоских з перекосами; сферичних з ексцентриситетом і зубчастих з перекосом. Виявлений механізм формоутворення робочих поверхонь спряжень деталей в різних режимах тертя. Встановлені закономірності розвитку плями контакту при припрацюванні спряжень деталей вузлів і агрегатів з макрогеометричними відхиленнями. Отримані аналітичні вирази для оцінки площі контакту в них, розрахунку мінімальної товщини шару електроліту і максимальної швидкості усунення макрогеометричних відхилень залежно від електрохіміко-механічних та геометричних факторів. Експериментально показано, що метод можна ефективно застосовувати для припрацювання різних спряжень деталей машин. На основі результатів досліджень створено теоретичні основи керування процесами припрацювання.

Розроблено алгоритм керування процесами припрацювання спряжень деталей з максимальною ефективністю усунення макрогеометричних відхилень. Показано, що електрохімічна складова процесів методу припрацювання значно більш ефективна механічної при швидкому виході на гідродинамічний режим тертя в спряженнях із забезпеченням мінімального шару електроліту. Механічна складова при цьому є каталізатором анодного травлення і підвищує вихід за струмом при депасивації. Обґрунтовано, що тільки поєднання цих складових дозволяє якісно і керовано проводити припрацювання робочих поверхонь деталей спряжень вузлів і агрегатів МСГТ, сформулювати необхідний мікрорельєф.

Розроблені технологічні режими методу припрацювання для різних типів спряжень деталей, які дозволяють істотно покращити характеристики їх робочих поверхонь деталей і сприяють підвищенню довговічності.

Ключові слова: припрацювання, мобільна сільськогосподарська техніка, спряження деталей, вузли, агрегати, ресурс, довговічність, виготовлення, ремонт, керування процесами припрацювання.

АННОТАЦИЯ

Замота Т.Н. Научные основы приработки сопряжений деталей мобильной сельскохозяйственной техники при изготовлении и ремонте методом наложения переменного электрического тока. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.11 – машины и средства механизации сельскохозяйственного производства. – Кировоградский национальный технический университет, Кропивницкий, 2016.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы создания теоретических основ приработки методом наложения переменного электрического тока на сопряжения деталей с различными видами макрогеометрических отклонений с обеспечением управления процессами и технологическими параметрами для повышения долговечности узлов и агрегатов мобильной сельскохозяйственной техники при изготовлении и ремонте. Разработана структурная последовательность методологии исследования и решения проблемы, выбраны основные методы и методики теоретических и экспериментальных исследований процессов приработки, характеристик и свойств рабочих поверхностей деталей сопряжений и режимов трения в них. Спроектированы и изготовлены установки и физические модели для исследования приработки различных типов сопряжений деталей узлов и агрегатов и видов макрогеометрических отклонений. Теоретически обоснована целесообразность использования метода для приработки сопряжений деталей: цилиндрических с перекосом и несоосностью; плоских с перекосами; сферических с эксцентриситетом и зубчатых с перекосом. Обнаружен механизм формообразования рабочих поверхностей сопряжений деталей при различных режимах трения. Установлены закономерности развития пятна контакта при приработке сопряжений деталей узлов и агрегатов с макрогеометрическими отклонениями. Получены аналитические выражения для оценки площади контакта в них, расчета минимальной толщины слоя электролита и максимальной скорости устранения макрогеометрических отклонений в зависимости от электрохимико-механических и геометрических факторов. Полученные зависимости массы изнашиваемого материала образцов и деталей при приработке цилиндрических сопряжений с возвратно-поступательным движением свидетельствуют, что предложенный метод приработки в 1,5...2,0 раза эффективнее: в экспериментах без наложения переменного электрического тока возможна приработка механизмов с трехкратным перекосом, а при

наложении тока дефектность сопряжения может быть увеличена почти до пятикратного перекося и при этом обеспечивается необходимый съем материала с поршня. Экспериментально показано, что метод может эффективно применяться для приработки различных сопряжений деталей машин.

Используя результаты исследований, созданы теоретические основы управления процессами приработки. Разработан алгоритм управления процессами приработки сопряжений деталей с максимальной эффективностью устранения макрогеометрических отклонений. Показано, что электрохимическая составляющая метода значительно более эффективна механической, а при проведении приработки необходимо обеспечить быстрый выход на гидродинамический режим трения в сопряжениях с обеспечением минимального слоя электролита. Механическая составляющая этих процессов является катализатором анодного травления и повышает выход по току при депассивации. Обосновано, что только сочетание этих составляющих в методе позволяет качественно и управляемо проводить приработки рабочих поверхностей деталей сопряжений узлов и агрегатов МСХТ, сформировать необходимый микрорельеф, тем самым существенно повысить их долговечность.

Разработаны технологические режимы метода для различных типов сопряжений деталей узлов и агрегатов МСХТ, которые позволяют существенно улучшить характеристики рабочих поверхностей деталей, и способствуют повышению их износостойкости и надежности. Выявлено, что средний межремонтный ресурс экспериментальных двигателей Д-240 при совмещенных этапах ЭХМП с наложением трехфазного переменного электрического тока на 15% выше чем ресурс двигателей, КШМ и ЦПГ которых были подвергнуты отдельной приработке. По результатам эксплуатационных испытаний двигателей ЯМЗ-238 определено, что с использованием метода значительно повышается уплотняющая способность ЦПГ: прорыв газов в картер уменьшается с 72,5 до 42 л/мин, а угар масла – с 0,195 до 0,171 кг/ч. Более качественная приработка основных сопряжений предложенным методом позволила повысить мощность двигателя на 5,98% и снизить часовой расход топлива на 6,98%. Эксплуатационные испытания двигателей ЯМЗ-238, обкатанных с использованием метода, подтвердили результаты стендовых испытаний, показали меньшую мощность механических потерь за счет более качественной приработки сопряжений КШМ и ЦПГ и увеличение межремонтного ресурса на 23...28%.

Выявлено, что межремонтный ресурс турбокомпрессоров, гидроагрегатов, и зубчатых зацеплений при приработке с наложением переменного электрического тока повышается на 15...30%, что позволяет сократить расходы, как минимум, на один капитальный ремонт, за весь срок эксплуатации, подтверждая технико-экономическую эффективность метода. Разработаны рекомендации производству и потребителю для внедрения предложенного метода.

Ключевые слова: приработка, мобильная сельскохозяйственная техника, сопряжения деталей, узлы, агрегаты, ресурс, долговечность, изготовление, ремонт, управление процессами приработки.

ABSTRACT

Zamota T. N. Scientific basis of running-in of pairings of parts of mobile agricultural machinery at manufacture and repair by method of imposition of alternating electric current. –Manuscript.

Thesis for the Doctor's degree of Technical Sciences on specialty 05.05.11 – machines and means of mechanization of agricultural production. – Kirovograd National Technical University, Kropyvnytskyi, 2016.

The thesis is devoted to solving of the scientific and applied problem of theoretical basis of running-in by method of imposition of alternating electric current of pairings of parts with different materials and types of macrogeometrical rejections with providing of control for process and technological parameters to improve the durability of units and aggregates of mobile agricultural machinery at manufacture and repair. The structural progression of the research methodology and solve problem is developed, the selected basic methods and techniques of theoretical and experimental researches of running-in processes, characteristics and properties of working surfaces of pairings of parts and friction modes in its are selected. The experimental devices and the physical models to study the running-in of different types of pairings of parts of units and aggregates and macrogeometrical rejections are designed and fabricated.

The feasibility of using the method for the running-in of pairings of parts is theoretically justified: cylindrical with obliquity and misalignment; flat with obliquities; spherical with eccentricity and tothing out of alignment. The mechanism of formation of the working surfaces of pairings of parts in the various modes of friction is discovered. The regularities of the raising of the contact area at running-in of pairings of parts of units and aggregates with macrogeometrical rejections are defined. The analytical expressions for the estimation of the contact area in the calculation of the minimum thickness of the electrolyte layer and the maximum speed of elimination of the macrogeometrical rejections which depending from electrochemical-mechanical and geometrical factors are obtained. It is experimentally shown that the method can be efficiently used for running-in of various pairings of machine parts. Using the research results the theoretical foundations of running-in processes control are established.

The algorithm of running-in processes control of pairings of parts with maximum eliminate of macrogeometrical rejections efficiency is developed. The electrochemical component of the method is much more efficient than mechanical, and during running-in it is necessary to provide quick formation of the hydrodynamic friction mode in pairings with minimum electrolyte layer. The mechanical component of these processes is a catalyst for the anodic etching and increases the current output during depassivation. It is proved that only the combination of these components in

the method allows qualitatively and under control to carry out the process of running-in of parts surfaces of pairings of units and aggregates of mobile agricultural machinery and to form the necessary microrelief. The technological modes of the method for running-in of different types of pairings of parts of units and aggregates of mobile agricultural machinery, which can significantly improve the characteristics of the working surfaces and increasing its wearproofness and reliability are developed.

Key words: running-in, mobile agricultural machinery, pairings of parts, units, aggregates, resource, durability, manufacture, repair, control of running-in processes.

Підписано до друку 7.12.2016 р. Формат 60х80/16.
Ум друк. арк. – 1,9. Обл.-вид. – 1,8.
Наклад 100 прим. Зам №266/2016.

РВЛ КНТУ. 25030, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8
Тел. 390-441, 559-245.