

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

Мікосянчик Оксана Олександрівна



УДК 621.891

**СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА РЕОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ
МАСТИЛЬНОГО ШАРУ В КОНТАКТІ ТЕРТЯ В УМОВАХ
НЕСТАЛИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Галузь знань 13 – механічна інженерія

Автореферат дисертації
на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор

Запорожець Олександр Іванович,

Національний авіаційний університет, директор Навчально-наукового інституту Екологічної безпеки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Іщенко Леонід Йосипович,** Запорізький національний технічний університет, директор машинобудівного інституту;

доктор технічних наук, професор **Диха Олександр Володимирович,** Хмельницький національний університет, завідувач кафедри зносостійкості і надійності машин;

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

Захист дисертації відбудеться “29” червня 2017 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06 в Національному авіаційному університеті за адресою: 03680, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03680, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корпус 8.

Автореферат розісланий “__” _____ 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., с.н.с.

О. Ю. Корчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Довговічність багатьох машин і механізмів різних галузей промисловості, і, зокрема, транспортного машинобудування, значною мірою характеризується працездатністю трибосистем, умови роботи яких визначаються високими значеннями контактних навантажень, сумарних швидкостей кочення і температур в зоні фрикційного контакту.

Видатні вчені Ребіндер П.А., Костецький Б.І., Ахматов А.С., Райко М.В., Бершадський Л.І., Дроздов Ю.М., Запорожець В.В., Матвеевський Р.М. та ін. внесли значний внесок в теорію і практику розвитку фундаментальних основ оцінки процесів динамічної рівноваги при утворенні і руйнуванні вторинних структур і метастабільного стану контактних поверхонь в процесі самоорганізації трибосистеми.

Рішення проблеми зносостійкості матеріалів триботехнічного призначення на нанорівні вимагає систематичних досліджень, які дозволили б вирішити важливу науково–технічну проблему мінімізації зносу і підвищення ресурсу трибосистеми з позиції управління процесами самоорганізації вторинних структур в присутності граничного шару мастильного матеріалу.

Виходячи з цього, виникає необхідність в розробці принципово нових методик оцінки кінетики зміни триботехнічних характеристик мастильних матеріалів і вторинних структур (утворення, зміна і руйнування) в процесі контактної взаємодії. Впровадження автоматизованих методів і засобів контролю триботехнічних параметрів і випробування контактних поверхонь в реальному масштабі часу в режимах, максимально наближених до експлуатаційних, є складовою частиною завдання щодо підвищення точності і достовірності при використанні отриманих експериментальних результатів в реальних вузлах тертя.

Таким чином, науковою проблемою є управління процесами самоорганізації дисипативних структур, забезпечення мінімізації зносу і підвищення ресурсу пар тертя шляхом розробки методик оцінки і вибору мастильних матеріалів з урахуванням структурно-енергетичних і реологічних факторів, спрямованих на зменшення інтенсивності накопичення енергії руйнування контактних поверхонь та мастильного шару, створення градієнтності міцнісних характеристик внаслідок локалізації деформаційних процесів в тонкому поверхневому шарі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково–дослідної роботи Національного авіаційного університету та інших організацій. Автор був співвиконавцем держбюджетних тем. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково–дослідної роботи №ДЗ/499–2009 (0109U007638) в Національному транспортному університеті за програмою Державне замовлення на наукові та науково–технічні розробки та державні цільові програми. Автором створена технологія компаундування композицій товарних олив з поліфункціональними присадками та нанодисперсними добавками та розроблені рекомендації щодо удосконалення існуючих або створення нових композицій моторних олив. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково–дослідної роботи ДБ№67 (0109U002144) в

Національному транспортному університеті за бюджетною програмою "Прикладні дослідження і розробки за напрямами науково-технічної діяльності вищих навчальних закладів та наукових установ" (КПКВ 2201040). Автором розроблені методики оцінки ефективності мастильної дії олив в несталих умовах роботи трибосистеми. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи ДБ№85 (0110U000124) в Національному транспортному університеті за бюджетною програмою "Прикладні дослідження і розробки за напрямами науково-технічної діяльності вищих навчальних закладів та наукових установ" (КПКВ 2201040). Автором проведена оцінка кінетики формування та структури граничних адсорбційних шарів залежно від фізико-хімічних властивостей мастильного матеріалу та механо-фізико-хімічних змін поверхневих і приповерхневих шарів металу. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи №789-ДБ12 (0112U002057) в Національному авіаційному університеті за напрямом Новітні ресурсозберігаючі технології. Автором розроблені програмно-апаратний комплекс та методики оцінки для дослідження триботехнічних характеристик трибоелементів в несталих умовах роботи. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи №865-ДБ13(0113U000084) в Національному авіаційному університеті згідно Державній цільовій програмі прогнозування науково-технологічного та інноваційного розвитку України за напрямом Найважливіші проблеми фізико-математичних і технічних наук. Автором розроблені математичні моделі прогнозування оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів в умовах змащування при несталих режимах роботи.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення зносостійкості вузлів тертя машин і механізмів на етапах їх проектування, експлуатації та ремонту шляхом підбору сумісності трибоелементів на основі науково-обґрунтованого вибору застосування методик оцінки триботехнічних характеристик контактних поверхонь, мастильного матеріалу та довговічності зношуваного шару при самоорганізації дисипативних структур в несталих умовах тертя.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні завдання:

- розробити термо-кінетичну модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів в умовах змащування при несталих режимах роботи за кінетикою зміни енергії активації руйнування областей багатоциклової контактної втомленості та дебрис-шару з позицій термофлуктуаційної теорії міцності твердих тіл;

- створити автоматизований комплекс та розробити методологію оцінки триботехнічних характеристик елементів трибоспряження в реальному масштабі часу в несталих умовах тертя;

- розробити методику оцінки температурно – механічної стійкості граничних шарів мастильних матеріалів при навантаженнях, що обумовлюють появу пружно-пластичних деформацій приповерхневих шарів контактних поверхонь;

- встановити закономірності зміни змащувальних, реологічних, антифрикційних та протизношувальних властивостей олив при формуванні мастильними матеріалами ретикулярних граничних шарів на активованих тертях поверхневих шарах металу;

– дослідити та провести комплексну оцінку впливу питомої роботи тертя, інтенсивності тепловиділення, типу вторинних структур, інтенсивності насичення активними елементами приповерхневих шарів металу на зносостійкість пар тертя в лінійному контакті в різних режимах змащувальної дії;

– визначити закономірності зношування та розробити методику прогнозування оптимальної структури поверхневих шарів металу при технологічній та експлуатаційній модифікації на основі оцінки ефективної («інтегральної») мікротвердості, яка враховує мікротвердість поверхневих шарів металу в процесі структурної пристосованості при терті та градієнтність розподілу мікротвердості по глибині деформованого шару;

– визначити вплив граничних змащувальних шарів, структурно–фазових перетворень, макронапружень стиснення та мікронапружень, інтенсивності розчинення атомів втілення у кристалічній ґратці приповерхневих деформованих шарів металу на зносостійкість контактних поверхонь в умовах кочення з проковзуванням в діапазоні 3 – 40%;

– розробити рекомендації по застосуванню покриттів самофлюсуючого гранульованого порошку ПГ–АН9 та порошкового дроту ПП–Нп–30ХГСА при виготовленні та зміцненні, ремонті та відновленні зубчастих коліс та шестерен на основі експериментальної оцінки змащувальних, антифрикційних та протизношувальних властивостей сформованих в процесі тертя захисних дисипативних структур;

– створити методику розрахунку основних трибологічних характеристик пари ковзання верхнє компресійне кільце – гільза циліндра двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), яка дозволить спрогнозувати ефективність мащення та ступінь зношування контактних поверхонь.

Об’єкт дослідження – процеси тертя та зношування дисипативних структур елементів трибоспряжень в режимі кочення з проковзуванням та ковзання в несталих умовах роботи.

Предмет дослідження – закономірності впливу змащувальних, реологічних та енергетичних параметрів дисипативних структур на антифрикційні та протизношувальні властивості контактних поверхонь в несталих умовах роботи.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконані на підставі фундаментальних положень трибології, термодинамічної теорії прогнозування та руйнування твердих тіл, концепції самоорганізації та зносостійкості трибосистем, структурно–енергетичної пристосованості матеріалів, нерівноважної кінетики фазових переходів першого роду, положень трибохімії і реології мастильного шару. Лабораторні та стендові випробування виконувались на основі теорії моделювання та планування експерименту. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана із застосуванням комп’ютерних технологій з використанням методів математичного аналізу, методів скінченних елементів та математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Розроблена термо–кінетична модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно–енергетичних параметрів в умовах змащування при несталих режимах роботи, яка включає методику оцінки активаційних характеристик

матеріалів, що характеризують довговічність області багатоциклової втоми і області малоциклової втоми debris–шару. Встановлено вплив напружено–деформованого стану матеріалу контактних поверхонь, ступеня зміцнення приповерхневих шарів, типу вторинних структур і граничних плівок мастильного матеріалу на енергію активації руйнування при терті, яка становить 110 – 300 кДж/моль для різних марок сталей. Вперше встановлено, що параметр зовнішнього середовища ΔG може змінювати енергію активації руйнування від –10 до +35 кДж/моль залежно від типу мастильного матеріалу, питомої роботи тертя, ступеня зміцнення – знеміцнення контактних поверхонь.

2. Вперше розроблена методика розрахунку інтенсивності зношування елементів трибоспряжень, що працюють в умовах кочення з проковзуванням, яка враховує кінетику зміни антифрикційних, реологічних, енергетичних характеристик контакту та довговічність debris–шару. Мінімальна інтенсивність зношування на рівні 10^{-10} – 10^{-11} в діапазоні контактного навантаження 100 – 500 МПа характерна для пар тертя, які експлуатуються в умовах кочення з проковзуванням 10 – 20%.

3. Вперше розроблено математичну модель оцінки локалізації вектору максимальних дотичних напружень при переході трибосистеми від гідродинамічного до граничного режиму мащення на підставі експериментально встановленої зміни напружено–деформованого стану поверхонь в результаті появи зон локального підвищеного зносу, градієнтного розподілу мікротвердості поверхневих шарів металу по глибині і моделювання напружено–деформованого стану поверхневих шарів методом скінченних елементів.

4. Вперше встановлено залежність зносостійкості контактних поверхонь від структурно–фазових перетворень у поверхневих шарах металів при терті в умовах кочення з різним ступенем проковзування. Результатом комбінованого впливу динамічного навантаження, дотичних напружень зсуву, питомої роботи тертя і збільшення локальної температури при граничному режимі мащення є зростання міжплощинних відстаней, формування макронапружень стиснення, зміна кристалографічної текстури у поверхневому шарі внаслідок інтенсивної деформації при терті. Формування в поверхневому шарі дрібнозернистої структури з розмірами зерен 40 – 60 нм, утворення вторинних структур, насичених оксидом Fe_2O_3 , формування макронапружень стиснення на рівні –380...–500 МПа призводить до зміцнення поверхневих шарів металу при терті та підвищення їх зносостійкості в умовах кочення з проковзуванням 10 – 20%.

5. Встановлено механізми залежності інтенсивності зношування трибоелементів від зміни енергоємності контакту при структурній пристосованості вторинних структур на основі оцінки температурної і механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу і міцності матеріалу контактних поверхонь. Формування мастильними матеріалами граничних хемосорбційних та хімічно модифікованих шарів товщиною 0,5 – 2 мкм обумовлює зниження питомої роботи тертя в контакті в 1,7...4 рази, зменшення деформованого об'єму металу в 1,3...2,3 рази. Збільшенню періоду нормальної роботи трибоспряжень до проявів ознак схоплювання в 1,7 – 3,8 раз в екстремальних режимах мащення сприяє введення в базову основу олив

протизношувальних присадок, зміцнення контактних поверхонь за технологією імпульсного термоциклічного іонного азотування.

6. Вперше теоретично і експериментально обґрунтований механізм прояву процесу схоплювання контактних поверхонь з позицій фазових переходів першого роду в граничних шарах мастильного матеріалу. Коливальний характер стрімкого збільшення або зменшення товщини мастильного шару (0,2...4 мкм), коефіцієнта тертя (0,004...0,68) і питомої роботи тертя (2000 – 12000 Дж/мм²) при схоплюванні обумовлений переходом упорядкованих твердокристалічних шаруватих ретикулярних структур мастильного матеріалу в рідку фазу при збільшенні локальної температури в контакті до 125– 400⁰С і градієнта швидкості зсуву до (0,67–86)·10⁶с⁻¹.

7. Встановлено механізми, які визначають зміну реологічних характеристик граничних змащувальних шарів при надбанні мастильним матеріалом неньютонівських властивостей. Визначено вплив гідродинамічної і негідродинамічної складових товщини мастильного шару на кінетику зміни вектору дотичних напружень, адгезійної складової коефіцієнта тертя, ступеня зміцнення – знеміцнення поверхневих шарів елементів трибоспряжень при переході гідродинамічного режиму мастильного дії до граничного або напівсухого.

8. Розроблено модель оцінки триботехнічних характеристик трибоспряження верхнє компресійне кільце – гільза циліндра двигуна внутрішнього згорання в залежності від параметрів конструкції двигуна, матеріалів пар тертя, умов роботи ДВЗ і властивостей мастильного матеріалу. Створена методика оцінки змащувальних, антифрикційних, реологічних та протизношувальних характеристик мастильного матеріалу, яка представляє собою систему алгебраїчних рівнянь, що описують кінетику зміни основних показників контакту залежно від робочого циклу в двигуні внутрішнього згорання. Вперше в алгоритмі розрахунку товщини мастильного шару встановлена кінетика зміни динамічної в'язкості та п'єзокоефіцієнту в'язкості мастильного матеріалу в контакті залежно від *i*-го кута повороту кривошипа. Методика апробована для широкого спектру моделей двигунів транспортних засобів.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено і впроваджено в практику експериментальних випробувань програмно–апаратний комплекс для оцінки триботехнічних характеристик фрикційного контакту. Програмні засоби комплексу забезпечують реєстрацію, збереження та обробку кінетики зміни змащувальних, антифрикційних, реологічних та енергетичних параметрів в реальному часі в несталих умовах роботи (пат. №88748, опубл. 25.03.14, бюл.№6).

2. Розроблено спосіб припрацювання контактних поверхонь в нестационарних умовах тертя на основі оцінки завершення етапу припрацювання за кінетикою зміни питомої роботи тертя, антифрикційних характеристик контакту та змащувальних і полімеризаційних властивостей мастильного матеріалу (пат. №92071, опубл. 25.07.14, бюл.№14).

3. Розроблено спосіб оцінки динамічної ефективної в'язкості мастильних матеріалів при формуванні гідро– та негідродинамічної складових товщини мастильного шару в несталих умовах тертя (пат. №89261, опубл. 10.04.14, бюл.№7).

4. Розроблена методика оцінки температурно–механічної стійкості граничних шарів мастильного матеріалу в екстремальних режимах тертя при контактних напруженнях, що призводять до пружно–пластичної деформації контактних поверхонь і швидкостях ковзання, що обумовлюють появу високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів.

5. Запропонована методика оцінки величини енергії активації руйнування поверхневих та приповерхневих шарів контактних поверхонь при несталій роботі пар тертя з урахуванням тривалості напрацювання до прояву перших ознак схоплювання елементів трибоспряжень та локального підвищення температури в зоні контакту.

6. Створені рекомендації щодо товщини, фізико–механічних властивостей та структурної пристосованості зносостійких покриттів з урахуванням локалізації максимальних дотичних напружень зсуву при різних режимах мащення.

7. Розроблена методика оцінки триботехнічних показників трибоспряження верхнє компресійне кільце – гільза циліндра двигуна внутрішнього згоряння залежно від робочого процесу.

Розроблений програмно–апаратний комплекс, програмне математичне забезпечення, способи і методики використовуються при проведенні наукових досліджень, виборі складу, структури та технологій нанесення зносостійких покриттів і удосконаленні мастильних матеріалів різного експлуатаційного призначення на підприємствах та установах: Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України (м. Київ), Херсонський державний завод «Палада» (м. Херсон), ТОВ «Стокхолдер» (м. Кіровоград), ТОВ ЗТМ «Аріан» (м. Фастів), Національний авіаційний університет (м. Київ). У співавторстві розроблені та впровадженні в навчальний процес методичні вказівки до виконання лабораторних робіт та курсової роботи з курсу «Триботехніка» (Національний транспортний університет, м. Київ).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Роботи, виконані разом зі співавторами, наведені в переліку публікацій. З робіт, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: XVII Міжнародній конференції „Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojedznych” (Rzeszów, 2006 p.); LXV, LXVI, LXVII наукових конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету (Київ, 2009, 2010, 2011 p.); Міжнародній науково–технічній конференції „Полимерные композиты и трибология” (Гомель, 2009 p.); Міжнародних науково–практичних конференціях „Ольвійський форум–2011 (2012): стратегії України в геополітичному просторі” (Ялта, 2011 p.; Севастополь, 2012 p.); 15–й Міжнародній науково–технічній конференції „Инженерия поверхности и реновация изделий” (Затока, 2015 p.); науково–практичній конференції „Трибология, энерго– та ресурсозбереження” (Миколаїв, 2016 p.); XI, XII Міжнародних науково–технічних конференції „Авіа–2013”, „Авіа–2015” відповідно (Київ, 2013, 2015); Міжнародній науково–технічній конференції молодих науковців „Сучасні технології в механіці”

(Хмельницький, 2016р.); The seventh world congress „Aviation in the XXI-st century”: „Safety in Aviation and Space Technologies” (Kyiv, 2016 p.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 50 наукових праць, у тому числі: 27 статей у фахових виданнях переліку МОН України, з них 14 у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 5 статей у закордонних періодичних виданнях; 13 матеріалів та тез доповідей на науково–технічних конференціях; 4 патенти на винахід та 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, семи розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 416 сторінок. Обсяг анотації складає 27 сторінок. Дисертація містить 107 ілюстрацій (із них тих, що займають повну сторінку – 8), 23 таблиці (із них тих, що займають повну сторінку – 4). Список використаних джерел із 465 найменувань займає 48 сторінок. Додаток містить 31 сторінку. Обсяг основної частини дисертації становить 298 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, поставлені мета та завдання досліджень, визначені наукова новизна і практична значимість отриманих результатів, наведені дані щодо апробації і впровадження.

У першому розділі зроблено аналіз літературних даних за темою дисертаційної роботи і проведено обґрунтування актуальності та визначені основні напрямки досліджень.

На основі аналізу літературних даних та аналізу технічного стану в умовах експлуатації зубчастих передач встановлено, що в результаті накопичення в тонких поверхневих шарах пар тертя дефектів, поява яких обумовлена впливом навантажувальних, швидкісних і температурних факторів, а також мастильного матеріалу і режимів експлуатації, відбувається їх руйнування і зниження ресурсу. На сучасному етапі розвитку трибології ще недостатньо розроблені питання, що відображають мікромеханіку руйнування твердих тіл в парах тертя. Зубчасті передачі відносяться до елементів трибоспряджень, в яких умови зношування не зберігаються постійними для всіх точок контактуючих поверхонь. Процеси накопичення і розвитку мікропошкоджень в результаті впливу циклічних навантажень за схемою «стиск – зсув» є важливою складовою питання щодо підвищення надійності трибосистеми. При циклічному навантаженні пар тертя відбувається повторення макропластичних зрушень в протилежних напрямках, що призводить до розрихлення, стирання і утворення «аморфного шару» по площинах ковзання. Це пов'язано з порушенням рівноваги внутрішньокристалічних зв'язків і початком утворення втомних мікротріщин. Для розвитку та прояву цих руйнівних процесів необхідний час для накопичення, концентрації та поширення зон руйнування. Напрямами, які потребують подальших досліджень, є визначення тривалості протікання процесів структурно–фазових перетворень, їх якісна оцінка, межі прояву їх змін та тривалості стабільності утворених структур до динамічних умов навантаження.

В екстремальних умовах тертя, при домінуючому прояві граничного та напівсухого режимів мащення, відбувається руйнування граничної плівки. З

урахуванням цих процесів, для якісної оцінки впливу температурного чинника в зоні фрикційного контакту необхідно застосовувати різний підхід при визначенні розрахункової температури залежно від режимів мащення. За умов порушення цілісності граничної плівки мастильного матеріалу відбувається різке збільшення температури, що призводить до протікання структурних та фазових перетворень, вибіркової дифузії елементів в приповерхневих деформованих об'ємах, прискореного руху дислокацій та ін.. Актуальним, в зв'язку з цим, є питання управління процесами фазових і структурних перетворень за рахунок створення умов, що забезпечують утворення стабільних дисипативних структур в процесі структурної пристосованості матеріалів контактних поверхонь та мастильного матеріалу.

В екстремальних умовах тертя внаслідок складного напруженого стану поверхневих шарів металу при одночасній дії нормальних та дотичних напружень, деформація поверхневих шарів йде переважно в напрямку дії тангенціальних сил. Навантаження, швидкість ковзання та величина проковзування контактних поверхонь створюють істотний вплив на глибину залягання максимальних дотичних напружень та на їх величину. Однак, в існуючих моделях не враховується вплив мастильного матеріалу на величину та вектор залягання дотичних зсувних напружень. Моделювання механізмів тертя в граничному та змішаному режимах мащення, які домінують при нестационарній роботі пар тертя, з метою оцінки локалізації дотичних напружень як ведучого руйнівного чинника при терті, являється перспективним напрямком в плані прогнозування кінетики зміни властивостей елементів трибоспряжень при експлуатації.

Проаналізовано сучасний стан питання оцінки триботехнічних характеристик фрикційного контакту з урахуванням енергетичних, реологічних і структурно-фазових параметрів. Ґрунтуючись на вищезазначеному, визначена мета роботи і напрямки теоретичних і експериментальних досліджень.

У другому розділі описана загальна методологія оцінки триботехнічних характеристик фрикційного контакту в несталих умовах роботи.

Для отримання достовірних результатів досліджень елементів трибоспряжень, відтворюваності та збіжності результатів експериментів створена комплексна методика моделювання трибологічних процесів на основі емпіричних залежностей та спеціального програмного забезпечення, що дозволяє розробляти адекватні заходи в управлінні процесами, які протікають в фрикційному контакті трибосистеми. Для оцінки триботехнічних характеристик контакту створено програмно-апаратний комплекс, до складу якого входить установка тертя, електронний блок, програмне забезпечення «Тертя», встановлене на ПК типу IBM PC, що дозволяє проведення випробувань в умовах кочення, ковзання, реверсу, розширення діапазону коефіцієнту проковзування (від 0 до 100%) між контактуючими тілами тертя. В створеній програмі є окремий канал візуальної оцінки кінетики зміни основних триботехнічних показників контакту в режимі on-line.

Розроблена методика оцінки температурно-механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу в критичних режимах тертя при контактних напруженнях, що призводять до пружно-пластичної деформації контактних поверхонь і швидкостях ковзання, що обумовлюють появу високих градієнтів

швидкості зсуву змащувальних шарів. Розроблена методика оцінки величини енергії активації руйнування поверхневих та приповерхневих шарів контактних поверхонь при несталій роботі пар тертя на підставі отриманих експериментальних даних щодо зміни тривалості напрацювання до прояву перших ознак схоплювання елементів трибоспряжень та критичної температури в зоні контакту.

Побудована феноменологічна імовірнісна модель зношування поверхневого шару в несталіх режимах, яка ґрунтується на прояві випадкового процесу Маркова з дискретним часом і станами. Для визначення компонентів матриці перехідних ймовірностей в моделі передбачається використання експериментальних залежностей інтенсивності зношування від комплексів основних факторів, що визначають перебіг процесів зношування.

Розроблена методика розрахунку товщини мастильного шару в трибоспряженні верхнє компресійне кільце – гільза циліндра двигуна внутрішнього згорання. Запропонований розрахунок кінетики зміни динамічної в'язкості і п'єзокоефіцієнта в'язкості мастильного матеріалу в контакті залежно від i -го кута повороту кривошипа.

Застосування сучасних програм реєстрації та обробки вихідних параметрів, що характеризують зміну фізико-механічного стану фрикційного контакту в реальному масштабі часу з частотою опитування менше 0,1 с, дозволяє виконувати статистичну обробку результатів експерименту, а також аналізувати кінетику розвитку трибологічних процесів, що відбуваються в зоні контакту пар тертя залежно від часу напрацювання елементів трибоспряжень. Достовірні методи розрахунку на довговічність дозволяють розробляти критерії оцінки експлуатаційної пристосованості елементів трибоспряження, вибирати оптимальні поєднання матеріалів пар тертя, фізико-хімічний склад базових олив, тип присадок і добавок для заданих умов експлуатації вузла тертя.

У третьому розділі проаналізовано взаємозв'язок змащувальних, реологічних та антифрикційних характеристик мастильних матеріалів.

Представлена методика припрацювання контактних поверхонь в нестационарних умовах роботи за кінетикою зміни основних триботехнічних характеристик контакту при одночасній оцінці фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалу контактних поверхонь, антифрикційних характеристик контакту та змащувальних і полімеризаційних властивостей мінеральних та синтетичних олив.

Зростання проковзування до 20% призводить до появи високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів порядку $0,5 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, що проявляється в зниженні антифрикційних властивостей трансмісійної оливи ТЕп-15 (API – GL-2)– момент тертя та напруга зсуву мастильного матеріалу при σ_{max} 100, 140 та 170 МПа зростають в 1,2 : 1,3 : 1,9 разів відповідно внаслідок утворення стійких когезійних зв'язків між структурними компонентами мастильного матеріалу.

Встановлено зниження енергонапруженості контакту при 170 МПа за рахунок ефективних демпфуючих властивостей граничних шарів мастильного матеріалу, який набуває в триботехнічному контакті властивостей ньютонівських рідин. Коливальний процес зміни питомої роботи тертя з великим амплітудним діапазоном ($3000 - 10000 \text{ Дж/мм}^2$) при 100 та 140 МПа свідчить про періодичний характер процесу утворення та руйнування вторинних структур. Мікротвердість контактних

поверхонь знижується на 700 МПа, інтенсивність зношування становить $I=10^{-8}$. Формування вторинних структур обумовлює зміцнення поверхневих шарів металу, мікротвердість зростає на 550 МПа, в порівнянні з вихідною мікротвердістю сталі 45, а інтенсивність зношування зменшується до $I=10^{-9}$ (рис. 1).

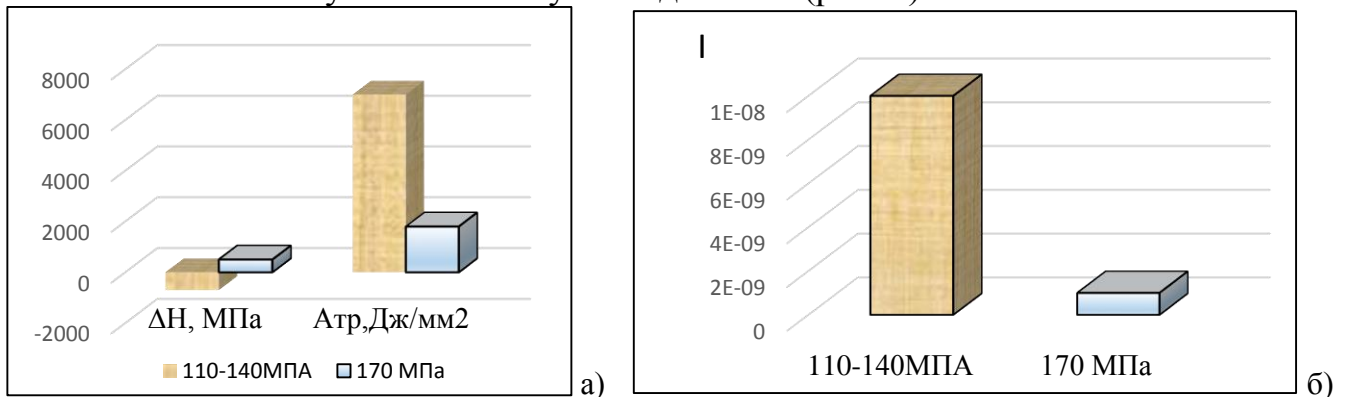


Рис. 1. Зміна мікротвердості (ΔH_{100}) поверхневих шарів металу, питомої роботи тертя ($A_{тр}$) (а) та інтенсивності зношування (I) (б) при контактних навантаженнях 110 – 170 МПа.

Граничні шари фізичної природи, сформовані на контактних поверхнях з проковзуванням 3%, характеризуються ідентичністю реологічних властивостей з об'ємною рідкою фазою мастильного матеріалу.

Такі структури чинять сильну пластифікуючу дію на поверхневі шари металу, що проявляється в зниженні адгезійної складової коефіцієнту тертя. Зростання ступеня проковзування з 10 до 40% обумовлює створення високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів, підвищує активацію контактних поверхонь та призводить до утворення хемосорбційних плівок, які представляють собою впорядковані твердокристалічні ретикулярні структури шаруватого типу та характеризуються більшим коефіцієнтом тертя (рис.2).

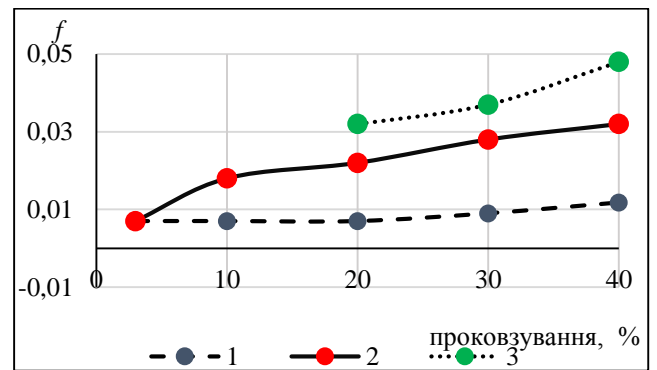


Рис. 2. Коефіцієнт тертя в екстремальних умовах: 1 – режим чистого кочення при пуску; 2 – режим кочення з проковзуванням; 3 – момент схоплювання в режимі кочення з проковзуванням

Така утворена шарувата сітчаста структура служить своєрідним резервуаром для хаотичного розташування в ній вільних неактивних молекул. Наявність таких молекул характерно для фракцій насичених і неполярних сполук, присутніх в базовій основі при компаундуванні мінеральної трансмісійної оливи.

Збільшення проковзування між контактними поверхнями призводить до прискорення періоду прояву перших ознак схоплювання, що проявляється в зростанні адгезійної складової коефіцієнта тертя при десорбції граничних шарів. Локально в екстремальних умовах проявляється коливальний процес зниження коефіцієнту тертя за рахунок короткочасних гідродинамічних ефектів внаслідок локального плавлення граничних шарів. Більш інтенсивне руйнування граничних шарів і поява перших ознак схоплювання встановлені при 430 і 415 циклах напрацювання в умовах проковзування 30 і 40% відповідно в екстремальних умовах тертя (рис. 3).

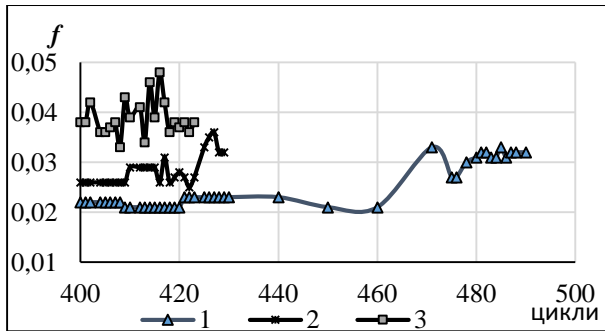


Рис. 3. Зміна коефіцієнту тертя в періоді прояву перших ознак схоплювання при коченні з проковзуванням 20 % (1), 30 % (2), 40 % (3).

ефективної в'язкості в контакті встановлено з 180 до 112 Па·с. При цьому спостерігаються різкі коливання товщини мастильного шару, збільшення якої може досягати до 4 мкм, забезпечуючи низький коефіцієнт тертя на рівні 0,006, у порівнянні з 0,014 при мінімальній товщині мастильної плівки.

Механізм цього процесу полягає в дезорієнтації граничних змащувальних шарів під дією зсувних напружень і приростом температури в контакті за рахунок збільшення швидкості ковзання, що призводить до плавлення твердокристалічного шару за рахунок механічного та температурного впливів. Мастильний матеріал знову набуває ньютонівських властивостей, стає рідким, слабшають когезійні і адгезійні сили взаємодії, збільшується об'ємна рідка фаза оливи в контакті, що призводить до короткочасного прояву гідродинамічного режиму мащення, для якого характерні високі антифрикційні властивості мастильного матеріалу.

У четвертому розділі проаналізовано механізми утворення вторинних структур при структурній пристосованості трибоелементів.

Оцінка режиму мастильної дії з урахуванням гідро– та негідродинамічної складових товщини мастильного шару встановила, що 20%-ве проковзування в контакті призводить до зниження ефективної в'язкості оливи ТАД–17і (API – GL–5) в 10 разів при змащуванні сталі 40X і в 20 разів при змащуванні сталі ШХ–15. При градієнтах швидкості зсуву по товщині мастильного шару вище $6,23 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ в умовах проковзування, напруження зсуву змащувальних шарів зростає в 2,4 рази при використанні більш м'якого матеріалу сталі 40X, що призводить і до кореляційного підвищення коефіцієнта тертя, а при змащуванні поверхонь зі сталі ШХ–15 змін напружень зсуву мастильного шару і коефіцієнта тертя не встановлено.

Встановлені показники приросту питомої роботи тертя в період пуску при чистому коченні для сталі 40X до 35 Дж/мм² в 95% циклів, а для сталі ШХ–15 – до 30 Дж/мм² в 20% циклів; при наявності проковзування енергоємність контакту різко зростає – питома робота тертя знаходиться в діапазоні 1000 – 2800 Дж/мм² і 500 – 2000 Дж/мм² для сталей 40X і ШХ–15 відповідно. Структурні відмінності сталей 40X і ШХ–15 після загартування і відпуску істотно впливають на зносостійкість металу: для сталі ШХ–15 структура дрібногочастого мартенситу з рівномірно розподіленими надлишковими карбідами характеризується високою зносостійкістю контактних поверхонь – знос відстаючої і випереджаючої поверхонь в 3,34 і 2,23 разів

Міцнісні властивості граничних хемосорбційних шарів безпосередньо залежать від швидкості ковзання в контакті, збільшення якої створює високі градієнти швидкості зсуву, що призводять до механічної і теплової деструкції сформованих плівок. В момент схоплювання контактних поверхонь при проковзуванні 40% градієнт швидкості зсуву зростає в 2 рази, напруження зсуву мастильних шарів – в 1,6 раз, а зменшення

менше, в порівнянні з аналогічними показниками, встановленими для сорбіту відпуску сталі 40Х.

Аналіз впливу змінного градієнта швидкості зсуву на реологічні властивості трансмісійної оливи Okko GL-4 80w/90 показав, що при мінімальному проковзуванні 3% для граничних шарів з слабкими фізичними Ван-дер-Ваальсовими силами взаємодії встановлені напруження зсуву, аналогічні об'ємній фазі оливи, що характерно для ньютонівських рідин. Збільшення проковзування до 10 – 40% сприяє формуванню граничних екрануючих хемосорбційних плівок, що характеризуються властивостями неньютонівських рідин. Так як градієнт швидкості зсуву змащувальних шарів при проковзуванні локалізується в гідро- і негідродинамічній складових товщини неоднорідної мастильної плівки, то підвищується опір хемосорбційних плівок їх стиранню, що проявляється в зростанні напружень зсуву змащувальних шарів – для 10, 20 і 30%-ного проковзування даний параметр збільшується відповідно в 2,1:3:3,1 рази, в порівнянні з чистим коченням.

Кінетика зміни механо-хімічних процесів при терті кочення з різною величиною проковзування показала, що початковий вплив активних компонентів трансмісійної оливи на поверхневі шари металу проявляється в зниженні їх мікротвердості в результаті пластифікування (ефект Ребіндера). Зі збільшенням ступеня проковзування до 10 – 30% при напрацюванні 150 – 250 циклів встановлено зменшення поверхневих шарів металу до 200 – 250 МПа за рахунок зниження їх міцності при адсорбції активних сірко- і фосфоровмісних компонентів протизношувальної присадки досліджуваної трансмісійної оливи. В даному діапазоні проковзування формування стійких хемосорбційних плівок забезпечує подальше зміцнення поверхневих шарів металу при напрацюванні, що підвищує їх зносостійкість. Стійкі до динамічних умов навантаження граничні шари характеризуються високими екрануючими властивостями, запобігаючи поверхневому руйнуванню металу в результаті протікання механо-хімічних реакцій. Підтвердженням цьому є підвищення питомої роботи тертя при наявності проковзування в 330 – 400 разів, в порівнянні з чистим коченням (рис. 4) і поступове збільшення мікротвердості поверхневих шарів металу до вихідних значень (при проковзуванні 10 і 20%) або до перевищення вихідних показників на 200 МПа (при проковзуванні 30%).

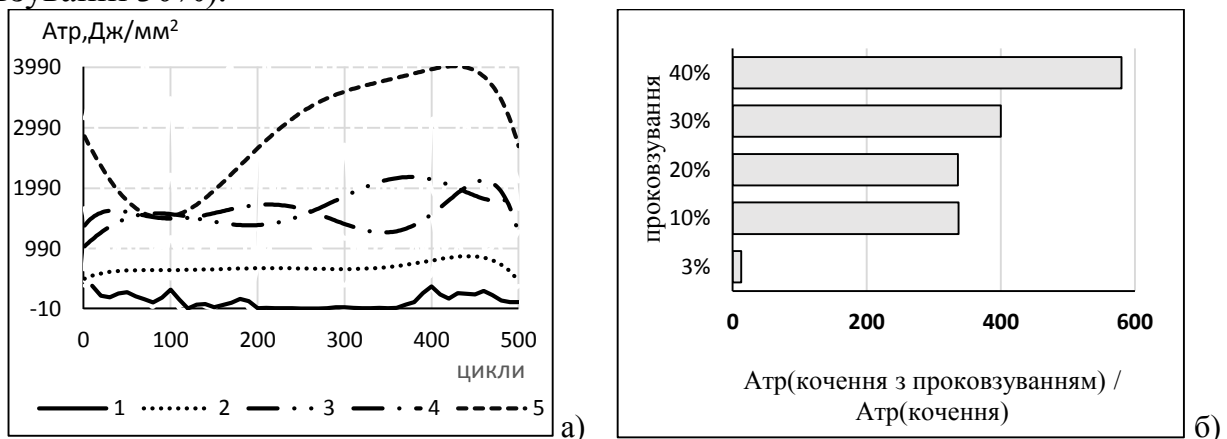


Рис. 4. Кінетика зміни питомої роботи тертя при проковзуванні 3% (1), 10% (2), 20% (3), 30% (4), 40% (5) (а) і відношення приросту $A_{тр}$ в умовах проковзування відносно чистого кочення (б).

Таким чином, підвищення енергоємності контакту в цьому випадку сприяє утворенню зміцненого поверхневого шару металу, який характеризується підвищеною зносостійкістю.

У п'ятому розділі визначені критерії оцінки зносостійкості контактних поверхонь в динамічних умовах навантаження. Важливим етапом в цьому напрямку є дослідження процесів, що відбуваються в тонких поверхневих шарах металу, оскільки саме поверхневі шари металу є складною нерівноважною системою, для якої характерні нелінійні процеси.

Зростання питомої роботи тертя при проковзуванні внаслідок збільшення швидкості ковзання обумовлює механо–термічну активацію контактних поверхонь. Питома робота тертя в граничному режимі мащення як в умовах чистого кочення, так і в умовах кочення з проковзуванням збільшується, в середньому, в 1,75 разів, в порівнянні гідро– та еластогідродинамічним режимами. Це створює передумови для формування вторинних структур II типу.

Результати, що підтверджують утворення цих структур: приповерхневі шари металу на глибині до 50 мкм насичуються активними елементами – збільшується вагова частка кисню і сірки (табл. 1); поверхневі шари металу характеризуються підвищенням міцнісних властивостей, що проявляється в збільшенні їх мікротвердості при напрацюванні.

Таблиця 1 - Концентрація вагової частки аналізованих елементів (С,%) в приповерхневих шарах металу.

Елемент	Вихідний метал	Відстаюча поверхня з проковзуванням, %		
		3	20	40
O	0,65	0,58	0,75	1,02
P	0,03	0,03	0,05	0,03
S	0,05	0,05	0,12	0,15
Fe	99,27	99,34	99,08	98,8

Складний напружений стан приповерхневих шарів металу при збільшенні механічного та теплового впливів в умовах одночасної дії нормальних і дотичних напружень призводить до їх інтенсивної деформації. Глибина поширення напружено–деформованого стану пар тертя знаходиться в прямій залежності від ступеня проковзування контактних поверхонь. Наприклад, глибина деформованого шару металу відстаючої поверхні з проковзуванням 20% охоплює 30 – 37 мкм, а з проковзуванням 40% – 100 – 300 мкм (рис.5).

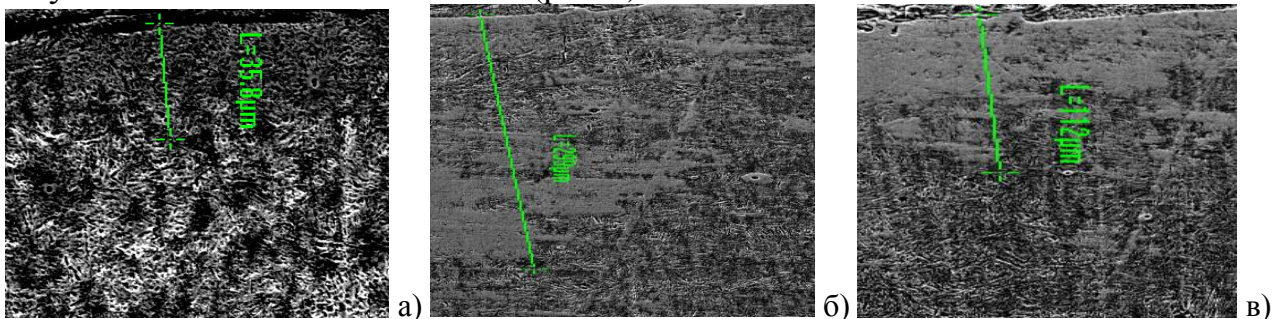


Рис.5. Мікроструктура приповерхневих шарів відстаючої поверхні сталі 45 ($\times 400$): а) - проковзування 20%; б, в) - проковзування 40%.

Запропонована методика прогнозування оптимальної структури поверхневих шарів в процесі експлуатації елементів трибоспряжень. В якості вихідної інформації для прогнозування оптимальної структури поверхневих шарів використаний розподіл вимірювання мікротвердості на зразках сталі 45.

Для встановлення оптимальних параметрів структури поверхневих шарів априорі взяли, що експлуатаційні властивості матеріалу (знос) залежать як від характеристик мікротвердості поверхневих шарів, так і від розподілу їх по глибині матеріалу:

В якості міри функції $F(HV(x))$ прийнято інтегральний осереднений розподіл мікротвердості:

$$F(HV(x)) = HV_{ef} = \frac{1}{L} \int_L HV(x) dx, \quad (1)$$

де L – глибина, яка береться для дослідження зони градієнтної зміни мікротвердості по глибині (прийmemo $L \approx 80$ мкм).

У лінійному наближенні функція $HV(x)$ має вигляд:

$$HV(x) = HV_0 + k \cdot x, \quad (2)$$

де HV_0 – мікротвердість на поверхні, МПа, k – величина градієнта мікротвердості, МПа/мкм.

З урахуванням (2) співвідношення (1) набуде вигляду:

$$HV_{ef} = F(HV(x)) = \frac{1}{L} \left(HV_0 \cdot L + k \cdot \frac{L^2}{2} \right) = HV_0 + k \cdot \frac{L}{2}, \quad (3)$$

Параметр ефективної мікротвердості є усереднений показник розподілу мікротвердості в деякій локальній області, яка охоплює глибину поширення пружно-пластичних деформацій при терті. Даний параметр є критерієм міцності, що характеризує просторову неоднорідність розподілу мікротвердості в результаті експлуатаційної модифікації контактних поверхонь при терті.

Встановлена залежність зносу від ефективної мікротвердості, поверхневої мікротвердості і градієнта мікротвердості (табл. 2).

Таблиця 2 - Залежність експлуатаційних характеристик матеріалу від узагальнених параметрів розподілу мікротвердості.

Величина проковзування	Поверхнева мікротвердість, МПа	Градієнт, МПа/мкм	HV_{ef} , МПа	Знос, мкм
Зразок 1 (3%)	3451	10,4	3857	5,96
Зразок 2 (10%)	3575	17,2	4263	3,83
Зразок 3 (20%)	3336	31,9	4612	4,27
Зразок 4 (30%)	4023	43,8	5775	5,08
Зразок 5 (40%)	4023	31,8	5295	6,11

За результатами прогнозування одержана аналітична залежність величини сумарного зносу випереджаючої та відстаючої поверхонь (I) від ефективної мікротвердості HV_{ef} :

$$I = 7,074 \cdot 10^{-13} * h^4 - 1,778 \cdot 10^{-8} * h^3 + 0,158 \cdot 10^{-3} * h^2 - 0,602 * h + 833,21 \quad (4)$$

де h – величина ефективної («інтегральної») мікротвердості HV_{ef} .

Параметр ефективної твердості H_{eff} використовується в ГОСТ 21354-87 при розрахунках на запобігання глибинного контактного руйнування для цементованих і нітроцементованих зубчастих коліс. Градієнтний розподіл твердості враховується при розрахунку глибини залягання найбільших допустимих граничних глибинних дотичних напружень в порівнянні з глибиною зміцненого шару. Слід враховувати, що параметр ефективної твердості H_{eff} може істотно змінитися в процесі експлуатації зубчастих передач, що і показано в наших експериментах при дослідженні пар тертя в умовах кочення з різним ступенем проковзування. Тому при зміцненні поверхневих

шарів шестерен та коліс зубчастих передач та при їх відновленні під час ремонтних робіт необхідно враховувати не лише вихідний стан градієнтного розподілу твердості зміцненого (або відновленого) поверхневого шару, але й можливу зміну градієнтного розподілу твердості під час експлуатації деталей, оскільки даний параметр суттєво впливає на зносостійкість контактних поверхонь.

В роботі встановлено, що збільшення потужності тертя обумовлює інтенсифікацію тепловиділення в контакті, яка відбувається при $V_{ск} > 0,6$ м/с, що відповідає проковзуванню відстаючої поверхні 20 – 40%. Це є провідним чинником, що призводить до десорбції граничних змащувальних шарів, зменшення негідродинамічної складової товщини мастильної плівки і, як наслідок, до зростання небезпеки заїдання контактних поверхонь. Величина приросту температури залежить від відношення швидкості руху тіл і коефіцієнта температуропровідності, тобто від числа Пекле (P_e). При мінімальному досліджуваному 3%-ному проковзуванні відстаючої поверхні число ΔP_e становить 2,08. Збільшення ступеня проковзування обумовлює і кореляційне підвищення критерію P_e : ΔP_e при проковзуванні 40% становить 39,93.

Відповідно до розрахунків температури в контакті по Блоку, найбільший вплив на миттєве підвищення температури в зоні контакту в умовах нестационарної роботи трибоелементів створює параметр $fN_lV_{ковз}$, який характеризує потужність тертя і тепловиділення в контакті. При проковзуванні контактних поверхонь до 10% як в умовах достатньої подачі мастильного матеріалу в зону тертя, так і в екстремальних умовах мащення, локальне підвищення температури незначне. Параметр заїдання по Блоку $t_0 + \vartheta \ll t_{\Sigma кр}$, в зв'язку з цим схоплювання контактних поверхонь не встановлено.

Саме з підвищенням швидкості ковзання зростає градієнт швидкості зсуву змащувальних шарів, встановлюється критичне значення пружних напружень, при якому відбувається руйнування граничних шарів шляхом їх плавлення. Таким чином, градієнт швидкості зсуву мастильних шарів є провідним фактором при механічній деструкції змащувальних шарів. Одночасно, підвищення швидкості ковзання обумовлює зростання температури в контакті і, як наслідок, термічну деструкцію граничних шарів. Синергізм впливу зазначених процесів проявляється в різких коливаннях товщини мастильного шару і коефіцієнта тертя, зростанні питомої роботи тертя, зниженні ефективної в'язкості мастильного матеріалу. Дані зміни триботехнічних характеристик контакту свідчать про порушення структурної пристосованості трибосистеми, перехід її в нерівноважний стан, що веде до прояву перших ознак схоплювання контактних поверхонь і скорочення періоду нормальної роботи трибоелементів.

Нестационарні умови тертя призводять до структурно–фазових перетворень в поверхневих шарах металу. Аналіз дифрактограм поверхні вихідного зразка та зразків сталі 45, які випробовувались при коченні з проковзуванням від 3 до 40% (мастильний матеріал – трансмісійна олива Okko GL–4/80w) свідчить про появу ряду дифракційних ефектів. Серед цих ефектів: формування у досліджуваному шарі макронапружень стиснення, які обумовлені зростанням міжплощинних відстаней у кристалічній ґратці; зменшення розмірів областей когерентного розсіювання і

зростання мікронапружень; переорієнтація зерен (зміна кристалографічної текстури) у поверхневому шарі, який зазнає інтенсивної деформації в процесі тертя з проковзуванням контактних поверхонь; поява дифракційних максимумів, що відповідають ГЦК аустенітній фазі; поява дифракційних максимумів, що відповідають оксидам FeO і Fe₂O₃ (рис. 6, 7).

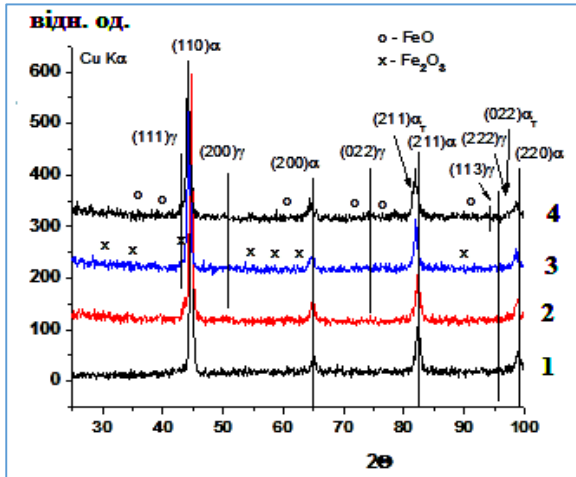


Рис. 6. Дифрактограми вихідної поверхні сталі 45 (1) та відстаючої поверхні при проковзуванні 3% (2), 20% (3), 40% (4).

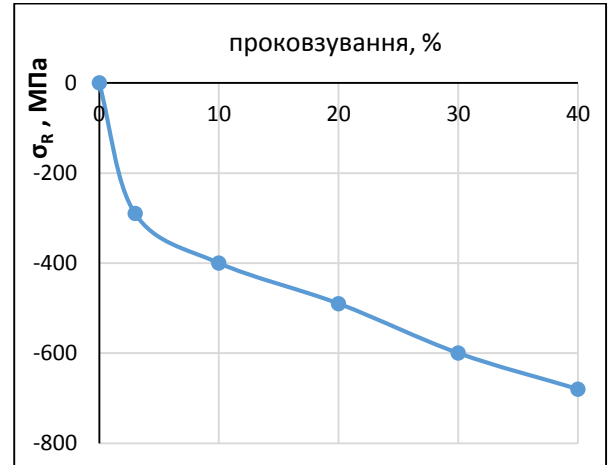


Рис. 7. Залежність залишкових макронапружень в поверхневому шарі сталі 45 від величини проковзування в контакті.

Збільшення ступеня проковзування до 40% посилює деформаційні процеси в поверхневих шарах металу, що призводять до зростання макронапружень стиснення на рівні -700 МПа, зменшення розмірів областей когерентного розсіювання до 20 нм, появи більшої кількості зерен з орієнтацією площин 200 паралельно поверхні, інтенсифікації механо-хімічних процесів окислення з утворенням тонких оксидних плівок FeO. Дані зміни знижують зносостійкість контактних поверхонь в 1,5 – 1,7 раз, в порівнянні з парами тертя за умов роботи з проковзуванням 20%.

В шостому розділі проведено моделювання процесів зношування пар тертя в несталіх умовах роботи.

Розроблена термо-кінетична модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів фрикційного контакту. В якості базової моделі використана кінетична модель руйнування матеріалів на основі термофлуктуаційної концепції міцності твердих тіл С.Н. Журкова. В моделі враховано наявність двох областей накопичення пошкоджень при терті (дебрис-шару та області багаточислової контактної втоми), для яких характерні різні механізми домінуючого виду руйнування контактних поверхонь.

$$\tau = \tau_0 \left[\left(\sum_{i=1}^n \left[\exp \left(\frac{U_{0d} - \gamma_d \sigma_d \pm \Delta G_d}{kT_d} \right) \right] \right) + \exp \left(\frac{U_{0\sigma} - \gamma_\sigma \sigma_\sigma \pm \Delta G_\sigma}{kT_\sigma} \right) \right], \quad (5)$$

де τ_0 – постійна часу, що дорівнює періоду атомних коливань в тілі $10^{-13} \dots 10^{-12}$ с; k – постійна Больцмана; T – абсолютна температура, К; U_0 – енергія активації руйнування, Дж/моль; γ – структурно-чутливий коефіцієнт; σ – навантаження; ΔG – коефіцієнт що враховує вплив зовнішнього середовища. Індeksi d, σ при змінних у виразі (5) означають, що змінна відноситься до дебрис-шару (d) або області контактної втоми (σ) відповідно.

Параметри, які відносяться до дебрис–шару та області контактної втоми, будуть різними. Тому оцінку цих параметрів необхідно проводити з урахуванням особливостей накопичення трибопошкоджень в кожній області.

Оцінка активаційних параметрів області багатоциклової втоми проведена за наступною схемою. З огляду на циклічність процесу навантаження, представимо час напрацювання τ_σ через кількість циклів N і фактичний час навантаження за цикл t_σ :

$$\sigma_\sigma = \frac{U_{0\sigma} - RT_\sigma \ln\left(\frac{N \cdot t_\sigma}{\tau_0}\right) \pm \Delta G_\sigma}{\gamma_\sigma}. \quad (6)$$

Для визначення довговічності в виразі (5) в якості діючого навантаження, яке визначає перебіг процесів втомного руйнування σ_σ доцільно прийняти еквівалентні напруження по Мізесу, які використовуються для визначення потенційної енергії зміни форми.

Наведемо отримані результати енергії активації руйнування сталі 45 (HRC 38) при терті в несталіх умовах в середовищі трансмісійної оливи ТАД17–і (SAE 80w90 API GL–5) в режимі кочення з різним ступенем проковзування при контактних навантаженнях 170, 250 та 300 МПа (табл. 3). Загальна тривалість роботи елементів трибоспряження включала період припрацювання та наробітку пар тертя в різних режимах мащення до прояву перших ознак схоплювання контактних поверхонь.

Таблиця 3 - Експериментально-розрахункові показники при визначенні енергії активації руйнування сталі 45 в несталіх умовах тертя.

Параметри	Ступінь проковзування в контакті в умовах кочення з проковзуванням, %				
	3	10	20	30	40
	$\sigma_{max} = 170 \text{ МПа}, (\sigma_{екв} = 192 \text{ МПа})$				
τ_{p170}, c	27000	23000	20000	18000	15600
T_{170}, K	293,5	313	384	461	635
$U_{170}, \text{кДж/моль}$	97	103	127,01	150,96	209
	$\sigma_{max} = 250 \text{ МПа}, (\sigma_{екв} = 279,38 \text{ МПа})$				
τ_{p250}, c	21000	18000	14700	12900	11500
T_{250}, K	299	323	415	506	703
$U_{250}, \text{кДж/моль}$	99,15	106,69	136,39	165,75	229,6
	$\sigma_{max} = 300 \text{ МПа}, (\sigma_{екв} = 338,1 \text{ МПа})$				
τ_{p300}, c	18000	15000	12450	9000	7000
T_{300}, K	315	343	438	541	755
$U_{300}, \text{кДж/моль}$	104,05	112,78	143,34	175,59	243,47

Згідно з отриманими експериментальними залежностями $\tau_p(\sigma) \sim f(\sigma)$ шляхом екстраполяції визначено граничне значення контактного тиску $\sigma_{гран}$ (рис. 8), а енергію активації руйнування $U_{0\sigma}$ визначено шляхом екстраполяції величини $U(\sigma)$ по залежностям $U(\sigma) \sim f(\sigma)$ до встановленого граничного значення контактного тиску $\sigma_{гран}$ (рис. 9). Таким чином, $\sigma_{\sigma_{гран}}$ можна інтерпретувати як межу втомної міцності при N циклах навантаження.

Отримані значення $U_{0\sigma}$, $\sigma_{гран}$ і γ_σ для сталі 45 в умовах кочення з різним ступенем проковзування представлені в таблиці 4.

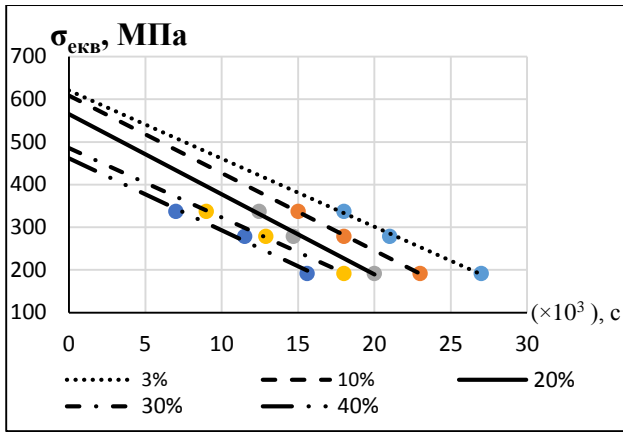


Рис. 8. Визначення граничного значення контактної тиску до прояву ознак схоплювання контактних поверхонь (мастильний матеріал - ТАД17-і).

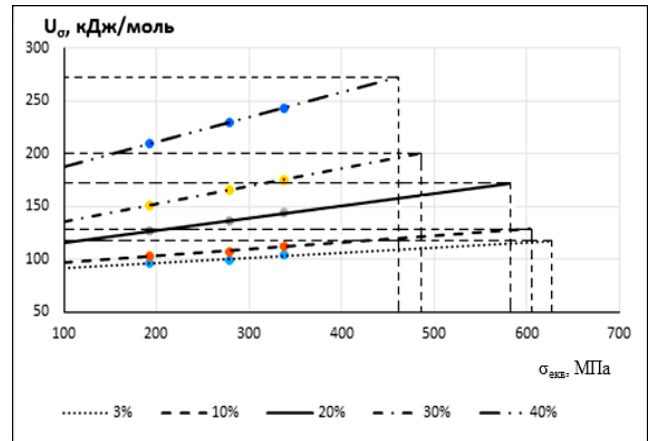


Рис. 9. Залежність енергії активації руйнування від контактної тиску при різному ступені проковзування (мастильний матеріал - ТАД17-і).

Таблиця 4 - Вплив ступеня проковзування при коченні з проковзуванням на енергію активації руйнування, граничне значення контактної тиску і структурно-чутливий коефіцієнт.

Параметри	Ступінь проковзування в контактї в умовах кочення з проковзуванням, %				
	3	10	20	30	40
$U_{\sigma}, \text{кДж/моль}$	117	130	166	202	273
$\sigma_{\text{гран}}, \text{МПа}$	623	603	580	487	463
$\gamma_{\sigma}, \text{кДж} \cdot \text{мм}^2 / \text{моль} \cdot \text{Н}$	0,188	0,216	0,295	0,415	0,59

Збільшення ступеня проковзування при коченні з проковзуванням підвищує рівень накопичення енергії активації руйнування. Це пов'язано зі збільшенням ступеня пластичної деформації, підвищенням температури і градієнта швидкості зсуву в контактї внаслідок підвищення швидкості ковзання з 0,062 до 1,15 м/с при проковзуванні з 3 до 40% відповідно. Залежно від рівня проковзування деформація в металі протікає за рахунок різних механізмів, що діють на мікрорівні, причому кожен з них характеризується власною енергією активації руйнування.

Рівень енергії активації при терті залежить як від ступеня зміцнення приповерхневих шарів, так і від типу вторинних структур і плівок мастильного матеріалу, утворених в результаті структурної пристосованості. Найменший рівень енергії активації руйнування, наприклад при $\sigma_{\text{max}} = 250 \text{ МПа}$, встановлений для пар тертя при коченні з проковзуванням 3%. Це обумовлено рядом ефектів: формуванням граничних змащувальних шарів фізичної природи, сильною пластифікуючою дією і знеміцненням металу на глибину до 70 мкм, формуванням при терті вторинних структур I типу. При роботі елементів трибоспряжень з проковзуванням 40% відбувається формування хемосорбційних граничних шарів змащувального матеріалу, сильне зміцнення приповерхневих шарів металу на глибину до 260 мкм, структурно-фазові зміни різного характеру, утворення вторинних структур II типу. Дані фактори сприяють значному підвищенню енергії активації руйнування.

Поступове збільшення внутрішньої енергії трибосистеми можливо в результаті акумуляції енергії руйнування при циклічно повторювальних деформаційних процесах, структурно-фазових перетвореннях, диспергуванні матеріалу і т.д. При

досягненні деякого критичного значення внутрішньої енергії при багатоциклічній втомленості можливе руйнування матеріалу, при цьому рівень критичного значення внутрішньої енергії має визначатися експериментальним шляхом (рис. 10).

Представимо умову руйнування для поверхонь, що працюють в умовах кочення з проковзуванням, у вигляді:

$$U_{\sigma} = U_{0\sigma}, \quad (7)$$

де U_{σ} – енергія активації руйнування при контактному тиску σ і певній швидкості ковзання.

Визначивши енергію активації руйнування при граничному значенні контактного тиску $\sigma_{\text{гран}}$ для певної швидкості ковзання можливо прогнозувати довговічність елементів трибоспряження за кінетикою накопичення енергії активації руйнування при терті (рис. 11).

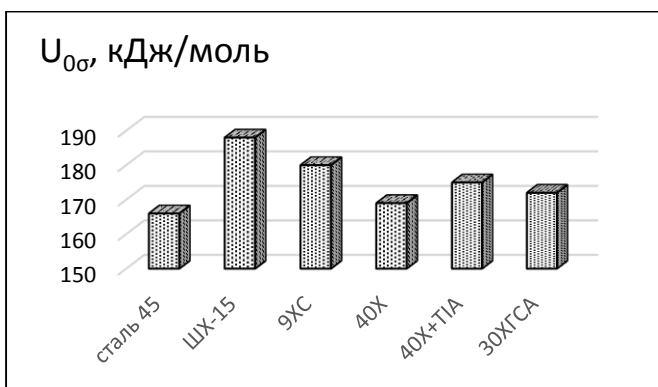


Рис. 10. Енергія активації руйнування різних марок сталей в умовах кочення з проковзуванням 20%

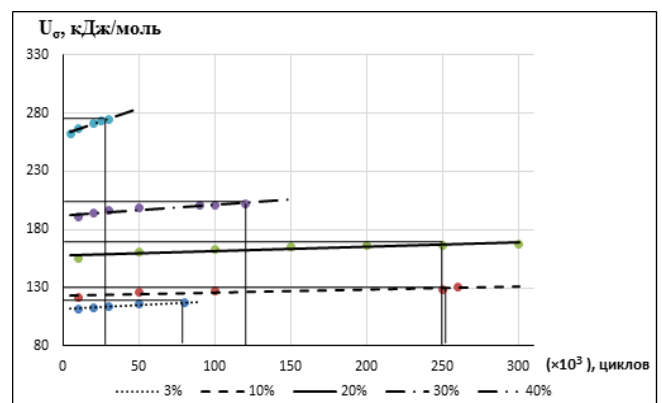


Рис. 11. Кінетика збільшення енергії активації для сталі 45 (мастильний матеріал - ТАД17-і) при $\sigma_{max} = 300$ МПа.

Розрахункові дані щодо прогнозування кінетики збільшення енергії активації руйнування контактних поверхонь в досліджуваних режимах тертя корелюють з отриманими експериментальними даними швидкості зношування пар тертя.

Таким чином, з урахуванням аналізу напружено-деформованого стану контактних поверхонь, кінетики накопичення енергії активації руйнування в умовах кочення з проковзуванням, рівняння оцінки довговічності області багатоциклової втоми набуде вигляду:

$$\tau_{\sigma} = \tau_0 \exp\left(\frac{U_{0\sigma} - \gamma_{\sigma} \sigma_{\text{екв}} \pm \Delta G_{\sigma}}{RT_{\sigma}}\right). \quad (8)$$

Згідно з даними, наведеними в таблиці 4, структурно-чутливий коефіцієнт γ_{σ} підвищується зі збільшенням ступеня проковзування. Однак, якщо для діапазону проковзування 10 – 40% підвищення γ_{σ} металу корелює з експериментально встановленим збільшенням питомої роботи тертя в контакті, об'єм деформованого приповерхневого шару металу, зносом контактних поверхонь, то для пар тертя, що працюють з проковзуванням 3%, встановлені інші закономірності. Найменше значення γ_{σ} корелює лише з мінімальними показниками питомої роботи тертя і найменшою енергією активації руйнування металу. Однак, об'єм деформованого металу і швидкість зношування перевищує аналогічні показники, встановлені для контактних поверхонь з проковзуванням 10 і 20%. Встановлена невідповідність між

роботою руйнування і зносостійкістю контактних поверхонь пояснюється тим, що в процесі тертя лише для умов кочення з проковзуванням 3% характерне знеміщення поверхневих шарів металу протягом всього часу наробітки та формування мастильного матеріалом граничних змащувальних шарів фізичної природи.

У досліджуваних умовах до факторів, що підвищують зносостійкість контактних поверхонь, відносяться: здатність мастильного матеріалу формувати граничні хемосорбційні шари, стійкі до високих градієнтів швидкості зсуву; утворення вторинних структур II типу в результаті структурної пристосованості при терті; зміцнення поверхневих шарів металу при терті і локалізація пластичної деформації в тонких приповерхневих шарах; структурно-фазові перетворення в поверхневих шарах металу (розмір зерен – 40 – 60 нм, утворення аустеніту тертя до 8 – 10%, насичення приповерхневих шарів вуглецем, киснем, сіркою, та ін.).

Для оцінки активаційних параметрів дебрис-шару на підставі отриманих експериментальних даних зміни τ_{pd} і T_d в залежності від контактного тиску визначимо значення енергії активації руйнування:

$$U_d = RT_d \ln \frac{\tau_{pd}}{\tau_0}, \quad (9)$$

де U_d – енергія активації руйнування, кДж/моль; τ_{pd} – напрацювання пар тертя протягом часу, с; T_d – абсолютна температура мастильного матеріалу в контакті, К.

Енергію активації руйнування U_{0d} визначають шляхом екстраполяції величини $U(\sigma)$ по залежностям $U(\sigma) \sim f(\sigma)$, приймаючи граничне значення контактного тиску $\sigma_{гран}$, встановлене при розрахунку довговічності області багатоциклової втоми.

В формулі (5) $\sigma_d \gamma_d$ відображує ту частину роботи, яку в руйнуванні дебрис-шару виконує зовнішній вплив. Логічно прийняти, що в якості роботи зовнішніх сил виступає питома робота сил тертя $A_{тр}$:

$$\gamma_d \sigma_d = \frac{A_{тр}}{V_d}, \quad (10)$$

де V_d – об'єм зношеного шару, моль.

З урахуванням того, що:

– питома робота тертя визначається:

$$A_{тр} = \left[\int_0^{t_i} M_i(t) \cdot 2\pi n_i(t) d(t) - \frac{1}{2} \sum_0^{i=n_{ti}} J_{\Pi_i} \cdot \omega_i^2 \right] / S, \quad (11)$$

де n , ω – частота обертів і кутова швидкість обертання; t – час тривалості циклу; J_{Π} – полярний момент інерції деталей установки;

– $A_{тр} = F_{тр} L_S = f \cdot F_N \cdot L_S$;

– $V_d = (A_H \cdot h_d) / M$;

– при терті більша частина енергії деформації розсіюється у вигляді тепла, тому прийемо, що у вигляді збереженої енергії, запасеться до 25 – 30%;

перетворимо (10) до виду:

$$\gamma_d \sigma_d = 10^{-3} \frac{f \cdot F_N \cdot L_S \cdot M}{A_H \cdot h_d}, \quad (12)$$

де f – коефіцієнт тертя; F_N – нормальна сила, Н; L_S – шлях тертя ковзання, м; M – молярний об'єм, м³/моль; A_H – номінальна площа поверхні контакту, м²; h_d – товщина зношеного шару, м.

Якщо врахувати, що відношення F_N/A_H представляє собою контактний тиск σ_N , то можна записати:

$$\gamma_d \sigma_d = 10^{-3} \frac{f \cdot \sigma_{\text{екв}} \cdot L_S \cdot M}{h_d}. \quad (13)$$

В розрахунках прийнято, що $M = 7,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{моль}$, $L_S = (V_1 - V_2) \cdot N \cdot t_{\text{ц}}$, м/с.

Результати розрахунків параметра $\gamma_d \sigma_d$ для сталі 45 (мастильні матеріали ТАД17-і І-40) представлені на рис. 12.

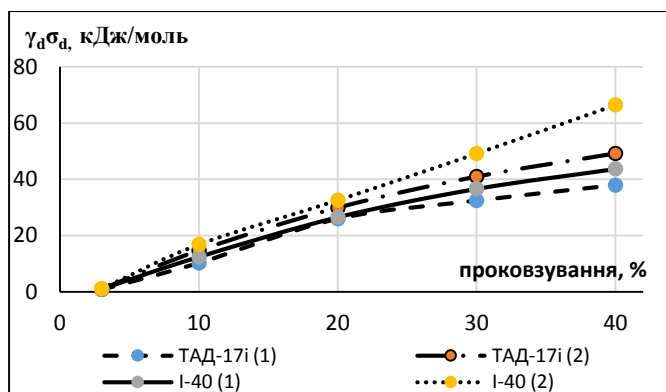


Рис. 12. Вплив ступеня проковзування на кінетику зміни параметра $\gamma_d \sigma_d$ дебрис-шару: 1 – $\sigma_{\text{екв}} = 279,38 \text{ МПа}$; 2 – $\sigma_{\text{екв}} = 338,1 \text{ МПа}$.

Аналіз кінетики зміни параметра $\gamma_d \sigma_d$ показує, що найбільший вплив на зростання роботи руйнування дебрис-шару створює швидкість ковзання. Підвищення даного параметра з 0,062 до 1,15 м/с при підвищенні ступеня проковзування з 3 до 40% відповідно обумовлює збільшення роботи руйнування для контактних поверхонь при змащуванні оливами ТАД17-і та І-40, в середньому, в 53 і 62 рази відповідно. Підвищення еквівалентних напружень з

279 до 338 МПа, в середньому в 1,25 разів збільшує роботу руйнування сформованого дебрис-шару як при змащуванні сталі 45 мастильним матеріалом з поліфункціональними присадками ТАД-17і, так і при використанні базової оливи без присадок І-40.

При оцінці довговічності дебрис-шару важливу роль відіграє коефіцієнт ΔG_d , що враховує вплив зовнішнього середовища. З використанням факторного аналізу проаналізована внутрішня структура кореляційної матриці на підставі кінетики зміни реологічних характеристик мастильного матеріалу, гідро- і негідродинамічної складової товщини мастильного шару, мікротвердості поверхневих шарів металу і визначена з урахуванням коефіцієнтів множинної кореляції комбінація факторів, які найбільше впливають на зміну параметра ΔG_d . Запропонована наступна залежність для розрахунку даного параметра:

$$\Delta G_d = \Delta H_{\mu}^{0,2} \frac{\eta_{\text{еф}} V_{\text{ковз}}}{N}, \quad (14)$$

де ΔH_{μ} – зміна мікротвердості поверхневих шарів металу при напрацюванні, МПа; $\eta_{\text{еф}}$ – ефективна в'язкість в контакті, Па·с.

За кінетикою зміни параметра ΔG_d можливо припустити про ведучі механізми структурної пристосованості мастильного матеріалу і матеріалу контактних поверхонь в умовах кочення з проковзуванням.

З урахуванням проведеного математичного моделювання вираз для оцінки довговічності дебрис-шару набуде виду:

$$\tau_d = \tau_0 \exp \left(\frac{U_{0d} - \left[10^{-3} \frac{f \cdot \sigma_{\text{екв}} \cdot ((V_1 - V_2) \cdot N \cdot t_{\text{ц}}) \cdot M}{h_d} \right] \pm \Delta H_{\mu}^{0,2} \frac{\eta_{\text{еф}} V_{\text{ковз}}}{N}}{RT_d} \right). \quad (15)$$

Результати розрахунків, виконані за формулою (15), представлені в таблиці 5. В розрахунках прийнято: $\tau_0=10^{-12}$, с; $R=0,008314$, кДж/моль·К; $M = 7,16 \cdot 10^{-6}$, м³/моль.

Таблиця 5 - Вплив ступеня проковзування на довговічність дербис-шару.

Час до руйнування дербис-шару	Ступінь проковзування в контактї, %				
	3	10	20	30	40
$\tau_d, c (\sigma_{\text{екв}}=192 \text{ МПа})$	$4,77 \cdot 10^4$	$2,57 \cdot 10^6$	$1,29 \cdot 10^6$	$3,71 \cdot 10^5$	$4,21 \cdot 10^4$
$\tau_d, c (\sigma_{\text{екв}}=279,38 \text{ МПа})$	$3,58 \cdot 10^3$	$2,37 \cdot 10^5$	$1,13 \cdot 10^5$	$4,89 \cdot 10^4$	$5,01 \cdot 10^3$
$\tau_d, c (\sigma_{\text{екв}}=338,1 \text{ МПа})$	$3,15 \cdot 10^3$	$5,61 \cdot 10^4$	$1,11 \cdot 10^4$	$1,28 \cdot 10^3$	43,89

На підставі отриманих експериментальних даних залежності зносу контактних поверхонь від антифрикційних, реологічних, енергетичних характеристик контакту запропонована формула для розрахунку лінійної інтенсивності зношування (J_h) елементів трибоспрямижень, що працюють при коченні з проковзуванням в несталіх умовах роботи:

$$J_h = 0,1 \frac{\sigma_{\text{екв}} \cdot f \cdot V_{\text{ковз}}}{\eta_{\text{еф}} \cdot \tau_d \cdot A_{\text{тр}}^{0,8}} \quad (16)$$

Розрахункові значення інтенсивності зношування для сталі 45 (мастильний матеріал ТАД17-і) за формулою (16) представлені в табл. 6.

Таблиця 6 - Вплив еквівалентних напружень в контактї і швидкості ковзання на інтенсивність зношування сталі 45.

Еквівалентні напруження ($\sigma_{\text{екв}}$), МПа	Ступінь проковзування в контактї, %				
	3	10	20	30	40
	Швидкість ковзання, м/с				
	0,062	0,314	0,607	0,858	1,15
279,38	$1,52 \cdot 10^{-10}$	$1,14 \cdot 10^{-11}$	$4,36 \cdot 10^{-11}$	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$2,59 \cdot 10^{-9}$
338,1	$1,9 \cdot 10^{-10}$	$1,47 \cdot 10^{-10}$	$4,6 \cdot 10^{-10}$	$6,01 \cdot 10^{-9}$	$2,9 \cdot 10^{-8}$

Розбіжність між експериментальними даними по інтенсивності зношування контактних поверхонь і розрахунковими значеннями, отриманими за формулою (16), не перевищує 5%.

В роботі проведено моделювання оцінки величини максимальних дотичних напружень та глибини їх залягання залежно від триботехнічних характеристик контакту. Побудова геометричної моделі зубчастої пари здійснювалася в системі Autodesk Inventor, дана геометрична модель зубчастого зачеплення була експортована в ANSYS Workbench, де побудована скінченно-елементна модель (МСЕ) зубчастої передачі.

Порівняльний аналіз отриманих результатів з розрахунковими результатами контактної взаємодії Герца для двох співвісних циліндрів показав ряд відмінностей в результатах чисельного та аналітичного рішень. Як показують результати розрахунку, залежності Герца дають занижені значення контактного тиску в порівнянні з результатами чисельного аналізу. Максимальні контактні навантаження, отримані МСЕ становлять 175,46 МПа (коефіцієнт тертя 0,05), а за розрахованими залежностями Герца – 156 МПа, похибка в розбіжності становить близько 11%. Максимальні дотичні напруження, отримані МСЕ – 66 МПа при глибині залягання від поверхні 0,12 мм і відповідно по Герцу – 47 МПа на глибині 0,14 мм, похибка становить за максимальними дотичним напруженням близько 28 % і по глибині 14%.

Таким чином, можна стверджувати, що використання класичних формул для розрахунку величин максимальних дотичних напружень (τ) та глибини їх залягання (h) по Герцу – Беляєву:

$$\tau = 0,304\sigma_{max} \quad (17)$$

$$h=0,78b, \quad (18)$$

вносить певні похибки в результати розрахунків.

В роботі застосовані методи теорії подібності, зокрема аналіз розмірностей. Їх перевагою є те, що вони використовуються у тих випадках, коли невідома математична модель досліджуваного явища. Згідно розглянутому методу, одержані залежності максимальних дотичних напружень в контакті та глибини їх залягання з урахуванням триботехнічних параметрів контакту. Залежність максимальних дотичних напружень набуде вигляду:

$$\tau_{max} = \sigma_{max} \frac{V_{ковз}^{0,1}}{V_{\Sigma\text{коч}}} (A_{тр} T)^{0,07}, \quad (19)$$

де σ_{max} – максимальне контактне навантаження, МПа; $V_{ковз}$ – швидкість ковзання, м/с; $V_{\Sigma\text{коч}}$ – сумарна швидкість кочення випереджаючої та відстаючої поверхонь, $A_{тр}$ – питома робота сил тертя, Дж/мм²; T – температура в фрикційному контакті.

В таблиці 7 представлені розрахункові значення максимальних дотичних напружень для сталі 45 при домінуванні різних режимів мащення.

Таблиця 7 - Вплив навантаження та кочення з проковзуванням на максимальні дотичні напруження в контакті.

Максимальні дотичні напруження, τ_{max} , МПа	Величина проковзування в контакті, %		
	3	20	40
	$\sigma_{max} = 200\text{МПа}$		
за формулою (17)	60,0		
за формулою (19)	41,4* ... 43**	86,3* ... 99,0**	129,2* ... 139,1**
	$\sigma_{max} = 250\text{МПа}$		
за формулою (17)	75,0		
за формулою (19)	52,1* ... 58,3**	110,2* ... 126,3**	143,1* ... 169,0**
	$\sigma_{max} = 300\text{МПа}$		
за формулою (17)	90,0		
за формулою (19)	63,2* ... 70,48**	135,6* ... 155,2**	174,4* ... 209,8**

* - для гідро- та еластогідродинамічного режимів мащення;

** - для граничного та напівсухого режимів мащення.

Розрахунки максимальних дотичних напружень, проведені за запропонованою формулою, свідчать про значний вплив проковзування на збільшення даного параметра. Зростання швидкості ковзання до 1,13 м/с при проковзуванні 40%, що в 18 разів перевищує швидкість ковзання при проковзуванні 3%, призводить до підвищення максимальних дотичних напружень в 1,9 та 2,27 разів при гідро-/ еластогідродинамічному або граничному/ напівсухому режимах мащення відповідно.

Таким чином, зростання швидкості ковзання обумовлює зміну напружено-деформованого стану контактних поверхонь за рахунок появи дотичних напружень

зсуву при терті, вектор дії яких локалізується не тільки по товщині змащувального шару, але й опускається в приповерхневі шари металу.

Розрахунок глибини залягання максимальних дотичних напружень проводився за формулою:

$$h = \left[\left(0,786 + \frac{V_{\text{КОВЗ}}^{0,1}}{V_{\Sigma \text{КОЧ}}} \right) b \right] / h_{\text{м}}^{0,2}, \quad (20)$$

де b – напівширина площадки контакту, $h_{\text{м}}$ – товщина мастильного шару, мкм.

Розрахунки за даною формулою для сталі 45 наведені в таблиці 8.

Таблиця 8 - Вплив навантаження та кочення з проковзуванням на глибину залягання максимальних дотичних напружень в контактї.

Глибина h , мм	Величина проковзування в контактї, %		
	3	20	40
	$\sigma_{\text{max}} = 200 \text{ МПа}$		
за формулою 18	0,033		
за формулою 20	0,026...0,031*	0,028...0,033*	0,029...0,034*
	0,049...0,098**	0,053...0,104**	0,055...0,107**
	$\sigma_{\text{max}} = 250 \text{ МПа}$		
за формулою 18	0,041		
за формулою 20	0,033...0,038*	0,035...0,041*	0,036...0,043*
	0,061...0,121**	0,065...0,128**	0,068...0,133**
	$\sigma_{\text{max}} = 300 \text{ МПа}$		
за формулою 18	0,052		
за формулою 20	0,039...0,046*	0,041...0,049*	0,043...0,051*
	0,073...0,144**	0,076...0,153**	0,081...0,159**

* - для гідро- та еластогідродинамічного режимів мащення;

** - для граничного та напівсухого режимів мащення.

Згідно результатам, представленим в таблиці 8, розрахункові значення глибини залягання максимальних дотичних напружень за запропонованою формулою корелюють з розрахунковими показниками за формулою Герца – Беляєва (18) лише за реалізації еластогідродинамічного режиму мащення в контактї.

При гідродинамічному режимі мащення максимальні дотичні напруження від сил тертя переміщуються в вищерозташовані приповерхневі шари металу завдяки демпфуючим властивостям змащувальної плівки. По мірі переходу трибосистеми в екстремальні режими, за умов домінування в контактї граничного або напівсухого режимів мащення, глибина залягання максимальних дотичних напружень збільшується в 1,85 та 3,65 разів відповідно, в порівнянні з гідродинамічним режимом мащення. Зростання величини проковзування з 3 до 40% призводить до збільшення розрахункового параметру h , в середньому, в 1,1 рази.

Таким чином, зниження товщини мастильної плівки в контактї є домінуючим чинником щодо локалізації вектора дотичних напружень зсуву при терті на значно більшу глибину в приповерхневих шарах металу.

В роботі була розроблена та апробована методика оцінки триботехнічних властивостей контакту верхнє компресійне кільце – гільза циліндра двигуна

внутрішнього згоряння з урахуванням конструкційних параметрів та режимів технічної експлуатації двигуна, основних параметрів робочого процесу ДВЗ.

В якості об'єктів досліджень були обрані моделі двигунів внутрішнього згоряння ряду марок автомобілів при першому капітальному ремонті (табл. 8).

Таблиця 8 - Результати мікрометричного вимірювання зносу гільзи циліндру в верхній та нижній мертвих точках (ВМТ та НМТ) для різних моделей ДВЗ залежно від пробігу автомобілів.

Марка автомобіля	Рік випуску	Об'єм робочого тіла циліндрі, см ³	Пробіг автомобіля, тис.км	Знос втулки циліндра, мм		Модель двигуна
				ВМТ	НМТ	
Audi-80	1998	2597	500	0,04 – 0,05	0,009 - 0,01	ABC V6
BMW 325e	1996	2693	400	0,10 – 0,12	0,03 - 0,05	M 50
Honda Civic	1986	1488	350	0,07 – 0,09	0,02 – 0,03	EW
Mersedes Benz 230	1995	2499	500	0,10 – 0,11	0,01 – 0,03	M102-16V
Mitsubishi Eclipse, L200	1991	1997	320	0,05 – 0,07	0,01 – 0,02	G63B
Opel Record	1999	1796	450	0,07 – 0,08	0,04 – 0,05	18S
Subaru Leone	1985	1298	300	0,12 – 0,13	0,06 – 0,07	EA65
Volkswagen Passat	1992	1896	600	0,12 – 0,14	0,009 – 0,01	1Y Diesel

В роботі поставлено задачу розробки методики оцінки інтенсивності зношування гільзи циліндру та кінетики формування товщини мастильного шару в контакті. На основі встановлених експериментальних залежностей кінетики зміни триботехнічних показників створена анімаційна модель, яка візуально зображує зміну товщини мастильного шару, напружень зсуву, температури оливи, інтенсивність зношування гільзи циліндру на кожному робочому етапі ДВЗ (рис. 13).

За одержаними значеннями інтенсивності зношування представленої моделі можливо прогнозувати кінетику зміни даного чинника від кута повороту кривошипа для чотирьох тактів ДВЗ. Аналіз епюр зносу втулок циліндрів по утворюючій показує наявність яскраво вираженого максимуму у верхній частині, в зоні ВМТ. Згідно одержаній математичній залежності динаміки зміни інтенсивності зношування гільзи, максимальні показники даного параметру характерні при таких робочих процесах двигуна, як стиск паливно-повітряної суміші та її згоряння, що відповідає куту повороту кривошипу 244° – 474° . Саме в цьому робочому діапазоні встановлено стрімке зниження товщини мастильного шару та перехід трибосистеми в екстремальні умови роботи.

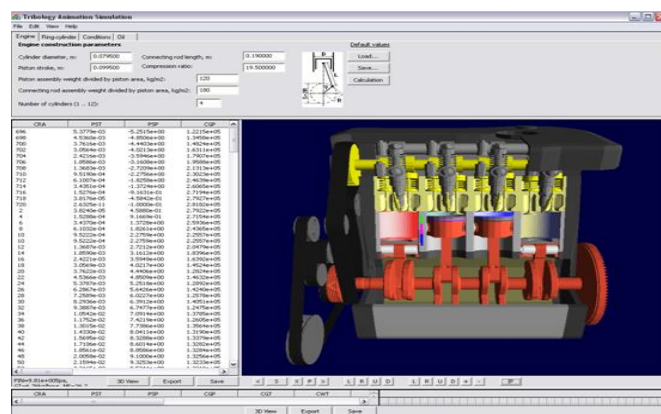


Рис. 13. Трибологічна модель оцінки триботехнічних характеристик контакту залежно від робочого процесу ДВЗ.

За допомогою розробленої математичної моделі можливо теоретично спрогнозувати знос гільз циліндрів в залежності від пробігу автомобіля, що достовірно збігається з реальними показниками зносу гільз циліндрів при пробігу двигуна до його капітального ремонту.

В сьомому розділі розглянуто питання підвищення зносостійкості контактних поверхонь шляхом застосування технологій поверхневого зміцнення та модифікування поверхневих шарів металу при використанні матеріалів, що підвищують триботехнічні характеристики фрикційного контакту в умовах кочення з проковзуванням.

Висока зносостійкість ($I = 10^{-10}$) покриття самофлюсуючого порошку ПГ-АН9 товщиною 1,2 мм забезпечується за рахунок підвищення в 2,58 разів вихідної мікротвердості поверхневих напилених шарів; зниження в 2 – 3 рази приросту питомої роботи тертя як в умовах чистого кочення, так і в умовах кочення з проковзуванням; зменшення ступеня пластифікування поверхневих шарів покриття при формуванні на них граничних змащувальних шарів, що проявляється в меншому знеміцненні випереджаючої і відстаючої поверхонь. Збільшення товщини напиленого покриття самофлюсуючого порошку ПГ-АН9 з 0,3 до 1,2 мм підвищує тривалість нормальної роботи трибоспряжень, яка встановлюється до періоду прояву перших ознак схоплювання контактних поверхонь, в 5,42 рази в умовах динамічного навантаження.

Триботехнічні випробування покриттів сталі 30ХГСА на зразках з модифікованого чавуну СЧ30 проводилися в умовах ступеневого підвищення навантаження: σ_{max} становило 150, 200, 250 і 300 МПа відповідно при кожних 400 циклах напрацювання. Мазильний матеріал – трансмісійна олива ТС-гіп (SAE 140 API GL-5).

В результаті структурної пристосованості при терті на покритті товщиною 1,0 мм встановлено поступове зниження питомої роботи тертя в контакт: при 300 МПа $A_{тр}$ становить 5 Дж/мм² лише в 10% циклів напрацювання в умовах чистого кочення, а в умовах проковзування даний параметр стабілізується на рівні 1500 – 2000 Дж/мм². При змащуванні покриттів товщиною 0,5 мм приріст $A_{тр}$ знижується лише в умовах чистого кочення, при проковзуванні стабілізації даного параметра не встановлено (рис. 14).

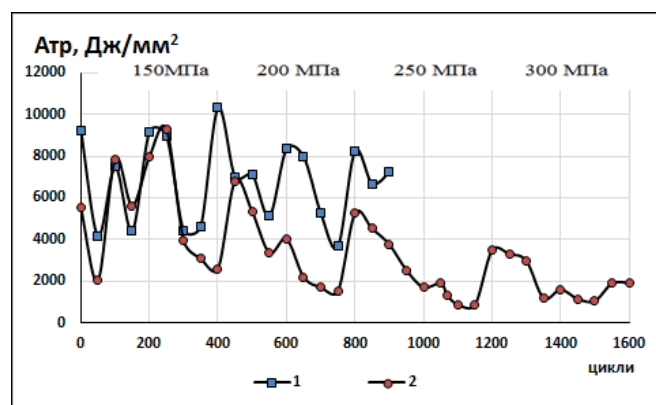


Рис.14. Зміна питомої роботи тертя в контакт в умовах підвищення навантаження при з проковзуванням: 1 – покриття 1,0 мм; 2 – покриття 0,5мм.

Це пов'язано з більш інтенсивними процесами зношування, що відбуваються при руйнуванні і регенерації сформованих вторинних структур при терті. Інтенсивність зношування покриття товщиною 0,5 мм, в середньому, в 2 рази перевищує аналогічний показник, встановлений для покриття більшої товщини, як для випереджаючої, так і для відстаючої поверхонь.

За запропонованою в роботі методикою оцінки температурно-механічної стійкості граничних плівок мастильних матеріалів встановлено підвищення термомеханічної стійкості граничних шарів, сформованих на контактних поверхнях сталі 40X (імпульсне термоциклічне іонне азотування (ІТІА)), в середньому, в 1,7 рази, в порівнянні з граничними шарами, утвореними на сталі 40X (загартування + відпуск).

Встановлено залежність зносу азотованих контактних поверхонь сталі 40X від типу мастильного матеріалу. При проковзуванні 20% і 40% знос випереджаючої і відстаючої поверхонь відповідно в 1,5 і 1,7 разів нижче при використанні трансмісійної оливи ТСП-14гіп, в порівнянні з мінеральною оливою МС-20 (рис. 15). Формування мастильними матеріалами хемосорбційних або хімічно модифікованих шарів сприяє зменшенню поширення пружно-пластичної деформації вглиб зміцнених азотованих шарів металу – при терті в умовах кочення з проковзуванням 40% – товщина зміненого приповерхневого шару металу внаслідок протікання деформаційних процесів становить 80 мкм, що в 1,4 рази менше, ніж при використанні в якості мастильного матеріалу мінеральної оливи МС-20 (рис. 16).

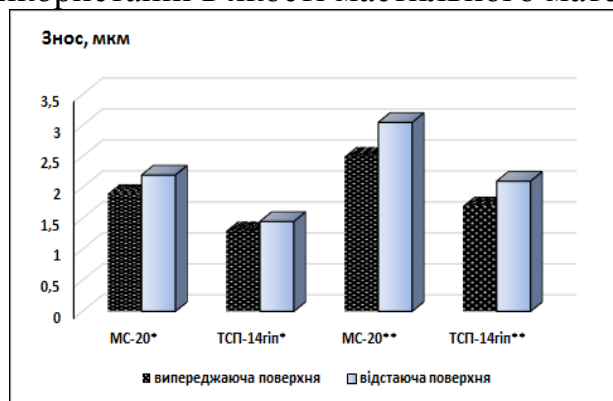


Рис. 15. Знос контактних поверхонь 40X (ІТІА) в умовах кочення с проковзуванням 20% (*) і 40% (**).

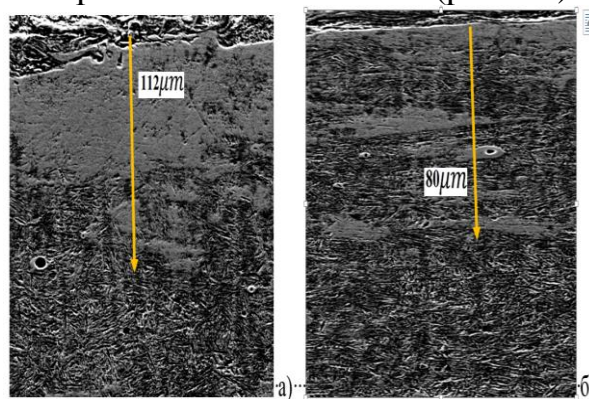


Рис. 16. Мікроструктура приповерхневих шарів сталі 40X (ІТІА) ($\times 400$): а) - змащування МС-20; б) - змащування ТСП-14гіп.

Запропоновано феноменологічну імовірнісну модель послідовного зносу субшарів трибологічного шару для опису процесів накопичення трибопошкоджень, що відносяться до класу кумулятивних ушкоджень, яка дозволяє прогнозувати величину зносу контактних поверхонь в залежності від часу роботи пар тертя. Застосування технології ІТІА забезпечує зниження швидкості зношування контактних поверхонь в критичних режимах тертя, в середньому в 1,58 раз, в гідро- та еластогідродинамічних режимах мащення – в 2,3 рази.

У додатках наведено: блок-схеми та функціональні схеми програмних модулів програмно-апаратного комплексу, результати моделювання напружено-деформованого стану зубчастої пари та акти впровадження і реалізації результатів наукових досліджень.

ВИСНОВКИ

При виконанні дисертаційної роботи вирішувалась наступна наукова проблема: управління процесами самоорганізації дисипативних структур, забезпечення мінімізації зносу і підвищення ресурсу пар тертя шляхом розробки методик оцінки і

вибору мастильних матеріалів з урахуванням структурно-енергетичних і реологічних факторів. На основі проведених досліджень зроблені наступні висновки наукових та практичних результатів роботи:

1. Розроблено програмно-апаратний комплекс для оцінки триботехнічних характеристик в лінійному контакті, який в реальному часі фіксує вихідні сигнали, обробляє їх (програмне забезпечення ProfiLab), аналізує та представляє їх в графічному і табличному зображенні – кінетику зміни товщини мастильного шару, моменту тертя, температури мастильного матеріалу, частоту обертання дослідних зразків. Кінематична незалежність приводів дозволила встановити довільний вибір діапазону проковзування (від 3 до 40%) відстаючої поверхні в умовах кочення з проковзуванням, що є реальним відтворенням режиму роботи зубчастих передач, де чисте кочення реалізується лише в полюсі зачеплення.

2. Визначені закономірності структурної пристосованості для сталі ШХ-15 і сталі 40Х, які полягають у зниженні питомої роботи тертя в 2 рази, зменшенні напруження зсуву мастильного шару і коефіцієнта тертя в 2,3 рази, збільшенні періоду напрацювання до прояву першого акту знеміцнення поверхневих шарів металу, що забезпечує підвищення зносостійкості контактних поверхонь сталі ШХ-15 в 3 рази в умовах кочення з проковзуванням 20%.

3. Активація поверхневих шарів металу в нестационарних умовах тертя при коченні з проковзуванням 10 – 40% і термо-механічна деструкція компонентів трансмісійних та моторних олив обумовлюють формування ретикулярних граничних шарів шаруватої сітчастої структури товщиною 0,02 – 3,8 мкм, що характеризуються неньютонівськими властивостями, підвищенням адгезійної складової коефіцієнта тертя з 0,006 до 0,047, підвищенням ефективної в'язкості негідродинамічної складової товщини мастильного шару в 1,4 – 2,3 рази.

4. В екстремальних умовах тертя збільшення проковзування з 10 до 40% призводить до зростання градієнта швидкості зсуву змащувальних шарів в 3,2 – 4,8 разів, в сформованих граничних шарах локально проявляються фазові переходи першого роду між твердим і рідким станом внаслідок їх плавлення при граничних значеннях зсувної деформації. У період, що передує схоплюванню контактних поверхонь, спостерігається прояв двох протилежних ефектів: збільшення адгезійної складової коефіцієнта тертя в 2,1 – 2,6 рази внаслідок підвищення ступеня металевого контакту поверхонь або зменшення коефіцієнта тертя в 1,5 – 2,3 рази при прояві короткочасних гідродинамічних ефектів в результаті осередкового плавлення граничних шарів.

5. Підвищення швидкості ковзання з 0,6 до 1,15 м/с при коченні пар тертя в екстремальних умовах є ведучим фактором, що обумовлює підвищення інтенсивності тепловиділення в контактні в 2 рази, локальне збільшення температури в 3 – 7 разів, зростання питомої роботи тертя в 1,7 – 3 рази, деструкцію граничних шарів, руйнування метастабільних вторинних структур. У періоди, що безпосередньо передують схоплюванню контактних поверхонь, встановлені загальні закономірності кінетики зміни реологічних властивостей граничних плівок мастильного матеріалу, що характеризують незворотні зміни в трибосистемах: стрімке збільшення градієнта

швидкості зсуву, напруги зсуву мастильних шарів, зниження ефективної в'язкості в контакті.

6. Встановлено підвищення температурно–механічної стійкості граничних змащувальних шарів зі збільшенням в'язкості базової основи олив, наявністю поліфункціональних присадок при тисках, що призводять до пружно-пластичної деформації контактних поверхонь, і швидкостях ковзання, що обумовлюють появу високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів. Термомеханічна стійкість граничних шарів, сформованих на контактних поверхнях сталі 40Х (імпульсне термоциклічне іонне азотування), зростає в 1,7 рази, в порівнянні з граничними шарами, утвореними на сталі 40Х (загартування + відпуск (400°C)). Формування мастильними матеріалами хемосорбційних або хімічно–модифікованих шарів оливою ТСП–14гіп сприяє зменшенню поширення пружно–пластичної деформації вглиб зміцнених азотованих шарів металу, що обумовлює зниження зносу контактних поверхонь в 1,5 – 1,9 разів, в порівнянні з оливою МС–20.

7. Встановлено взаємозв'язок енергетичного параметра (питомої роботи тертя) і зносостійкості сталі від типів вторинних структур, що утворюються на контактних поверхнях в процесі самоорганізації. Для вторинних структур I типу характерні низькі показники питомої роботи тертя ($2 - 10 \text{ Дж/мм}^2$), високий ступінь знеміцнення поверхневих шарів металу, аморфізація приповерхневих шарів металу на глибину 40 – 50 мкм, відсутність насичення активними елементами, що призводить до інтенсифікації зношування ($I = 10^{-8} - 10^{-9}$). Вторинні структури II типу характеризуються підвищенням зносостійкості внаслідок збільшення енергоємності контакту (A_{τ} становить $900 - 4000 \text{ Дж/мм}^2$), формування граничних хемосорбційних плівок, зміцнення поверхневих шарів металу (на $180 - 650 \text{ МПа}$), збільшення масової частки кисню в 1,2 – 1,7 раз і сірки в 1,2 – 3 рази в приповерхневих шарах металу на глибині до 50 мкм. Найменша інтенсивність зношування вторинних структур II типу на рівні $10^{-10} - 10^{-11}$ характерна для поверхонь в умовах кочення з проковзуванням 10 – 20%.

8. Визначено механізми поширення напружено–деформованого стану приповерхневих шарів металу, які полягають в зростанні механічного та теплового впливів, питомої роботи тертя при збільшенні проковзування від 3 до 40%. Підвищення енергетичного балансу трибосистеми, локалізація дотичних напружень зсуву в приповерхневих шарах металу, процеси знеміцнення – зміцнення приповерхневих шарів призводять до утворення дрібнозернистої структури деформованих шарів металу, глибина поширення яких становить 25 – 350 мкм. Встановлено появу центру концентратора напружень і виникнення зони локального підвищеного зносу по центральній ділянці лінійного контакту, де лінійний знос в 1,5 – 3,2 рази перевищує показники, характерні для периферійних ділянок по лінії контактування.

9. Розроблено методику прогнозування зносу контактних поверхонь в умовах кочення з проковзування 3 – 40% за характером зміни величини інтегральної мікротвердості, яка враховує кінетику зміни мікротвердості поверхневих шарів металу в процесі структурної пристосованості і градієнтний розподіл мікротвердості по глибині деформованого шару до 80 – 100 мкм. Дана методика дозволяє розробляти

практичні рекомендації по режимам технологічної та експлуатаційної модифікації елементів трибоспрямижень.

10. Визначені залежності щодо локалізації вектора дотичних напружень зсуву в приповерхневих шарах матеріалу контактних поверхонь при переході трибосистеми від гідродинамічного до граничного та напівсухого режимів мащення в умовах кочення з проковзуванням. Запропоновані емпіричні залежності величини максимальних дотичних напружень в контакті та глибини їх залягання з урахуванням триботехнічних параметрів контакту. Зростання швидкості ковзання обумовлює зміну напружено–деформованого стану контактних поверхонь за рахунок появи дотичних напружень зсуву при терті, вектор яких локалізується не тільки по товщині змащувального шару, але й опускається в приповерхневі шари металу. Збільшення проковзування до 20% та 40% обумовлює підвищення максимальних дотичних напружень в 1,7 та 2,27 раз та зростання глибини їх залягання в 1,85 та 3,65 разів в умовах граничного / напівсухого режимів мащення відповідно, в порівнянні з гідродинамічним режимом мащення.

11. Зростання величини проковзування з 3 до 40% в умовах кочення обумовлює прояв ряду дифракційних ефектів і структурно–фазових перетворень у поверхневих шарах сталі 45, які полягають в наступному: зміщення дифракційних максимумів у бік менших кутів дифракції, що обумовлене формуванням у деформованих тертях приповерхневих шарів макронапружень стиснення, які викликані зростанням міжплощинних відстаней у кристалічній ґратці; розширення дифракційних максимумів (лінія $(200)\alpha$), яке пов'язане як із зменшенням розмірів областей когерентного розсіяння, так і з зростанням мікронапружень; зміна співвідношення інтенсивності дифракційних максимумів від різних площин (наприклад $(110)\alpha / (200)\alpha$), яка пов'язана переорієнтацією зерен у приповерхневих деформованих шарах; поява дифракційних максимумів, що відповідають гцк аустенітній фазі ($(111)\gamma$).

12. Рівень енергії активації руйнування при терті для різних марок сталей (сталь 45, 9ХС, ШХ–15, 40Х, 30ХГСА) знаходиться в діапазоні 110 – 300 кДж/моль і залежить від ступеня зміцнення приповерхневих шарів, типу вторинних структур і плівок мастильного матеріалу, утворених в результаті структурної пристосованості. Підвищення ступеня проковзування до 40% при коченні обумовлює інтенсифікацію пластичної деформації приповерхневих шарів металу (структурно–чутливий коефіцієнт, що характеризує роботу руйнування від зовнішнього впливу, зростає в 3 – 5 разів), збільшення рівня накопичення енергії активації руйнування, в середньому, в 2,5 рази, зниження граничного значення контактного тиску на 140 – 180 МПа. Визначено вплив зовнішніх чинників на енергію активації руйнування – параметр ΔG , залежно від типу мастильного матеріалу та матеріалу контактних поверхонь, знаходиться в діапазоні -10...+35 кДж/моль.

13. Запропоновано застосування покриттів самофлюсуючого гранульованого порошку ПГ–АН9 та порошкового дроту ПП–Нп–30ХГСА для оптимізації технологічних процесів нанесення покриттів при виготовленні та зміцненні, ремонті та відновленні зубчастих коліс та шестерен. Проведений аналіз змащувальних, антифрикційних та протизношувальних властивостей сформованих в процесі тертя захисних поверхневих метастабільних структур свідчить, що вони характеризуються

ефективною несучою здатністю, високою стійкістю та адгезійною міцністю в умовах динамічного навантаження, зниженням в 2...3 рази приросту питомої роботи тертя в триботехнічному контакті та проявляють високий опір зношуванню. Зносостійкість контактних поверхонь з товщиною напиленого шару до 1,0...1,2 мм підвищується, в середньому, в 2...2,5 рази, антифрикційні властивості зростають в 1,5...2 рази, в порівнянні з товщиною напиленого шару покриттів до 0,3...0,5 мм.

14. На основі результатів мікрометричного вимірювання зносу гільзи циліндру моделей двигунів внутрішнього згоряння (ABC V6, M 50, M102–16V, 18S, EA65 та ін.) ряду марок автомобілів при першому капітальному ремонті створена методика розрахунку основних трибологічних характеристик пари ковзання верхнє компресійне кільце – гільза циліндра двигуна внутрішнього згоряння, яка дозволяє спрогнозувати ефективність мащення та ступінь зношування контактних поверхонь залежно від конструкційних параметрів двигуна та матеріалів кільце – гільза циліндра, режимів технічної експлуатації двигуна, основних параметрів робочого процесу ДВЗ та фізико-хімічних властивостей змащувальної рідини.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У фахових виданнях:

1. Порівняльні реологічні характеристики мінеральних і синтетичних масел / Р. Г. Мнацаканов, В. І. Маленко, О. О. Мікосянчик, О. Є. Якобчук // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2006. – Вип. 45. – С. 170-178. *Здобувачем проведена оцінка кінетики зміни ефективної в'язкості, напружень зсуву олив та коефіцієнту тертя в контакті.*

2. Модифікація поверхонь тертя чавун-сталь нанодисперсною добавкою фулерен C₆₀ / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, О. О. Мікосянчик // Дороги і мости: зб. наук. статей. – К. : ДерждорНДІ, 2006. – Вип. 5. – С. 312-320. *Здобувачем визначена інтенсивність зношування та кінетика зміни мікротвердості контактних поверхонь.*

3. Математична модель ефективності мащення нанодисперсної добавки C₆₀ в контакті тертя / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, С. С. Кроль // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К. : НТУ, 2006. – № 3. – С. 5-7. *Здобувачем одержані рівняння множинної регресії для оцінки товщини граничних шарів.*

4. Аналіз взаємозв'язку триботехнічних параметрів суспензії графіту ГС-4 на основі факторного методу / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, О. О. Мікосянчик // Вісник: наук.-техн. зб. – К.: НТУ, 2006. – № 11. – С. 3-5. *Здобувачем проведена обробка емпіричних даних динаміки змащувального процесу.*

5. Змащувальна здатність, антифрикційні та протизношувальні властивості масел для гідромеханічних коробок передач / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, Мікосянчик О.О. // Вісник: наук.-техн. зб. – К.:НТУ, 2006. – № 12. – С. 5-9. *Здобувачем розроблена математична модель оцінки ефективності мащення олив.*

6. Домінуючий вплив еластогідродинамічних чинників в нестационарних режимах тертя / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куш

// Вісник: наук.-техн. зб. в 2-х ч. Ч. 1. – К.: НТУ, 2006. – № 13. – С. 3-5. *Здобувачем проаналізована кінетика зміни товщини адсорбційних шарів в період пуску.*

7. Вплив нанодисперсної добавки фулерена C₆₀ на триботехнічні характеристики трансмісійного масла в період припрацювання / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куш // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К.: НТУ, 2007. – № 4. – С. 5-7. *Здобувачем проведена оцінка зміни шорсткості, контурної та фактичної площі контактних поверхонь.*

8. Підвищення надійності трансмісії автомобіля шляхом оптимізації робочих параметрів зони контакту / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. В. Руденко // Вісник: наук.-техн. зб. – К.: НТУ, 2007. – № 14. – С. 5-8. *Здобувачем проаналізовано вплив контактного навантаження та режиму мащення на фактичну площу контакту.*

9. Кінетика формування експлуатаційної шорсткості контактних поверхонь / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куш // Вісник: наук.-техн. зб. в 2-х частинах: Ч.1. – К.: НТУ, 2007. – № 15. – С. 15-18. *Здобувачем проведена оцінка складових товщини мастильного шару залежно від шорсткості.*

10. Динаміка зношування контактних поверхонь при введенні нанодобавки / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куш // Вісник: наук.-техн. зб. – К.: НТУ, 2008. – № 16. – С. 3-6. *Здобувачем виконаний аналіз кореляційних зв'язків між інтенсивністю зношування та шорсткістю.*

11. Математична модель оцінки ефективності мащення механізмів з локальною формою контакту / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куш // Автошляховик України (окремий вип.). – Вісник Центр. наук. центру транспортної акад. України. – 2009. – № 12. – С. 133-134. *Здобувачем виконані дослідження змащувальних, протизношувальних та антифрикційних властивостей оливи.*

12. Механізм зношування Ст45 при додаванні до мастильного матеріалу бутилкаучуку / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця // Машинознавство. – 2009. – № 11 (149). – С. 36-38. *Здобувачем досліджено вплив присадки на адсорбційну активність оливи в трибоконтаті.*

13. Закономірності зношування пар тертя в умовах динамічного навантаження / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця // Вісник: наук.-техн. зб. в 2-х ч. Ч.2. – К.: НТУ, 2010. – № 21. – С. 48-52. *Здобувачем визначені закономірності зміни мікротвердості поверхневих шарів сталі ШХ-15 при напрацюванні в широкому діапазоні навантажень.*

14. Мікосянчик О. О. Кінетика зміни мікротвердості поверхневих шарів металу при адаптації граничних адсорбційних шарів мастильного матеріалу в зоні контакту / О. О. Мікосянчик // Проблеми тертя та зношування. – 2013. – № 2 (61). – С. 56-61.

15. Оцінка динамічної ефективної в'язкості мастильних матеріалів в триботехнічному контакті / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. В. Кіндрачук, М. С. Хімко // Проблеми тертя та зношування. – 2014. – № 4 (65). – С. 83-89. *Здобувачем проаналізована кінетика формування гідро- та негідродинамічної складової товщини мастильного шару.*

16. Мікосянчик О. О. Моделювання інтенсивності зношування гільзи циліндра двигуна внутрішнього згорання / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. С. Хімко //

Проблеми тертя та зношування. – 2015. – № 1 (66). – С. 140-145. *Здобувачем проведена апробація методики прогнозування інтенсивності зношування гільзи циліндра для різних типів двигунів.*

17. Структурно-фазовые превращения в покрытиях из сталей ферритного и мартенситного классов при их напылении и модифицировании электроконтактной обработкой / М. И. Черновол, Т. В. Ворона, Е. Е. Кожевникова, О. А. Микосянчик, Л. А. Лопата // Проблемы тертя та зношування. – 2015. – № 2 (67). – С. 99-109. *Здобувачем проаналізовано результати стереологічного аналізу пористості газотермічного покриття.*

18. Реологічні властивості змащувальних шарів та енергонавантаженисть в контактї тертя при змінних контактних напругах / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. С. Хімко, С. В. Шакулієв // Проблемы тертя та зношування. – 2015. – № 4 (69). – С. 140-145. *Здобувачем проаналізовано кореляційний зв'язок між триботехнічними властивостями мастильного матеріалу та енергоемністю контакту.*

19. Мікосянчик О. О. Автоматизований триботехнічний комплекс для оцінки змащувальних процесів в парах тертя / О. О. Мікосянчик, О. І. Запорожець, Р. Г. Мнацаканов // Проблемы трибології. – 2015. – № 4 (78). – С. 42-48. *Здобувачем проведені дослідження змащувальних, антифрикційних характеристик олив та питомої роботи тертя.*

20. Оценка структурно-энергетических показателей пар трения при работе в режиме пуск – остановка / О. А. Микосянчик, Р. Г. Мнацаканов, А. Ю. Кумурджи, С. В. Шакулиев // Проблемы тертя та зношування. – 2016. – № 1 (70). – С. 11-20. *Здобувачем встановлена залежність інтенсивності зношування від кінетики зміни питомої роботи тертя та структурного стану поверхонь.*

21. Микосянчик О. А. К вопросу выбора методики установления функциональных взаимосвязей трибопроцессов при экспериментальном исследовании пар трения с локальным контактом / О. А. Микосянчик, Н. О. Кузин // Проблемы тертя та зношування. – 2016. – № 4 (73). – С. 4-12. *Здобувачем встановлений градієнтний розподіл мікротвердості по глибині та розглянуті триботехнічні інваріанти.*

22. Змащувальна дія олив при нестационарных процессах в умовах припрацювання / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, В. М. Лопата, В. І. Калініченко // Проблемы трибології. – 2016. – № 1 (79). – С. 69-76. *Здобувачем проведена оцінка ефективності припрацювання моторних та синтетичних олив в нестационарных умовах тертя.*

23. Оценка энергетических, реологических и противоизносных характеристик контакта в условиях качения с переменным скольжением / О. А. Микосянчик, Р. Г. Мнацаканов, В. И. Калиниченко, А. В. Куцев // Проблемы трибології. – 2016. – № 3 (81). – С. 6-14. *Здобувачем проаналізована кінетика зміни питомої роботи тертя залежно від величини проковзування в контактї.*

24. Микосянчик О. А. Влияние переменного градиента скорости сдвига на реологические и противоизносные свойства контакта в режиме пуск – остановка / О. А. Микосянчик // Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 3 (98), ч. 1. – С. 48-55.

25. Анализ триботехнических характеристик самофлюсующихся покрытий в условиях качения со скольжением при нестационарном нагружении / О. А.

Микосянчик, Б. А. Ляшенко, М. С. Агеев, В. М. Лопата // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 2/1 (28). – С. 4-9. *Здобувачем встановлений взаємозв'язок змащувальних, антифрикційних та енергетичних характеристик з зносостійкістю самофлюсуючого покриття.*

26. Микосянчик О. А. Термо – кинетическая модель оценки долговечности контактных поверхностей в условиях смазочного действия в нестационарных режимах работы / О. А. Микосянчик // Проблемы тертя та зношування. – 2017. – №1 (74). – С. 65–77.

27. Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions / O. Mikosyanchyk, R. Mnatsakanov, A. Zaporozhets, R. Kostynik // Eastern-European J. Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/1 (82). – P. 24-31. *Здобувачем проаналізовано вплив реологічних та енергетичних параметрів на коефіцієнт тертя в критичних режимах навантаження.*

У іноземних спеціалізованих виданнях:

28. Кинетика изнашивания контактных поверхностей при использовании добавки фуллерена C_{60} к моторному маслу / Н. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. А. Микосянчик, А. И. Куц // Трение и износ. – 2009. – Т. 30, № 6. – С. 550–555. *Здобувачем досліджено кінетику зміни мікротвердості поверхневих шарів сталі та чавуну в нестационарних умовах тертя.*

29. Evaluation of effectiveness the breaking-in of friction pair in the non-stationary work conditions / Tareq M.A. Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov, M. S. Khimko // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. – 2015. – № 9 (33). – P. 301–307. *Здобувачем розроблено методику оцінки кінцевого терміну припрацювання пар тертя.*

30. Structural-Energy characteristics of tribotechnical contact in unsteady / M. A. Tareq Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov, A. Zaporozhets // Modern Mechanical Engineering. – 2016. – № 6. – P. 91–97. *Здобувачем досліджені протизношувальні властивості сталі 40X та ШХ-15 в умовах кочення з проковзуванням.*

31. Al-quraan Tareq M. A. The Effect of the Slippage Degree at Rolling with Slipping on the Wear Resistance of Contact Surfaces / Tareq M.A. Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov // Mechanical Engineering Research. – 2016. – Vol. 6, № 2. – P. 48–61. *Здобувачем проаналізовані результати спектрального аналізу розподілу елементів та розподіл мікротвердості деформованої зони по глибині.*

32. Al-quraan Tareq M. A. Temperature Resistance of the Boundary Lubrication Layers Under Rolling With Slippage Condition / Tareq M.A. Al-quraan, O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov // International Journal of Mechanical Engineering and Applications. – 2017. – Vol. 5, № 2. – P. 78–86. *Здобувачем встановлено взаємозв'язок між процесами тепловиділення в триботехнічному контакті та зносостійкістю пар тертя.*

Матеріали та тези конференцій:

33. Вплив фізико-хімічного складу масел для гідромеханічних коробок передач на кінетику формування мастильного шару / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, О. О. Микосянчик // Materialy XVII Konf. Miedzynarodowej: “Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych”, (Rzeszów, 20-23 wrzesień 2006 r.). – Rzeszów: Politechnika, 2006. – P.

43–48. *Здобувачем визначені триботехнічні властивості олив на мінеральній та синтетичній базових фракцій.*

34. Дмитриченко М. Ф. Розроблення методики прогнозування довговічності вузлів тертя двигунів внутрішнього згорання та трансмісії автомобілів в нестационарних умовах / М. Ф. Дмитриченко, О. О. Мікосянчик, І. М. Козоріз // LXV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2009. – С. 6-7. *Здобувачем досліджені змащувальні, антифрикційні та протизношувальні властивості олив в несталих умовах тертя.*

35. Динамика интенсивности изнашивания контактных поверхностей при использовании добавки фуллерена C_{60} / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. А. Микосянчик, А. И. Куц // Полимерные композиты и трибология: междунар. науч.-техн. конф., 22-25 июня 2009 г., Гомель: тезисы докл. – Гомель: ИММС им. В. А. Белого НАН Беларуси, 2009. – С. 72. *Здобувачем встановлений механізм підвищення зносостійкості пари тертя чавун – сталь при використанні нанодисперсної добавки.*

36. Дмитриченко М. Ф. Вплив навантаження на динаміку формування мастильного шару в еластогідродинамічному контакті / М. Ф. Дмитриченко, О. О. Мікосянчик, І. М. Козоріз // LXVI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2010. – С. 7. *Здобувачем проаналізована товщина плівки в ЕГД-контакті залежно від в'язкості олив та навантаження.*

37. Дмитриченко М. Ф. Моделювання та розрахунок трибологічних процесів пар тертя в двигуні внутрішнього згорання / М. Ф. Дмитриченко, О. О. Мікосянчик, Ю. П. Ярошенко // LXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2011. – С. 6. *Здобувачем розроблений алгоритм розрахунку товщини мастильного шару та інтенсивності зношування пари тертя поршневе кільце - гільза циліндра.*

38. Ефективність мащення олив в контакті залежно від терміну їх експлуатації / Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця, О. В. Руденко // Ольвійський форум-2011: стратегії України в геополітичному просторі: міжнарод. наук.-практ. конф., 8-12 червня 2011 р., Ялта, Крим, Україна: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – Т. 11 – С. 5. *Здобувачем встановлений механізм підвищення зносостійкості пари тертя чавун – сталь при використанні нанодисперсної добавки.*

39. Мнацаканов Р. Г. Визначення впливу трибологічних процесів на міцнісні характеристики приповерхневих шарів контактних поверхонь / Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця // Ольвійський форум-2012: стратегії України в геополітичному просторі: міжнар. наук.-практ. конф., 6-10 червня 2012 р., Севастополь, Крим, Україна: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2012. – Т. 12. – С. 24-25. *Здобувачем проведені дослідження розподілу мікротвердості поверхневих шарів по глибині.*

40. Способ получения износостойких покрытий / М. И. Черновол, Т. В. Ворона, О. А. Микосянчик, Л. А. Лопата, В. И. Жорник // Инженерия поверхности и реновация изделий: 15-я международ. науч.-техн. конф., 1-5 июня 2015 г., Одесская обл., Затока

: тезиси докл. – К., 2015 – С. 206-208. *Здобувачем досліджено пористість газотермічних сталевих покриттів.*

41. Микосянчик О. А. Износостойкость покрытия стали на чугуна в условиях качения с проскальзыванием / О. А. Микосянчик, Р. Г. Мнацаканов // Трибология, энерго- та ресурсозбереження: міжнарод. наук.-практ. конф. в рамках X Міжнар. наук.-практ. конф. „Ольвійський форум-2016”, 9-12 червня 2016 р., Миколаїв, Коблево, Україна: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. –Т. 12 – С. 31–33. *Здобувачем проаналізована зносостійкість напиленого покриття сталі 30ХГСА на чавуні при змащуванні трансмісійною оливою.*

42. Алгоритм визначення товщини мастильного шару між першим компресійним кільцем та гільзою циліндра ДВЗ залежно від робочого процесу / О. О.Мікосянчик, З. Є. Новохатська, М. О. Хом'якова, М. В. Ціркун // Авіа-2013: XI Міжнародної наук.-техн. конф., 21-23 травня, 2013 р., Київ: матеріали. – К.: НАУ, 2013. – Т. 3. – С. 25–28. *Здобувачем розроблений алгоритм розрахунку безрозмірних параметрів швидкості, матеріалу та навантаження.*

43. Вплив контактного навантаження на антифрикційні властивості базових олив / О. О.Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. С. Хімко, М. А. Петренко // Авіа-2015: XII Міжнародної наук.-техн. конф., 28-29 квітня 2015, Київ: матеріали. – К.: НАУ, 2015. – С. 25–28. *Здобувачем досліджено вплив навантаження на зміну ефективної в'язкості базових олив.*

44. Мікосянчик О. О. Нестационарні процеси як фактор припрацювання пар тертя / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, С. В. Шакулієв // Технічна творчість: зб. наук. праць (вип. присвячено Міжнародній наук.-техн. конф. молодих науковців «Сучасні технології в механіці», 21-23 квітня 2016 р., м. Хмельницький. – Хмельницький: ХНУ, 2016. – № 1. – С. 101–103. *Здобувачем проаналізовано вплив навантаження на частоту руйнування граничних змащувальних шарів.*

45. Tribotechnical characteristics of self-fluxing covering in non-stationary condition of friction / О. О. Mikosianchik, R. G. Mnatsakanov, A. M. Khimko, M. S. Khimko, M. S. Shakuliev // Aviation in the XXI-st century: Safety in Aviation and Space Technologies, 19-21 september, 2016 Kyiv, Ukraine: proceedings the seventh world congress. – Kyiv: NAU, 2016. – P. 1.4.51–1.4.56. *Здобувачем досліджено триботехнічні властивості самофлюсуючого порошку в умовах ступеневого підвищення навантаження.*

Патенти та свідоцтва:

46. Пат. 88748, Україна, МПК G01N 3/56. Пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів / Мікосянчик О. О.; заявник та патентовласник Мікосянчик О. О. – № у 2013 13450; заявл. 19.11.2013; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6. – 4 с.

47. Пат. 89261, Україна, МПК G01N 11/00. Спосіб оцінки динамічної ефективності в'язкості мастильних матеріалів в триботехнічному контакті / Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Кіндрачук М. В.; заявник та патентовласник Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Кіндрачук М. В. – № у 2013 14086; заявл. 04.12.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7. – 4 с. *Здобувачем отриманий взаємозв'язок між кінетикою формування граничної плівки та ефективною в'язкістю олив.*

48. Пат. 92071, Україна, МПК G01N 3/56. Спосіб припрацювання пар тертя в нестационарних умовах роботи / Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко М. С.; заявник та патентовласник Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко М. С. – № и 2014 02492; заявл. 13.03.2014; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14. – 4 с. *Здобувачем визначена кінетика зміни товщини мастильного шару, моменту тертя та питомої роботи тертя для олів в режимі пуск-зупинка.*

49. Пат. 98452, Україна, МПК G23C 14/00. Спосіб отримання твердого покриття з підвищеним опором втомному руйнуванню на поверхні металевого виробу / Кіндрачук М. В., Духота О. І., Кудрін А. П., Тісов О. В., Мікосянчик О. О., Науменко Н. О.; заявник та патентовласник Кіндрачук М. В., Духота О. І., Кудрін А. П., Тісов О. В., Мікосянчик О. О., Науменко Н. О. – № и 2014 12654; заявл. 25.11.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8. – 6 с. *Здобувачем проведено дослідження мікротвердості зміцненого шару.*

50. Свідоцтво 38664. Методика розрахунку триботехнічних параметрів пар ковзання двигуна внутрішнього згоряння / Мікосянчик О. О.; заявник та власник Національний транспортний університет. – № 38824, заявл. 31.03.2011; зареєстровано 21.06.2011. – 2 с.

АНОТАЦІЯ

Мікосянчик О.О. Структурно-енергетичні та реологічні показники мастильного шару в контакті тертя в умовах несталих режимів роботи. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» (13 – Механічна інженерія). – Національний авіаційний університет, Київ, 2017.

В дисертаційній роботі вирішувалась науково-технічна проблема управління процесами самоорганізації дисипативних структур, забезпечення мінімізації зносу і підвищення ресурсу пар тертя шляхом розробки методик оцінки і вибору мастильних матеріалів з урахуванням структурно-енергетичних і реологічних факторів, спрямованих на зменшення інтенсивності накопичення енергії руйнування контактних поверхонь та мастильного шару, створення градієнтності міцнісних характеристик внаслідок локалізації деформаційних процесів в тонкому поверхневому шарі.

Визначені закономірності структурної пристосованості для різних марок сталей та мастильних матеріалів різного експлуатаційного призначення, які полягають у зниженні питомої роботи тертя, зменшенні напруги зсуву мастильного шару і коефіцієнта тертя, збільшенні періоду напрацювання до прояву першого етапу знеміцнення поверхневих шарів металу, що забезпечує підвищення зносостійкості контактних поверхонь сталей в умовах кочення з проковзуванням 3 – 40%.

Розроблена термо-кінетична модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів в умовах змащування при несталих режимах роботи, яка включає методику оцінки активаційних характеристик матеріалів, що характеризують довговічність області багатоциклової втоми і області малоциклової втоми debris-шару. Розроблено математичну модель оцінки локалізації

вектора максимальних дотичних напружень при переході трибосистеми від гідродинамічного до граничного режиму мащення. Встановлені залежності інтенсивності зношування трибоелементів від зміни енергоємності контакту при структурній пристосованості вторинних структур на основі оцінки температурної і механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу і міцності матеріалу контактних поверхонь.

Розроблений програмно–апаратний комплекс, програмне математичне забезпечення, способи і методики використовуються при проведенні наукових досліджень, виборі складу, структури та технологій нанесення зносостійких покриттів і удосконаленні мастильних матеріалів різного експлуатаційного призначення на підприємствах та установах України.

Ключові слова: товщина мастильного шару, ефективна в'язкість, дотичні напруження, інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, питома робота тертя, енергія активації руйнування, структурно–фазові перетворення, мікротвердість, несталі умови тертя.

АННОТАЦІЯ

Микосянчик О.А. Структурно-энергетические и реологические показатели смазочного слоя в контакте трения в условиях нестационарных режимов работы. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.04 «Трение и изнашивание в машинах» (13 – Механическая инженерия). – Национальный авиационный университет, Киев, 2017.

В диссертационной работе решалась научно–техническая проблема управления процессами самоорганизации диссипативных структур, обеспечение минимизации износа и повышение ресурса пар трения путем разработки методик оценки и выбора смазочных материалов с учетом структурно–энергетических и реологических факторов, направленных на уменьшение интенсивности накопления энергии разрушения контактных поверхностей и смазочного слоя, создание градиентности прочностных характеристик вследствие локализации деформационных процессов в тонком поверхностном слое.

Определены закономерности структурной приспособляемости для различных марок сталей и смазочных материалов различного эксплуатационного назначения, которые заключаются в снижении удельной работы трения, уменьшении напряжения сдвига смазочного слоя и коэффициента трения, увеличении периода наработки до проявления первого этапа разупрочнения поверхностных слоев металла, что обеспечивает повышение износостойкости контактных поверхностей сталей в условиях качения с проскальзыванием 3 – 40%.

Разработана термо–кинетическая модель оценки долговечности контактных поверхностей на основе структурно–энергетических параметров в условиях смазки при неустановившихся режимах работы, которая включает методику оценки активационных характеристик материалов, характеризующих долговечность области многоциклового усталости и области малоциклового усталости debris–слоя. Установлено влияние напряженно–деформированного состояния материала

контактных поверхностей, степени упрочнения приповерхностных слоев, типа вторичных структур и граничных пленок смазочного материала на энергию активации разрушения при трении, которая составляет 110 – 300 кДж/моль для различных марок сталей. Впервые установлено, что параметр внешней среды ΔG может изменять энергию активации разрушения от -10 до +35 кДж/моль в зависимости от типа смазочного материала, удельной работы трения, степени упрочнения – разупрочнения контактных поверхностей.

Разработана методика расчета интенсивности изнашивания элементов трибосопряжений, работающих в условиях качения с проскальзыванием, которая учитывает кинетику изменения антифрикционных, реологических, энергетических характеристик контакта и долговечность debris-слоя.

Разработана математическая модель оценки локализации вектора максимальных касательных напряжений при переходе трибосистемы от гидродинамического к граничному режиму смазочного действия. Установлены зависимости интенсивности изнашивания трибоэлементов от изменения энергоемкости контакта при структурной приспособляемости вторичных структур на основе оценки температурной и механической стойкости граничных пленок смазочного материала и прочностных характеристик материала контактных поверхностей.

Теоретически и экспериментально обоснован механизм проявления процесса схватывания контактных поверхностей с позиций фазовых переходов первого рода в граничных слоях смазочного материала. Колебательный характер стремительного увеличения или уменьшения толщины смазочного слоя, коэффициента трения и удельной работы трения при схватывании обусловлен переходом упорядоченных твердокристаллических слоистых ретикулярных структур смазочного материала в жидкую фазу при увеличении локальной температуры в контакте до 125 – 400⁰С и градиента скорости сдвига до $(0,67 – 86) 10^6 \text{с}^{-1}$.

Практическое значение полученных результатов заключается в повышении износостойкости узлов трения машин и механизмов на этапах их проектирования, эксплуатации и ремонта путем подбора совместимости трибоэлементов на основе научно-обоснованного выбора применения методик оценки триботехнических характеристик контактных поверхностей, смазочного материала и долговечности изнашиваемого слоя при самоорганизации диссипативных структур в неустановившихся условиях трения.

Разработан программно-аппаратный комплекс, программное математическое обеспечение, способы и методики используются при проведении научных исследований, выборе состава, структуры и технологий нанесения износостойких покрытий и совершенствовании смазочных материалов различного эксплуатационного назначения на предприятиях и в учреждениях Украины.

Ключевые слова: толщина смазочного слоя, эффективная вязкость, касательные напряжения, интенсивность изнашивания, коэффициент трения, удельная работа трения, энергия активации разрушения, структурно-фазовые превращения, микротвердость, нестационарные условия трения.

SUMMARY

Mikosyanchik O.O. The structural, energy and rheological indicators of lubricant layer in friction contact under non-stationery friction conditions. – Qualifying scientific work on the right of manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.02.04 «The friction and wear in the machines» (13 – Mechanical engineering). – National Aviation University, Kyiv, 2017.

The thesis was solving the scientific and technical problem of the process control of self-organization in dissipative structures; minimization of wear and resource increasing of friction pairs by developing methodology for evaluation and selection of lubricants, that take into account the structural, energy and rheological indicators to reduce the intensity of accumulation of demolishing energy for contact surfaces and lubricant layer; creating the gradient of durable characteristics through the localization of the deformation processes in thin surface layer.

The regularities of structural adaptation for different steels grades and lubricants serving to various operational purposes were defined. The regularities reflect the reduction of the specific work of friction, decrease in shear stress of lubricant layer and friction coefficient, increase in the operational time till the manifestation of the first phase of metal surface layers softening; which, in its turn, enhance the durability of the steel contact surfaces under rolling with sliding condition from 3% to 40%.

Thermo-kinetic model was developed to assess durability of contact surfaces based on structural and energy parameters under lubrication in non-stationery friction conditions that includes methodology for assessing activation characteristics of the materials that characterize the durability of area of high-cycle fatigue and area of low-cycle fatigue debris-layer. A mathematical model was devolved to evaluate localization of the vector of the maximum shear stress in the tribosystem transition from hydrodynamic to boundary mode of lubrication. The correlation was defined for triboelements wear rate from the change of energy intensity of the contact with the structural adaptation of secondary structures based on estimates of temperature and mechanical stability of the boundary films of the lubricant and strength of materials of the contact surfaces.

The developed hard-software system, mathematical software, methodologies were used in conducting scientific research, in selection of the composition, structure and techniques of antri-wear coatings, and in the improvement of lubricants for various operational purposes at the enterprises and institutions of Ukraine.

Key words: lubricant layer thickness, effective viscosity, shear stress, intensity of wear, friction coefficient, specific friction work, activation energy of destruction, structural and phase transformation, microhardness, non-stationery friction conditions.