

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Ганзюк Андрій Леонідович

УДК 621.891

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТРИБОСИСТЕМ
В УМОВАХ МАЛОАМПЛІТУДНОГО ФРЕТИНГУ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЛЕГКОПЛАВКИХ СПЛАВІВ**

05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Хмельницький – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Хмельницькому національному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Олександренко Віктор Петрович,
Хмельницький національний університет,
декан факультету інженерної механіки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Савуляк Валерій Іванович,
Вінницький національний технічний
університет,
професор кафедри галузевого машинобудування;

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

Захист відбудеться “23” грудня 2019 року о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 70.052.02 у Хмельницькому національному університеті за адресою: 29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11, 3-й навчальний корпус, зал засідань.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Хмельницького національного університету за адресою: м. Хмельницький, вул. Кам'янецька, 110/1 та на сайті Хмельницького національного університету за адресою: www.khnu.km.ua.

Автореферат розісланий “21” листопада 2019 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. О. Харжевський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Відомо, що ресурс роботи трибоз'єднань обмежується передчасним зношуванням чи руйнуванням контактуючих деталей у результаті виникнення та розвитку особливого виду пошкоджень поверхні – фретинг-корозії (ФК). Явище фретингу, як одного з контактних видів взаємодії, пов'язано не стільки з проблемою зношування вузлів тертя, а скільки з небезпекою раптового виходу з ладу номінально-нерухомих з'єднань. Особливу значимість ФК приймає у вузлах транспортних засобів, а саме: наконечники штанг передньої підвіски, петлі тягово-зчіпного пристрою причепу, корпус рульового механізму та вузли кріплення баків для перевезення різних речовин, шкворневі втулки вузла повороту колеса та втулки поршневих пальців, які перебувають в умовах динамічної взаємодії з навколишнім середовищем (активними газами повітря та водним середовищем).

Використання досягнень трибології дозволяє суттєво підвищити експлуатаційні властивості вузлів та механізмів, досягнути значних економічних і екологічних результатів. Основні напрямки робіт по підвищенню експлуатаційних можливостей з'єднань транспортних засобів в області трибології полягають в подальшому розвитку фундаментальної теорії тертя та зношування, удосконаленні конструкційних вузлів тертя машин і механізмів, підвищення їх надійності та ресурсів роботи, використання нових матеріалів і технологій.

Розвиток наукових основ еволюційної моделі перебігу фретинг-процесів (ФП) у номінально-нерухомих з'єднаннях дасть можливість запобігати різного роду наслідків поверхневої та об'ємної втоми, корозію твердих тіл. Багатогранність даного питання створює необхідність в обґрунтуванні закономірностей фізико-хімічної активації конструкційних матеріалів в умовах малоамплітудного фретингу та пошуку способів уповільнення ФП. Аналіз літературних джерел показав, що на сучасному етапі не існує універсальних композиційних матеріалів, здатних рівною мірою успішно застосовуватися за умов ударних навантажень та інтенсивного зношування в агресивних середовищах.

Отже, підвищення зносостійкості трибосистем в умовах малоамплітудного фретингу за допомогою спеціальних покриттів на основі легкоплавких сплавів є актуальним науково-технічним завданням.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась у відповідності до державних і науково-технічних програм за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки України та відповідає положенням Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» від 08.09. 2011р. № 3715-VI та постанови Кабінету Міністрів України від 28.12.2016 р. №1056 «Деякі питання визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня на 2017-2021 рр.», відповідно до Держбюджетної

теми №1Б-2016 «Теоретико-експериментальні методи та комп'ютерні моделі забезпечення живучості циліндричних трибосистем ковзання при нормальному і швидкісному терті» (№ ДР 0116U001549) у якості виконавця по впровадженню результатів роботи, а також в рамках науково-дослідних робіт Хмельницького національного університету.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення зносостійкості трибосистем номінально-нерухомих з'єднань деталей в умовах малоамплітудного фретингу із застосуванням легкоплавких сплавів.

Для досягнення вказаної мети у роботі поставлені та розв'язувались наступні задачі:

- провести аналіз фретинг-ушкоджень контактних поверхонь деталей і вузлів транспортних засобів;
- удосконалити існуючу експериментальну базу досліджень малоамплітудного фретинг-процесу;
- провести теоретичний аналіз процесу накопичення критичної величини енергії деформації металу в умовах вібраційної контактної взаємодії у зв'язку з відповідною зміною активності трибохімічних реакцій;
- встановити трибохімічні особливості впливу на фретинг-процес корозійної активності матеріалів фрикційного контакту та окислювальних властивостей зовнішнього газового та рідинного середовищ;
- дослідити внесок хімічної і електрохімічної корозії на різних стадіях розвитку фретингу з урахуванням механічних і хімічних властивостей контактуючих матеріалів;
- на основі методів термодинаміки незворотних процесів дослідити основні деформаційні і трибохімічні явища, відповідальні за дисипацію механічної енергії в умовах фретинг-корозії;
- дослідити фретингостійкість покриття з легкоплавкого сплаву Bi-Pb-Sn-Cd та встановити характер змін відносного мікроелементного складу в зоні фретингу при введенні легкоплавкого композиту;
- розробити технологію нанесення покриття з легкоплавкого сплаву та вивчити його працездатність з урахуванням умов експлуатації та впливу зовнішнього середовища.

Об'єкт дослідження. Процеси контактної взаємодії та зношування в умовах малоамплітудного фретингу з урахуванням впливу зовнішнього середовища.

Предмет дослідження. Номінально-нерухомий фрикційний контакт поверхонь твердих тіл та параметри процесів трибохімічних реакцій в номінально-нерухомих фрикційних з'єднаннях, закономірності впливу легкоплавких сплавів для уповільнення ФК.

Методи та засоби дослідження. Теоретичні висновки отримані за результатами застосування методів металографічного, дифрактометричного та хроматографічного аналізу із використанням високоточного аналітичного обладнання, а саме: рентгенофлуоресцентного спектрометра, ІЧ-Фур'є спектрометра, газорідинного хроматографа.

Експериментальні дослідження виконувались за схемами «площина – кулька», «площина – площина» у широкому діапазоні зміни нормальних тисків, частот та амплітуд вібраційного збурення. Амплітудно-частотна характеристика вібраційних сигналів від контактної пари визначалась швидким перетворенням Фур'є. Пошук особливостей у вібросигналах, енергетичні характеристики мікропроковзування, визначались методом вейвлет-аналізу часових рядів ФП. Дослідження мікроструктури поверхневого шару зразків проводились на мікроскопах МИМ-10 і «Leica». При обробці результатів дослідів було застосовано методи математичної статистики. Характеристики об'єктів дослідження визначались відповідно до діючої нормативної документації.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Набули подальшого розвитку уявлення про проходження трибохімічних реакцій в номінально-нерухомих фрикційних з'єднаннях з урахуванням властивостей контактуючих матеріалів та впливу зовнішнього середовища.

2. Експериментально підтверджена адсорбційно-електрохімічна концепція розвитку фретинг-корозії в інкубаційний (латентний) період, коли виникають умови для формування в зоні тертя електрохімічно-активного середовища, яке сприяє корозійно-втомному руйнуванню фрикційного контакту.

3. На засадах термодинаміки незворотних процесів розглянуто внесок основних деформаційних і трибохімічних явищ в дисипацію механічної енергії в умовах фретинг-корозії, та визначено їх взаємний вплив.

4. Побудовано динамічну модель, що описує умови взаємодії контактуючих тіл у номінально-нерухомих з'єднаннях при знакозмінному навантаженні з урахуванням впливу властивостей зовнішнього рідинного середовища та вивчена кінематика переходу від неперервного зміщення до неперервного проковзування в умовах вібраційного контакту.

5. Встановлені закономірності зношування при фретинг-процесі із використанням легкоплавких сплавів у номінально-нерухомих з'єднаннях.

Практичне значення одержаних результатів. На базі теоретичних та експериментальних досліджень вирішена технічна задача уповільнення ФК та підвищення строку експлуатації номінально-нерухомих фрикційний з'єднань.

Розроблена установка для дослідження процесу «напруга – деформація» у механічному контакті з вищою парою для матеріалів та покриттів (пат. України №38036). Розроблено пристрій та технологію для нанесення на різьбову поверхню легкоплавкого сплаву на основі Bi-Pb-Sn-Cd (пат. України №119407). Запропоновано спосіб кристалооптичного аналізу структурної будови агресивного водного середовища та ступеню його активації (пат. України №128630).

Наукові положення та методики передані для використання на ВП Волочиський машинобудівний завод ПАТ «Мотор Січ», ТОВ «Агропартнер -

1» м. Хмельницький і впроваджені у навчальному процесі кафедри трибології, автомобілів і матеріалознавства Хмельницького національного університету при викладанні курсів «Вузли тертя машин» та «Інженерія поверхні».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення та практичні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Постановка задачі, формулювання завдань досліджень дисертаційної роботи та аналіз результатів виконано спільно з науковим керівником. З 24 наукових праць, опублікованих за темою дисертаційної роботи, 3 виконано без співавторів, наукові статті у співавторстві – спільно з науковим керівником та провідними фахівцями у галузі тертя та зношування, де здобувачу належить провідна роль в отриманні наукових результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи були представлені і отримали позитивну оцінку на: VII науковій конференції «Львівські хімічні читання – 99», м. Львів (27-28 травня 1999 р.); III українсько-польської наукової конференції молодих вчених, м. Хмельницький (28-30 квітня 2005 р.); 9-th Conf. «Active noise and vibration control methods», Krakow-Zakopane (Poland, 2009); міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми трибології», м. Київ (19-21 трав. 2010 р.); міжнародній науковій конференції «IV Українсько-Польські наукові діалоги», м. Яремче (11-14 жовтня 2011 р.); XIII міжнародній науково-практичній конференції «Новината за напреднали наука - 2017», София (2017 р.); XII International scientific and practical conference «Areas of scientific thought», Sheffield (2017 р.); XVI міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях», м. Вінниця (2017 р.); XIII International scientific and practical conference «Trends of modern science – 2018», Sheffield (2018 р.); XV International scientific and practical Conference «Modern scientific potential-2019», Sheffield (2019 р.); XV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Europejska nauka XXI powieką -2019», Przemysł (2019).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 24 роботи, у тому числі 9 статей у фахових виданнях переліку МОН України, одна у науковому періодичному іноземному виданні, три патенти України на корисні моделі та один спосіб, 11 тез доповідей та матеріалів конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Обсяг анотації складає 16 сторінок. Дисертація має загальний обсяг 206 сторінок, включає 60 рисунків, три таблиці, список використаних літературних джерел з 159 найменувань. Додатки складають 18 сторінок. Обсяг основної частини дисертації становить 152 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність поставленої науково-технічної задачі, сформульовано мету, об'єкт, предмет дослідження та задачі, які розв'язуються в роботі. Визначено наукову новизну та практичну цінність результатів, вказано особистий внесок автора, напрями використання і впровадження результатів досліджень, вказано дані про апробацію основних положень дисертації, її структуру та кількість опублікованих праць.

У першому розділі наведений аналіз фретинг-пошкоджень (ФП) та їх наслідків для працездатності відповідальних вузлів автомобільної техніки.

Фундаментальним основам теорії ФП та методикам теоретичних підходів забезпечення працездатності протягом терміну експлуатації машин приділялась увага в працях вітчизняних та зарубіжних науковців в галузі фретинг-зношування, зокрема: Р. Уотерхауз, Г. Томлінсон, Д. Хоупнер, В.В. Шевеля, В.І. Похмурський; подальшу феноменологію фретинг-процесів було розвинуто у фундаментальних працях В.В. Ковалевського, Л.Т. Балацького, Д.М. Гаркунова, Д.Г. Громаковського, Г.М. Філімонова, Г.С. Калди, В.П. Олександренка. Ними визначені основні напрямки й отримані результати у розумінні явища фретингу з точки зору матеріалознавства, методів обробки поверхонь, втоми, механохімічних реакцій, реології. Подальший розвиток механіки вібраційного тертя та малоамплітудного фретингу отримано у роботах Д. Хілла, К. Джонсона, С.Г. Костоґриза, Ю.І. Шалапка. На основі визнаних механізмів зношування та закономірностей тертя, які окреслили у своїх роботах Б.І. Костецький, І.В. Крагельський, М.О. Буше, Ф. Боуден, Д. Тейбор, Е. Рабінович, А.В. Верховський, Л.І. Бершадський, Р.Г. Мнацаканов, Я.М. Гладкий, отримали подальший розвиток фізико-механічні передумови руйнування контакту в результаті фрикційної взаємодії. Поряд із розв'язанням адгезійної теорії необхідно відмітити важливу роль енергетичних уявлень в моделюванні природи трибологічних процесів. Дослідження структурно-енергетичних особливостей проводились в роботах А.Я. Алябєва, Н.Л. Голєго, В.С. Іванової, Б.І. Костецького, В.В. Шевелі.

Виконано аналіз опублікованих у науково-технічній літературі результатів експериментальних досліджень ряду дослідників щодо методів захисту від ФК та встановлено перспективний напрям – розділення номінально-нерухомих контактуючих поверхонь легкоплавкими сплавами.

У результаті аналізу попередніх досліджень була поставлена науково-технічна задача: підвищення зносостійкості трибосистем номінально-нерухомих з'єднань в умовах малоамплітудного фретингу із застосуванням легкоплавких сплавів.

У другому розділі представлена експериментальна база для виконання поставлених автором завдань наукової роботи. Застосовано аналого-цифровий комплекс для автоматичного запису сигналів від тензодатчиків та датчиків мікропереміщень, їх математичної обробки. Таким переносним комплексом була оснащена установка для дослідження на фретинг-зношування (ФЗ) для

дослідження часткового проковзування. Для моделювання впливу оточуючого середовища при взаємодії поверхонь високонавантажених деталей машин, які знаходяться в номінально нерухомому контакті, застосовано оригінальну установку для дослідження ФК в умовах нормального вібраційного навантаження. Для високоточного аналізу елементного складу речовин застосовано портативний рентгено-флуоресцентний спектрометр «Elva». Визначення фрактографічних характеристик контактних поверхонь були проведені на металографічному мікроскопі МИМ-10 та цифровому порівняльному мікроскопі «Leica». Оцінка мікрокомпонентного складу водяного середовища проводилась за допомогою газового хроматографа «Кристал-2000М».

У третьому розділі розглядаються процеси фретинг-корозії з точки зору фізико-хімічної механіки матеріалів. На базі відомих механізмів та стадій фретингу представлено еволюційну модель, яка охоплює зміни у контакті – як природного руху механічної системи до збільшення ентропії.

Енергетичні зміни. Поглинання енергії E , необхідної для руйнування одиниці об'єма, складається з трьох частин: енергії пружної деформації E_e , енергії пластичної деформації E_c та енергії, яка необхідна для руху тріщини E_f .

При малоамплітудному фретинг-процесі, у випадку номінально нерухомого механічного контакту, складові E_e та E_f дуже малі в порівнянні з E_c , тому можна припустити, що $E \cong E_c$ та виразити енергію пластичної деформації у вигляді:

$$E_c = \int_0^{L_0} \frac{P \cdot dl}{V} = \int_0^{\varepsilon_{max}} \sigma \cdot d\varepsilon + \alpha(N), \quad (1)$$

де V – локальний об'єм руйнування, виділений по поперечному перерізу в зоні руйнування; L_0 – розмір зони з граничною густиною енергії деформації; P – навантаження; σ – напруження пластичної деформації; ε_{max} – гранична деформація; $\alpha(N)$ – функція, яка виражає динаміку фактичних параметрів навантаження при фретинг-процесі від числа мікропереміщень.

В поверхневих шарах перебігають незворотні процеси зміни початкового стану поверхні, які включають приріст густини дислокацій, структурні деформації, зміни параметрів кристалічної ґратки, утворення дисперсних фаз. Робота, витрачена на виконання вказаних змін, приводить до збільшення запасу внутрішньої енергії поверхневих шарів металу. Енергія деформації являє собою енергію, що міститься в дислокаціях E_p , точкових дефектах E_{m0} , залишкових напруг E_{zn} , а також енергію структурних перетворень E_{cn} та виділення нових фаз $E_{нф}$:

$$E_c = E_p + E_{m0} + E_{zn} + E_{cn} + E_{нф}. \quad (2)$$

Величина енергії, яка витрачається на збільшення густини дислокацій в даному об'ємі, може бути визначена по різниці густини дислокацій до та після тертя:

$$E_p = \Delta p \cdot E_p' \cdot V_p, \quad (3)$$

де Δp – прирост густини дислокацій в робочому об'ємі металу після тертя; E_p' – енергія одиничної дислокації; V_p – об'єм поверхневого шару, в якому відбувається збільшення густини дислокацій; $\Delta p = \int_0^{l_p} f(l_p) dl_p$;

$f(l_p)$ – характер розподілу додаткової густини дислокацій; l_p – глибина робочого шару

Наявність дислокацій в кристалі веде до появи деформацій, напружень, а також до збільшення запасу пружної енергії. Пружна енергія одиничної дислокації на одиницю довжини визначається відповідно до співвідношення:

$$E_p = \frac{\ln\left(\frac{r_1 - l_{\text{я}}}{r_0}\right) G \cdot b^2}{4\pi(1-\mu)}, \quad (4)$$

де G – модуль зсуву; b – вектор Бюргерса; μ – коефіцієнт Пуасона; r_0, r_1 – зовнішній та внутрішній радіуси силового поля одиничної дислокації; $l_{\text{я}}$ – енергія ядра дислокації.

У результаті отримаємо запас пружної енергії в робочому шарі (зміцнення):

$$E_p = \frac{G \cdot b^2}{4\pi(1-\mu)} \ln\left(\frac{r_1 - l_{\text{я}}}{r_0}\right) \cdot V_p \cdot \int_0^{l_p} f(l_p) dl_p. \quad (5)$$

Особливості розвитку трибохімічних процесів. Запропоновано аналітичну залежність опису кінетики проходження трибохімічних реакцій на поверхнях контактуючих тіл. Всі трибохімічні реакції відбуваються на активних, збуджених центрах:



де A – неактивні центри; A' – активні центри; E – поверхнева енергія; E' – додатково ініційована поверхнева енергія від ФП.

Для визначення швидкості зміни числа активних центрів маємо рівняння:

$$\frac{d\left(\frac{N_A^*}{N_0}\right)}{dt} = WN_0 - (W + W')N_A^* = W - (W + W')\frac{N_A^*}{N_0}, \quad (7)$$

де N_A^* – кількість активних центрів; N_A – кількість неактивних центрів;

N_0 – загальна кількість центрів; t – час зміни числа активних центрів.

Якщо активність поверхні Φ визначити як $\frac{N_A^*}{N_0}$, то отримаємо:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + (E + E')\Phi = E. \quad (8)$$

Врахувавши, що часовий зв'язок зміни поверхневої енергії E та активної поверхневої енергії E' пропорційний потенціальному бар'єрам для утворення та розпаду активних центрів, отримаємо:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t^*} + Z_1(t^*)\Phi = Z_2(t^*), \quad (9)$$

де Z_1 – потенціальний бар'єр утворення активних центрів; Z_2 – потенціальний бар'єр розпаду активних центрів; t^* – час спаду енергії.

Провівши заміни та перетворення, отримаємо наступне рівняння:

$$T \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \Phi = k \cdot \mu. \quad (10)$$

де T – постійна часу; k – коефіцієнт передачі; μ – характеристика змін вхідних величин.

Розв'язок рівняння (10) дає залежність активності від часу:

$$\Phi(t) = k \cdot [1 - e^{-\frac{t}{T}}], \quad (11)$$

На рис. 1 показаний приклад побудови залежності активності фрикційного контакту від часу для сталі 45 на підставі експериментального визначеного періоду активності $T = (0,3 \div 0,32) \cdot 10^6$ циклів (2,8-3 години).

При взаємодії твердого тіла з робочим середовищем основну роль відіграють ті його властивості, які створюють умови вступу в реакцію з поверхнею металу радикалів газів та активних складових водного середовища (рис.2). В залежності від активності поверхні металу проходять дифузійні процеси, які забезпечують проникнення активних складових середовища в поверхню металу.

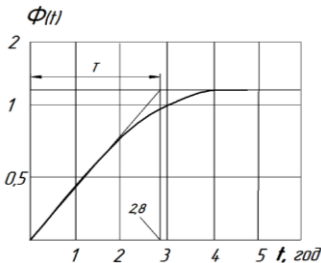


Рис.1. Графік зміни активності поверхні контактуючих тіл за часом

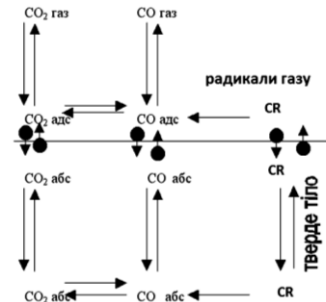


Рис. 2. Трибокінетична модель

Трибохімія впливу газового середовища. В роботі досліджувався вплив хімічної активності газового середовища повітря O_2 , CO_2 на фретинг-корозію армко-заліза і сталі 45 нормалізованої, які відрізняються механічними властивостями та схильністю до адгезії і корозії (рис. 3).

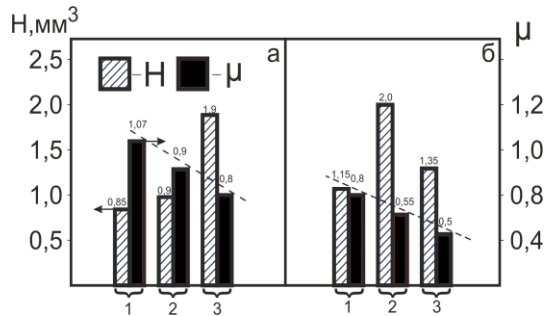


Рис.3. Гістограми об'ємного фретинг-зношування (H) і коефіцієнта тертя (μ) при випробуванні армко-заліза (а) і сталі 45 (б) в різних газових середовищах: 1 - повітря; 2 - кисень; 3 - вуглекислий газ ($P = 60$ МПа; $A = 50$ мкм; $N = 25 \cdot 10^4$ циклів; $f = 25$ Гц)

Перехід від повітряного середовища до кисню супроводжується підвищенням зношування обох матеріалів при зниженні коефіцієнту тертя. Найбільший вплив кисню спостерігається на сталі, найбільше зношування при відносно низькому коефіцієнті тертя. З точки зору окислювально-абразивної теорії фретинг-корозії повинно бути навпаки. Для хімічно-активної сталі 45, на відміну від армко-заліза, вплив окислювальної спроможності газового середовища є домінуючим. Це може бути наслідком того, що крім хімічної корозії в умовах фретингу набуває розвитку корозія електрохімічна, внаслідок насичення окислів адсорбованими вологою та киснем повітря. Беручи до уваги нейтральність середовища, процес повинен проходити з кисневою деполяризацією при катодному контролі. При наявності у сталі катодних домішок (цементиту) підвищення в зоні тертя концентрації катодного деполяризатора (кисню) активізує корозійно-механічне зношування.

В середовищі вуглекислого газу (який гальмує окислювальні процеси), навпаки, зношування і коефіцієнт тертя армко-заліза значно перевищують подібні показники для сталі. Аномально високе зношування армко-заліза і підвищений знос сталі в CO_2 , при мінімальних значеннях коефіцієнта тертя, пов'язано з утворенням в зоні тертя радикальних форм хемосорбції (карбонилів і гідрокарбонатів), які мають підвищену схильність до гідратації. Це, з одного боку, сприяє виведенню продуктів фретингу з контактної зони, що знижує коефіцієнт тертя, а з іншого – трибохімічні реакції призводять до підвищеного руйнування фрикційного контакту.

Вплив водного середовища. Спряження контактуючих поверхонь вузлів транспортних засобів знаходяться під дією значних знакозмінних

навантажень, що призводить з часом до виникнення мікрозазорів, у які просочується оточуюче середовище – вода.

Проведено експериментальні дослідження змін властивостей та енергетичного стану води, яка піддавалася впливу вібраційних коливань із виникненням трибохімічних і вібраційних процесів. Встановлено, що зменшується коефіцієнт поверхневого натягу рідини і збільшується водневий показник рН від 6,7 до значення 8,5 одиниць (рис.4).

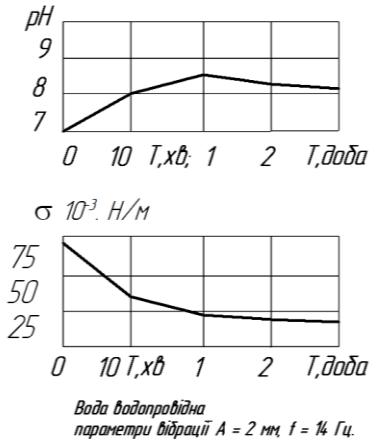
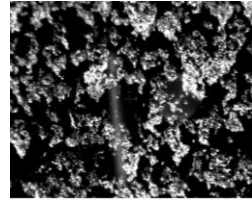
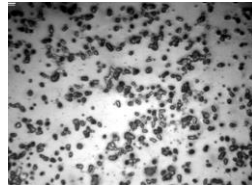


Рис. 4. Зміна показників води: рН, σ з часом оброблення вібрацією



a



б

Рис. 5. Структура кристалів осаду води: *a* – без обробки; *б* – оброблена вібрацією, збільшення у 250 разів

На цій стадії, коли здійснюється дія вібраційних коливань, на хід процесу можуть впливати практично тільки хімічно активні гази – O_2 і H_2 , але вібраційні коливання створюють гемолітичний розрив ковалентних зв'язків у молекулі води та утворення радикальних частинок H^+ , OH^- , які мають підвищену окислювальну здатність. Іон H^+ має високу рухливість і може швидко виходити шляхом дифузії з потоку, при цьому значна частина їх залишається у потоці, OH^- накопичується, що приводить до зростання водневого показника рН. Радикал OH^- утворюється головним чином за реакцією:



Зростання водневого показника рН за період обробки, спричинене розриванням водневих зв'язків у молекулах, але з часом цей показник стабілізується на рівні 8,2 рН.

Зміна структури кристалів осаду краплі води, обробленої протягом 10 хвилин вібраційними коливаннями, представлена на рис.5.

Як видно, на різних ділянках осаду спостерігається рівномірний розподіл і врівноважена форма кристалів в порівнянні зі структурою

кристалів осаду краплі води, яка не піддавалась вібраційному впливу (рис.5,*a*). Такий вигляд кристалів осаду пояснюється отриманим низьким коефіцієнтом поверхневого натягу та розривом водневих зв'язків.

Термодинаміка фретинг-корозії. Розгляд різних за своєю природою фізико-хімічних процесів, які спільно протікають, можна проводити з єдиних енергетичних позицій в рамках термодинаміки незворотних процесів, у якій розглядаються зв'язок між причинами (силами), що викликають незворотні явища A_k і потоками (швидкостями) відповідних процесів I_i . В першому наближенні розсіювання енергії в умовах фретингу визначають чотири основних процеси: пластична деформація, хімічна корозія (окислення), електрохімічна корозія і утворення нових вільних поверхонь при розвитку явищ поверхневого руйнування. Вказані процеси можна описати відповідними функціями.

Сумарна дисипативна функція має вигляд:

$$\Psi = \Psi_d + \Psi_c + \Psi_e + \Psi_s = I_d \cdot A_d + I_c \cdot A_c + I_e \cdot A_e + I_s \cdot A_s, \quad (12)$$

де I_d – потік розмноження і накопичення дислокацій (швидкість накопичення дефектів при пластичній деформації); $A_d = \frac{E_p}{a}$ – питома енергія

реакції утворення дислокацій; a – число дислокації, що припадає на одиницю деформації; I_c – потік (швидкість) хімічної реакції окислення; I_e – сила струму електрохімічної корозії; $A_e = \eta$ – перенапряга анодної реакції; I_s – швидкість утворення (потік) нових вільних поверхонь; $A_s = \Delta\sigma$ – приріст питомої поверхневої енергії при утворенні нових вільних поверхонь.

На підставі лінійного закону та з урахуванням співвідношення взаємності Онзагера ($C_{ik} = C_{ki}$), отримаємо систему феноменологічних рівнянь:

$$I_d = C_1 A_d + C_2 A_c + C_3 \eta + C_4 \Delta\sigma. \quad (13)$$

$$I_c = C_2 A_d + C_5 A_c + C_6 \eta + C_7 \Delta\sigma. \quad (14)$$

$$I_e = C_3 A_d + C_6 A_c + C_8 \eta + C_9 \Delta\sigma. \quad (15)$$

$$I_s = C_4 A_d + C_7 A_c + C_9 \eta + C_{10} \Delta\sigma. \quad (16)$$

де C_1 - C_{10} – феноменологічні (кінетичні) коефіцієнти.

Рівняння (13-16) дають можливість проаналізувати взаємний вплив (перехресний зв'язок) узагальнених на різних стадіях розвитку фретинг-зношування.

Так, на першій стадії фретинг-корозії взаємний вплив процесів поверхневої деформації (I_d) і процесів виникнення нових вільних поверхонь (I_s) при початковому адгезійному зношуванні впливає з рівнянь (13-16) при A_c , $\eta = 0$:

$$I_s = \left(\frac{C_1 \cdot C_{10} - C_4^2}{C_1} \right) \Delta\sigma + \frac{C_4}{C_1} I_d; \quad (17)$$

$$I_d = \left(\frac{C_1 \cdot C_{10} - C_4^2}{C_{10}} \right) A_d + \frac{C_4}{C_{10}} I_s, \quad (18)$$

де $\frac{C_4}{C_1}; \frac{C_4}{C_{10}}$ – коефіцієнти взаємного впливу: потоку дислокацій (I_d) на швидкість виникнення нових вільних поверхонь (I_s) і, навпаки – вплив (I_s) на (I_d).

На другій стадії фретинг-корозії, процес накопичення в зоні тертя оксидів, з урахуванням виникнення нових вільних поверхонь, характеризують рівняння (12); (16), з яких отримано зв'язки між відповідними потоками при $A_d, \eta = 0$:

$$I_c = \left(\frac{C_5 \cdot C_{10} - C_7^2}{C_{10}} \right) A_c + \frac{C_7}{C_{10}} I_s; \quad (19)$$

$$I_s = \left(\frac{C_5 \cdot C_{10} - C_7^2}{C_5} \right) \Delta\sigma + \frac{C_7}{C_5} I_c, \quad (20)$$

де $\frac{C_7}{C_{10}}$ – коефіцієнт приросту швидкості реакцій окислення від збільшення потоку нових вільних поверхонь, I_s ; $\frac{C_7}{C_5}$ – коефіцієнт приросту потоку вільних поверхонь I_s за рахунок збільшення швидкості хімічної корозії.

На третій стадії фретинг-корозії, пару перехресних явищ, що описує зв'язок інтенсивності електрохімічної корозії (анодного струму I_e) зі швидкістю виникнення нових вільних поверхонь I_s , пов'язаних з процесами руйнування, можна отримати з рівнянь (15) і (16) при $A_d, A_c = 0$:

$$I_e = \left(\frac{C_{10} \cdot C_8 - C_9^2}{C_{10}} \right) \eta + \frac{C_9}{C_{10}} I_s; \quad (21)$$

$$I_s = \left(\frac{C_{10} \cdot C_8 - C_9^2}{C_8} \right) \Delta\sigma + \frac{C_9}{C_8} I_e, \quad (22)$$

де $\frac{C_9}{C_{10}}$ – коефіцієнт активізації електрохімічної корозії внаслідок приросту нових вільних поверхонь; $\frac{C_9}{C_8}$ – коефіцієнт приросту вільних поверхонь (інтенсивності руйнування контакту) за рахунок активізації електрохімічної корозії.

У четвертому розділі наведено дослідження механізмів фретинг-зношування конструктивних матеріалів та способу захисного модифікування поверхонь.

Окислювальні і адсорбційно-електрохімічні процеси. Загальна кореляція між характеристиками макроскопічної міцності металів і фретингостійкістю, як правило, відсутня – зокрема внаслідок розвитку корозійних процесів, природа яких при фретинг-корозії металів до кінця не вивчена. Досліджувався вплив природи контактуючих матеріалів на інтенсивність фретинг-корозії на прикладі ряду сталей і сплавів з різними фізико-хімічними властивостями. Крім того, вивчалась фретингостійкість ряду електролітичних покриттів (Zn,Cd,Sn,Pb) у зв'язку зі значеннями їх стандартних електродних потенціалів. Рухомим контртілом слугувала сталь 45, термооброблена на твердість HV=600. На рис.6 величини фретинг-зношування досліджуваних матеріалів розміщені в електрохімічний ряд за значеннями електродного потенціалу: чим більше позитивний електричний потенціал досліджуваного сплаву по відношенню до сталі 45, тим менше його фретинг-зношування. Одочасно із зростанням ступеня благородності сплаву підвищувалося фретинг-зношування контртіла – сталі 45.

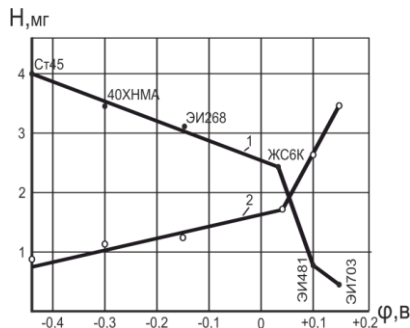


Рис. 6. Залежність фретинг-зношування сталей та сплавів від їх електродного потенціалу (крива 1) в контакт з сталлю 45, відповідні значення зношування якої характеризує крива 2: $P = 10\text{МПа}$; $A = 50\text{ мкм}$; $N = 5 \cdot 10^5$ циклів; $f = 30\text{ Гц}$

Аналогічні закономірності встановлені і при дослідженні електролітичних покриттів, вказуючи на розвиток в умовах фретингу металів контактної корозії по електрохімічному механізму, який в певний час накладається на корозію хімічну (окислення). Цьому сприяє накопичення в зоні тертя високодисперсних оксидів, здатних активно адсорбувати на своїй поверхні вологу та кисень. Тонко подрібнені продукти фретинг-корозії металів (оксиди) є, як правило, напівпровідниками, здатними, за теорією адсорбції і каталізу, надати корозійним контактним процесам автокаталітичний характер внаслідок хемосорбції кисню і води в радикальних і іон-радикальних (заряджених) формах. Це обумовлює формування в зоні контакту активного середовища, у якому електрохімічні

процеси набувають характер каталітичної корозії.

Виникнення прискорюючого поля при адсорбції кисню в іон-радикальній формі (O_2^- , O^-) зменшує перенапруженість іонізації металу, полегшуючи анодний процес. З іншого боку, радикальні форми адсорбованої води (H^+ , OH^-) прискорюють катодний процес.

Вочевидь, найбільший опір фретинг-зношуванню сталей ЭИ481 і ЭИ703 (рис.6) обумовлено високим вмістом хрому і нікелю, які знижують критичну густину струму анодної поляризації.

Механіка контактної взаємодії. Складні динамічні явища у трибосистемі не дають точного значення амплітуди ковзання за звичайним методом вимірювання. Вібродіагностика робочого стану номінально-фіксованих з'єднань базується на аналізі вібрації, а головним показником робочого стану обладнання є інтенсивність і характер фретинг-процесів.

Вивчення механіки контактної взаємодії показує еволюцію квазістатичного тертя в межах номінального прилипання. Більшість віброактивності спостерігається у початковому моменті коливань і при переході від попереднього зміщення до проковзування. Діаграма сканування поверхні визначає кількісну картину еволюції сили тертя на стадії номінального прилипання і при переході до ковзання (рис.7). В режимі повного попереднього переміщення спостерігаються коливання сили тертя. У мить, яка передує початковому ковзанню, сила тертя стає нестабільною завдяки силам пружності та інерції (рис.8).

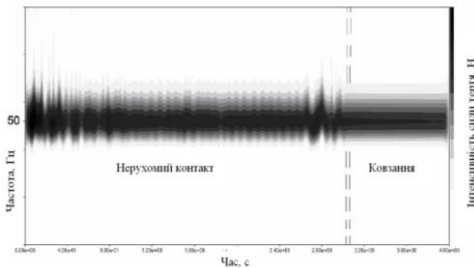


Рис. 7. Зміна сили тертя при переході контакту від прилипання до ковзання до всієї площини контакту, $f = 50$ Гц

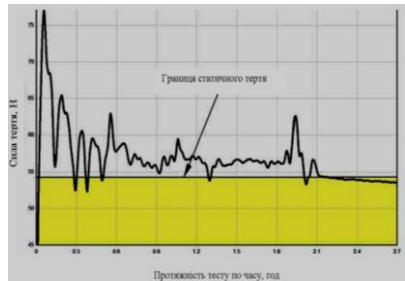


Рис.8. Еволюція сили тертя за часом

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано модель фретинг-процесу з урахуванням зовнішнього рідинного середовища, яка представлена на рис.9 та описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} = c(x - y) + F \\ M \cdot \ddot{y} = c(x - y) + ky' \end{cases} \quad (23)$$

де m – маса еластичного елемента, як опис тангенціальної жорсткості зовнішнього шару і третього тіла ($M \gg m$); C – пружність еластичного елемента; F – сила тертя; M – маса третього тіла; k – коефіцієнт демпфірування рідинного середовища; x, y – переміщення тіл; \dot{y} – швидкість переміщення тіла; \ddot{x}, \ddot{y} – прискорення переміщень тіл.

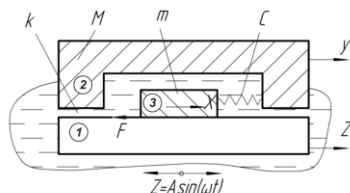


Рис. 9. Динамічна модель з трьох тіл занурених у рідину: 1 – робить коливальний рух по специфічному закону; 2 – контртіло; 3 – еластичний елемент з масою m , як опис тангенціальної жорсткості рідини

Розв'язання системи рівнянь (23) відносно сили тертя дає можливість отримати її залежність від частоти та амплітуди коливань, з урахуванням можливостей використання проміжного пружньо-в'язкого середовища, наприклад, легкоплавкого сплаву.

Захисне покриття від фретинг-корозії. З позиції динаміки вібраційного контакту і фізичної хімії обґрунтовано застосування сплаву Bi-Sn-Pb-Cd для зменшення інтенсивності фретинг-пошкоджень.

При введенні в зону тертя вищевказаного сплаву, крім взаємодії між твердою і газовою фазами проходять твердофазні реакції. Специфіка твердофазних реакцій полягає в тому, що прямий контакт реагуючих частинок можливий лише в початковий момент часу, після чого утворюється шар продукту, який розділяє реагенти і подальша взаємодія лімітується масопереносом атомів чи іонів через шар утвореного продукту.

Масоперенос відбувається шляхом об'ємної дифузії, або за рахунок дифузії вздовж границь зерен. Так як дифузійна рухомість частинок залежить від дефектності структури, можна чекати суттєвого впливу дефектів на механізм кінетики твердофазних реакцій.

Реакція відбувається за рахунок дифузії іонів заліза та легкоплавкого сплаву. Отже, введення легкоплавкого сплаву зменшує дефектність твердого тіла, що в свою чергу пригнічує реакції окислення поверхні. Зміна умов твердофазних процесів дозволяє впливати на їх інтенсивність.

В результаті вивчення поверхні зразків встановлено, що взаємодія між композитом Bi-Sn-Pb-Cd і матрицею проходить по адгезійному механізму.

У п'ятому розділі наведені дослідження умов перебігу трибохімічних реакцій та трибологічних параметрів при фретинг-зношуванні поверхонь зразків, розділених сплавом Bi-Sn-Pb-Cd. Наведено приклад реалізації технології нанесення легкоплавких сплавів з описом конструкції відповідного пристрою.

На рис.10, *а* представлені результати пошкодження поверхні зразка при фретингу на повітрі, а на рис.10,*б* пошкодження поверхні зразка при фретингу на повітрі з розділенням поверхонь легкоплавким сплавом.

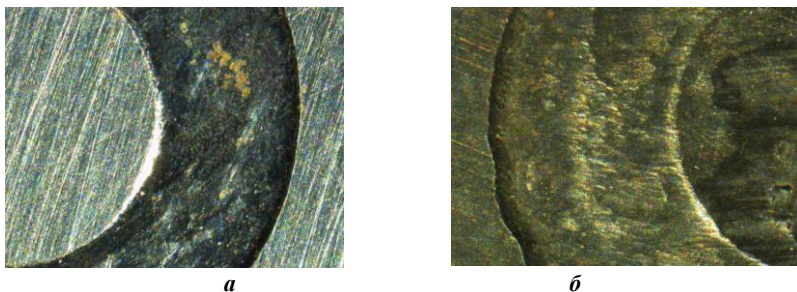


Рис. 10. Фотографії пошкоджень поверхні сталі 45 внаслідок фретингу після $0,7 \times 10^6$ циклів: *а* – без покриття; *б* – з покриттям легкоплавким сплавом

Трибологічні параметри при фретинг-зношуванні поверхонь зразків, розділених сплавом *Bi-Sn-Pb-Cd*. Встановлено, що введення легкоплавкого сплаву значно зменшує механічну дію при фретинг-зношуванні. Це дає невелику величину коефіцієнта тертя f , який встановлюється після припрацювання (рис.11), та значно зменшує (в 3 рази) інтенсивність зношування сталі 45, при наявності в зоні тертя легкоплавкого сплаву (рис.12).

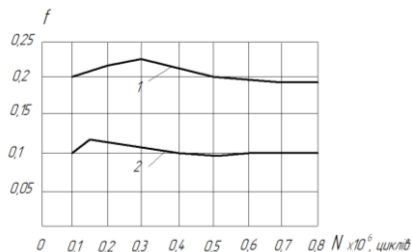


Рис.11. Зміна коефіцієнту тертя при фретингу для сталі 45 при $P = 30 \text{ МПа}$, $A = 30 \text{ мкм}$, $f = 30 \text{ Гц}$: 1 – без легкоплавкого сплаву 2 – з легкоплавким сплавом

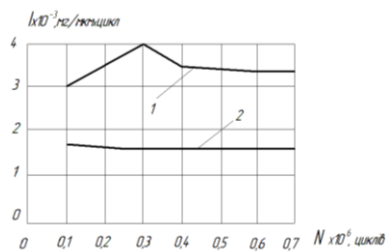


Рис.12. Інтенсивність зношування сталі 45 при $P = 30 \text{ МПа}$, $A = 30 \text{ мкм}$, $f = 30 \text{ Гц}$: 1 – без легкоплавкого сплаву 2 – з легкоплавким сплавом

Зміни елементного складу поверхонь, покритих *Bi-Pb-Sn-Cd*, та складу продуктів зношування. Проведено дослідження (рис.13) з визначення зміни відносного елементного складу поверхні досліджуваного зразка до фретингу та після фретингу, а також відносного складу продуктів зношування, які утворюються внаслідок руйнування поверхні твердого тіла при фретингу.

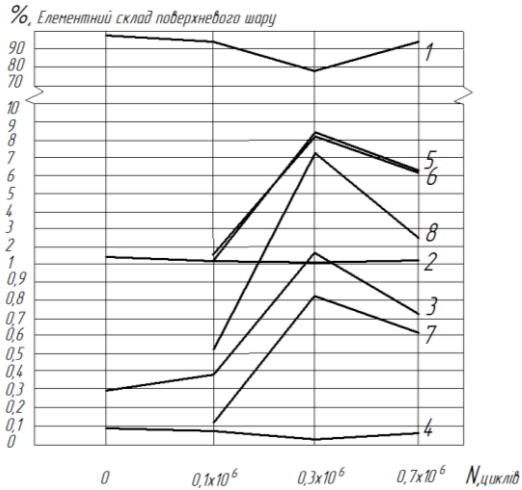


Рис. 13. Графік відносної зміни елементного складу поверхневого шару сталі 45 при фретингу з покриттям із легкоплавкого сплаву при $P = 30 \text{ МПа}$, $A = 30 \text{ мкм}$, $f = 30 \text{ Гц}$: 1 – Fe; 2 – Mn; 3 – Si; 4 – Cr; 5 – Bi; 6 – Pb; 7 – Sn; 8 – Cd

Вплив агресивного зовнішнього середовища на інтенсивність фретинг-корозії. Встановлено, що додатковий оксидний шар формується у водяній суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів. Оксидна плівка на поверхні твердого тіла утворюється внаслідок дифузії активних частинок газу та присутністю у воді радикальних частинок H^+ , OH^- , які мають підвищену окислювальну здатність, що прискорюють ФП та сприяють руйнуванню поверхні металу. Кисень (O_2) як вільний, так і розчинений у рідинах, і той що перебуває у зв'язаному стані в молекулах води (H_2O), витрачається на окисні процеси, продуктом яких є як газоподібні речовини CO і CO_2 , так і тверді плівки хімічних сполук – оксиди (гідроксиди) металів, інтенсивність утворення яких у ході контактної взаємодії впливає на зношування сполучених поверхонь. У вуглеводневих середовищах, також як і у водних розчинах, виділення водню пов'язане з переважним розкладанням наявних у них молекул води, а утворення вуглецьмістких газів CO_2 , CO , CH_4 - із знекарбуванням контактуючих поверхонь. Схема процесу має наступну послідовність (рис.14).

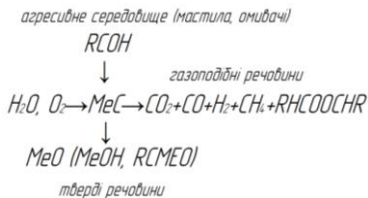


Рис. 14. Схема механовзаємодії зовнішнього середовища

Методом рентгенофлуоресційного аналізу встановлено, що концентрація заліза у середовищі змінюється пропорційно від часу перебігу фретингу ($0,1 \times 10^6$, $0,3 \times 10^6$ та $0,7 \times 10^6$ циклів), результати представлені на графіку (рис.15). Введення легкоплавких сплавів на основі Bi-Sn-Pb-Cd запобігає руйнуванню поверхні металів внаслідок зменшення корозійної активності поверхні твердого тіла і зменшення активуючого фактора агресивного оточуючого середовища у 2-3 рази (рис. 16).

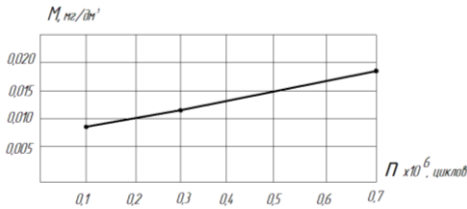


Рис. 15. Концентрація заліза у водно-органічних розчинах, як продукт зношування

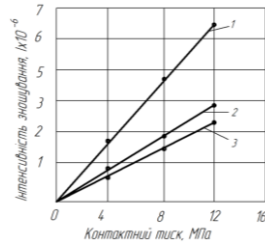


Рис. 16. Залежність інтенсивності зношування зразка з сталі 45 від контактного тиску при $N = 0,7 \times 10^6$: 1 – фретинг на повітрі без покриття; 2 – фретинг з покриттям у водному середовищі; 3 – фретинг на повітрі з покриттям

Методика та обладнання для нанесення легкоплавких сплавів Bi-Sn-Pb-Cd на контактні поверхні. Для уповільнення процесу ФК запропоновано застосовувати технологію та пристрій (рис.17) для нанесення захисного легкоплавкого сплаву на різьбову поверхню контактуючих деталей у вигляді пасти на основі Bi-Sn-Pb-Cd з припоєм із подальшим його розплавленням лазерним променем ($T_{\text{плавл.}} = 68,5^0 - 75^0 \text{ C}$).

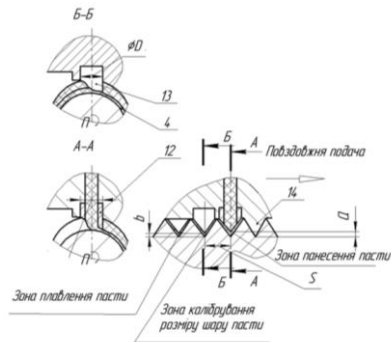
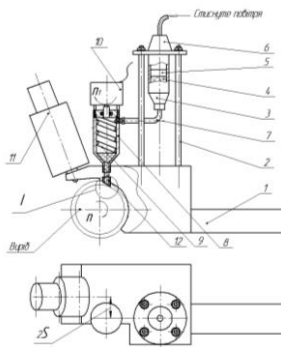


Рис.17. Конструкція пристрою для нанесення на різьбову поверхню легкоплавкого сплаву: 1 – оправка; 2 – стійка; 3 – система подачі; 4 – паста-припой; 5 – поршень; 6 – редуктор тиску; 7 – трубка; 8 – дозатор; 9 – шнек; 10 – редуктор; 11 – лазерна головка; 12 – сопло; 13 – різьбовий елемент; 14 – копіювальний різьбовий елемент

Результат роботи пристрою полягає в отриманні стабільного за розмірами захисного покриття контактуючих поверхонь для забезпечення уповільнення процесу фретинг-корозії у стикку поверхонь деталей.

Запропонована технологія та технічне рішення забезпечує можливість отримати стабільне за розмірами захисне покриття контактуючих поверхонь для забезпечення уповільнення процесу фретинг-корозії у стикку різьбових поверхонь деталей, що зазнають циклічних навантажень.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана науково-технічна задача підвищення зносостійкості трибосистем номінально-нерухомих з'єднань в умовах малоамплітудного фретингу із введенням в зону контакту легкоплавких сплавів. На основі проведених досліджень зроблені наступні висновки:

1. Виконано аналіз фретинг-пошкоджень, що відбуваються на контактуючих поверхнях відповідальних конструктивних з'єднань транспортних засобів. Виявлено, що діапазон збурення амплітуд та частот коливань вузлів зазначених засобів при різних швидкостях руху лежать у наступних межах: амплітуда коливань від 1 до 200 мм; частота від 1 до 60 Гц. Це призводить до виникнення у номінально-нерухомих з'єднаннях коливань з амплітудами від 10 до 70 мкм.

2. Дослідження фретинг-корозії металів в газових середовищах з різною окиснювальною здатністю показали загальну тенденцію до зниження коефіцієнта тертя при одночасному збільшенні зношування, що пов'язано з корозійною активністю матеріалів та їх схильністю до адгезії. Гідратація високодисперсних окислів (або карбонатів) в зоні фретингу з одночасним їх насиченням адсорбованим киснем, з одного боку, сприяє зниженню коефіцієнта тертя, а з іншого – створює умови для руйнування спряжень в умовах як хімічної, так і електрохімічної корозії по механізму поверхневої корозійної втоми.

3. Експериментально підтверджена адсорбційно-електрохімічна концепція розвитку фретинг-корозії в інкубаційний (латентний) період, коли виникають умови для формування в зоні контакту електрохімічно-активного середовища, яке сприяє корозійно-втомному руйнуванню спряжених поверхонь. Високодисперсні продукти фретинг-корозії (оксиди) спроможні надати корозійним контактуючим явищам автокаталітичний характер, який проявляється в прискоренні процесів хемосорбції кисню і вологи в реакційно-здатних радикальних і іон-радикальних формах. Показана можливість використання традиційних методів попередження електрохімічної корозії і підбору пари тертя для зниження інтенсивності зношування фрикційного контакту в умовах фретингу.

4. На основі принципів нерівноважної термодинаміки (незворотних процесів) запропоновані нові теоретичні уявлення фізико-хімічної механіки фрикційного контакту, що стосується природи і взаємовпливу процесів, які викликають фретинг-корозію металів.

5. Вивчена кінематика переходу від попереднього зміщення до відносного проковзування в умовах вібраційного контакту. Запропонована динамічна модель взаємодії поверхонь контакту з урахуванням пружньо-в'язких властивостей рідинного середовища.

6. Експериментально показано, що перспективним напрямком попереджень фретинг-пошкоджень у номінально-нерухомих з'єднаннях деталей машин є застосування покриття Bi-Pb-Sn-Cd, яке має низький опір текучості і здатне, зменшуючи коефіцієнт тертя, ефективно поглинати певну частину енергії вібрації, внаслідок чого фретингостійкість досліджуваних матеріалів збільшується в 2-3 рази. Основним механізмом утворення захисного покриття є адгезія з подальшою когезією.

7. В процесі фретингу за участю запропонованого покриття змінюється відносний елементний склад взаємодіючих поверхонь. Вже в першій фазі розвитку фретингу ($\sim 0,2 \cdot 10^6$ циклів) внаслідок дифузійних адгезійних процесів поверхні контакту насичуються елементами Bi-Pb-Sn-Cd і в подальшому їх процентний вміст на поверхнях тертя збільшується, блокуючи процеси корозії.

8. Продукти фретинг-корозії, які виділяються з зони тертя, мають складний хімічний склад: утворюються окисли $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3, \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (Fe_3O_4), корозійні продукти $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, частинки сталі і легкоплавкого сплаву, а також окисли $\text{Bi}_2\text{O}_3, \text{SnO}_2, \text{PbO}_2, \text{CdO}$. Концентрація заліза в досліджуваних водних середовищах (водній суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів) змінюється пропорційно часу перебігу фретингу. Окислювальний вплив вказаних середовищ визначається появою іонів H^+ і OH^- та вимиванням частинок оксидного шару з подальшим окисненням контактуючих поверхонь.

9. Запропонована технологія та пристрій для нанесення на різьбову поверхню легкоплавкого сплаву, що забезпечує можливість отримати стабільне за розмірами захисне покриття контактуючих поверхонь. Показана можливість уповільнити процес фретинг-корозії у стикі різьбових поверхонь деталей, що зазнають циклічні навантаження та мають контакт з агресивним оточуючим середовищем.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У закордонних виданнях

1. Hanzyuk A.L., Oleksandrenko V.P. Protection of surface of nominal-real estate details in the conditions of small amplified fretting by Bi-Sn-Pb-Cd bases / East European Scientific Journal. Wshodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (Warszawa, Polska). 2018. – V.1. 9(37) – pp. 28-32. *Здобувачем встановлено характер зміни сили тертя в номінально-нерухомих з'єднаннях на стадії переходу від злипання до ковзання.*

У фахових виданнях

2. Костогрив С.Г. Теоретичні аспекти використання легкоплавких сплавів для пригнічення фретинг-корозії / С.Г. Костогрив, Ю.І. Шалапко, А.Л. Ганзюк // Вісник Технологічного університету Поділля. Технічні науки – 1998. – №4. ч. 2. Спец. випуск. – С. 80-82. *Здобувачем запропоновано аналітичну залежність проходження трибохімічних реакцій з позиції швидкості утворення активних центрів.*

3. Ганзюк А.Л. Фізико-хімічні основи застосування низькоплавких хімічних систем в процесах, які обумовлюють фретинг-корозію / А.Л. Ганзюк // Вісник Технологічного університету Поділля. Технічні науки – 1998. – №4. ч.1. – С. 111-113. *Здобувачем запропоновано метод пригнічення корозії при фретингу.*

4. Ганзюк А.Л. Деформаційна модель трибохімічних процесів при використанні легкоплавкого композиту на основі Bi-Pb-Sn-Cd для боротьби з фретинг-корозією / А.Л. Ганзюк, В.В. Мисліборський // Вісник Технологічного університету Поділля. Технічні науки – 2002. – №4. ч.1. – С. 138-140. *Здобувачем запропоновано трибокінетичну модель взаємодії оточуючого середовища з поверхнею металу та механізм захисної дії легкоплавкого сплаву.*

5. Мисліборський В. Трибохімія фретинг-процесів та механізм їх розвитку з позиції фізичної хімії та хімії твердого тіла / В. Мисліборський, А. Ганзюк // Проблеми трибології. – 2002. – № 2. – С. 95-99. *Здобувачем з позицій хімії твердого тіла та аналізу ізобарно-ізотермічного потенціалу системи визначено умови руйнування поверхні металу та сформульовано напрямки та завдання досліджень.*

6. Зміни елементного складу при використанні легкоплавкого композиту на основі Bi-Pb-Sn-Cd для протидії фретинг-корозії / [С. Костогрив, В. Камбург, А. Ганзюк, В. Мисліборський, В. Нездоровін] // Проблеми трибології. – 2007. – № 3. – С.49-54. *Здобувачем проведено дослідження по визначенню зміни відносного елементного складу поверхні та компонентів легкоплавкого сплаву при ФК.*

7. Мисліборський В.В. Методика і особливості визначення початкової тангенційної жорсткості номінально нерухомого фрикційного контакту / В.В. Мисліборський, А.Л. Ганзюк, С.Г. Костогрив // Вісник Хмельницького нац. університету. Техн. науки. – 2008. – №2. – С.193-196. *Здобувачем проведено аналіз підходів до аналітичного визначення контактної жорсткості.*

8. Шалапко Ю.І. Прихованість фретинг-процесів у з'єднаннях автомобільної техніки та їх вплив на безпеку експлуатації / Ю.І. Шалапко, А.Л. Ганзюк, М.А. Разуваєва // Вісник Хмельницького нац. університету. Техн. науки. – 2010. – №5. – С.165-169. *Здобувачем проведено аналіз умов пошкоджень вузлів автомобільної техніки.*

9. Ганзюк А.Л. Вплив фретинг-процесів на склад водно-спиртових сумішей / А.Л. Ганзюк, В.П. Олександренко, В.П. Нездоровін // Проблеми трибології. – 2017. – №1. – С.12-18. *Здобувачем проведено дослідження структурної зміни металевих поверхонь та складу водно-органічного середовища під впливом ФП.*

10. Ганзюк А.Л. Розвиток основ еволюційної моделі фретинг-корозії з позицій фізичної хімії та хімії твердого тіла із урахуванням факторів зовнішнього впливу / А.Л. Ганзюк, В.П. Олександренко // Вісник Хмельницького нац. університету. Техн. науки. – 2018. – №2. – С. 20-28. *Здобувачем проведено аналіз умов пошкодження вузлів автомобільної техніки, та запропоновано еволюційну модель із урахуванням факторів зовнішнього впливу агресивного середовища.*

Патенти на корисну модель

11. Пат. на корисну модель №38036 України. МПК G01M3/00. Установа для дослідження процесу "напряга - деформація" у механічному контакті з вищою парою для матеріалів та покриттів. / С.Г. Костогриз, В.В. Мисліборський, А.Л. Ганзюк; власник Хмельницький національний університет. – № u 2008 06157; заяв. 12.05.2008; опубл. 25.12.2008, Бюл. №24. – 4 с. *Внесок здобувача полягає у розробленні основної ідеї конструкції установки.*

12. Пат. на корисну модель 119407 України, МПК B23K 26/00. Пристрій для нанесення на різбову поверхню металевих деталей легкоплавкого сплаву / А.Л. Ганзюк, В.П. Олександренко, А.І. Гордєєв; – u201703190; Заяв. 03.04.2017; Опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. – 6 с. *Внесок здобувача полягає у розробленні основної ідеї конструкції установки.*

13. Пат. на корисну модель №128630 України. МПК G01N 21/3577. Спосіб кристалооптичного аналізу структурної будови води та ступеню її активації і забруднення біологічними рештками / А.Л. Ганзюк, В.П. Олександренко, А.І. Гордєєв, Н.О. Костюк; – № u201804393; заяв. 20.04.2018; опубл. 25.09.2018, Бюл. №18. – 10 с. *Внесок здобувача полягає у розробленні основної ідеї реалізації способу.*

Матеріали та тези конференцій

14. Ганзюк А. Фретингостійке покриття металевої поверхні на основі сплаву Ві-Рв-Sn-Cd / А. Ганзюк, С. Костогриз, Т. Бачинський // Львівські хімічні читання - 99 : Матеріали наук.-практ. конф. – Львів : ЛДУ. – 1999. – С.118. *Здобувачем запропоновано для уповільнення фретингу застосування легкоплавких сплавів.*

16. Мисліборський В. Шляхи боротьби з фретингом з позиції хімії твердого тіла / В. Мисліборський, А. Ганзюк, С. Костогриз // Механіка та інформатика: Зб. матеріалів III українсько-польської наук. конф. молодих вчених, 28-30 квіт. 2005 р.– Хмельницький: ХНУ, 2005.– С. 150-153. *Здобувачем проведено аналіз процесів, які проходять у поверхневому шарі при фретингу.*

15. Shalapko Y. Wavelet-analysis for control of contact vibration with friction and fretting-process / Y. Shalapko, A. Hanzjuk, W. Kurskoy// Proceedings 9th Conf. Active noise and vibration control methods, Krakow-Zakopane, Poland, 2009. – P. 305-310. (зб. матеріалів конф.) *Здобувачем запропоновано динамічну модель номінально-нерухомого контакту.*

17. Shalapko Y. Wavelet-analysis for control of contact vibration with friction and fretting-process / Y. Shalapko, A. Hanzjuk, W. Kurskoy // 9th Conf. Active noise and vibration control methods, Krakow-Zakopane, Poland, 2009. – P. 98-99

(зб. тез допов. конф.) *Здобувачем визначено амплітудно-частотні характеристики зміни сили тертя в часі в номінально-нерухомому контакті.*

18. Шалапко, Ю. Фізико-хімічні основи застосування низькоплавких хімічних систем в процесах, які обумовлюють фретинг-корозію / Ю. Шалапко, А. Ганзюк, Н. Радек // IV Українсько-Польські наукові діалоги : міжнар. наук. конф., 11-14 жовт. 2011 р., м. Яремче: тези наук. пр. – Хмельницький: ХНУ, 2011. – С. 161-162. *Здобувачем розглянуто фізико-хімічні основи застосування легкоплавких сплавів для уповільнення фретингу.*

19. Ганзюк А.Л. Зміна складу органічних та водно-органічних середовищ під впливом фретинг-процесів / А.Л. Ганзюк, В.П. Олександренко, В.П. Нездоровін // Materials of the XII International scientific and practical conference Areas of scientific thought. V. 8. Technical science. Construction and architecture. Geography and geology. – Sheffield. – 2017. – С. 36-39. *Здобувачем досліджено зміну складу водно-органічного середовища під впливом ФП.*

20. Ганзюк А.Л. Пристрій для нанесення на різьбову поверхню металевих деталей легкоплавкого сплаву з метою запобігання фретинг-корозії / А.Л. Ганзюк, В.П. Олександренко, А.І. Гордєєв, В.П. Нездоровін // Матеріали XIII Міжнародна научна практична конференція «Новината за напреднали наука – 2017». V. 10. Технически науки. – София. – «БялГРАД-БГ». – 2017. – С.10-13. *Здобувачем запропоновано метод та конструкція пристрою для нанесення легкоплавкого сплаву на різьбові поверхні.*

21. Ганзюк А.Л. Вплив вібраційного навантаження на номінально-нерухомі з'єднання та еволюційна модель фретинг-корозії із впливом зовнішнього середовища / А.Л. Ганзюк, В.П. Олександренко // Вібрації в техніці та технологія : Збірник тез доповідей XVI Міжнародної наук.-техн. конф. – Вінниця. – ВНТУ, 2017. – С.29-31. *Здобувачем запропоновано еволюційну модель фретингу з урахуванням впливу зовнішнього середовища.*

22. Ганзюк А.Л. Дослідження трибологічних параметрів при зношуванні поверхонь зразків розділених сплавами на основі Bi-Sn-Pb-Cd / А.Л. Ганзюк, В.П. Олександренко // Materials of the XIII International scientific and practical Conference Trends of modern science – 2018. V.6. Sheffield. Science and education LTD – 2018. – С.10-13. *Здобувачем проведено дослідження трибологічних параметрів при зношуванні поверхонь зразків розділених сплавами на основі Bi-Sn-Pb-Cd.*

23. Ганзюк А.Л. Механізм захисту контактуючих номінально-нерухомих пар покриттям на основі легкоплавкого сплаву при фретинг-корозії / А.Л. Ганзюк // Materials of the XV International scientific and practical Conference Modern scientific potential-2019. V.14. Technical science. Physics. Chemistry and chemical technology. – Sheffield. – Science and education LTD – 2019. – С. 92-96. *Здобувачем запропоновано схему механовзаємодії легкоплавкого сплаву з поверхнями номінально-нерухомих з'єднань.*

24. Ганзюк А.Л. Аналітична оцінка зміни активності поверхні контактуючих тіл при проходженні трибохімічної реакції для сталі 45 / А.Л. Ганзюк // Materiały XV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Europejska nauka XXI powieka -2019». – Techniczne nauki. V.9. – Przemysł. –

Nauka i studia – 2019. – С.44-47. Здобувачем проведено аналітичне дослідження оцінки активності поверхні контактуючих тіл при проходженні трибохімічної реакції.

АНОТАЦІЯ

Ганзюк А.Л. Підвищення зносостійкості трибосистем в умовах малоамплітудного фретингу із застосуванням легкоплавких сплавів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах. – Хмельницький національний університет. – м. Хмельницький, 2019.

У дисертації вирішена науково-технічна задача підвищення зносостійкості трибосистем номінально-нерухомих з'єднань в умовах малоамплітудного фретингу із застосуванням легкоплавких сплавів з урахуванням оточуючого середовища. Запропоновано аналітичну залежність для визначення величини енергії, яка витрачається на збільшення густини дислокацій в одиничному об'ємі і визначається по різниці густини дислокацій до та після фретингу. На основі принципів нерівноважної термодинаміки (незворотних процесів) запропоновані нові теоретичні уявлення фізико-хімічної механіки фрикційного контакту, що стосується природи і взаємовпливу процесів, які викликають фретинг-корозію металів. Запропоновано модель динамічної поведінки трибосистеми на основі методу математичного моделювання та комп'ютерної симуляції. Експериментально встановлено, що внаслідок фретингу змінюється відносний елементний склад взаємодіючих поверхонь. Експериментально встановлено, що зношування матриці, при введенні в зону контакту легкоплавкого сплаву, починається лише після $0,15 \times 10^6 N$ до $0,3 \times 10^6 N$ циклів, і зносостійкість при фретингу пари тертя матеріалів, що досліджувались збільшується в 2-3 рази. Запропоновано рекомендації по боротьбі із ФП у номінально-нерухомих з'єднаннях деталей машин, технологію і конструкцію обладнання для нанесення легкоплавкого сплаву (Bi-Sn-Pb-Cd) на поверхні номінально-нерухомих з'єднаних деталей машин.

Ключові слова: фретинг, фретинг-корозія, номінально-нерухомий фрикційний контакт, легкоплавкий сплав, моделювання.

ANNOTATION

Hanzhuk A.L. The improvement of the wear resistance of tribosystems in low-amplitude fretting with the use of fusible alloys. – Manuscript.

The dissertation for a scientific degree of a candidate of technical sciences by the specialty 05.02.04 – friction and wear in machines. – Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi, 2019.

The scientific and technical tasks of increase of wearproofness of tribosystems nominally immobile connections in the conditions of littlepeak fretting with application of fusible alloys taking into account an environment are solved in the dissertation. In theory, from positions of physical chemistry of solid,

it is investigated experimentally that an application of soft coverages on the basis of lead, tin, cadmium which have low resistance of fluidity and ability to change the coefficient of friction on contacting surfaces and also can take in certain part of energy of vibration is a perspective direction against FP in nominally immobile connections of details of machines. On the basis of principles of non-equilibrium thermodynamics (irreversible processes) new theoretical presentations of physical and chemical mechanics of friction contact, that touches nature and reciprocally of processes that cause the fretting of metals, are offered. Metallography researches of surfaces of standards, covered with a fusible alloy which consists of Bi-Sn-Pb-Cd have shown that the basic mechanisms of formation of protective surfaces are adhesion with a subsequent cohesion. The evolutionary model of dynamic conduct of tribosystem is offered on the basis of method of mathematical design and computer simulation. Experimentally mode of dynamic clutch-slippage for FP, as the most dangerous from point of maximal friction and oscillation activity in a contact. It is investigated that relative element composition of interactive surfaces changes as a result of fretting. Moreover, it is investigated that the wear of matrix, at introduction to the area of contact of fusible alloy, begins only after $0,15 \times 10^6 N$ to the $0,3 \times 10^6 N$ cycles, and the wearproofness of pair of friction at fretting of the probed materials is increased in 2-3 times. Recommendations against FP in nominally immobile connections of details of machines, method, technology and construction of equipment, for causing of fusible alloy (Bi-Sn-Pb-Cd) on-the-spot nominally immobile the united details of machines are offered.

Key words: fretting, fretting-corrosion, nominally-immobile frictional contact, fusible alloy, modeling.

АННОТАЦИЯ

Ганзюк А.Л. Повышение износостойкости трибосистем в условиях малоамплитудного фреттинга с применением легкоплавких сплавов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 – трение и износ в машинах. – Хмельницкий национальный университет. г. Хмельницкий, 2019.

В диссертации решена научно-техническая задача повышения износостойкости трибосистем номинально-неподвижных соединений в условиях малоамплитудного фреттинга с применением легкоплавких сплавов с учетом окружающей среды, которые эксплуатируются в поле вибрационной нагрузки. Теоретически обосновано и экспериментально установлено, что перспективным направлением в борьбе с ФП в номинально-неподвижных соединениях деталей машин является применение мягких покрытий на основе свинца, олова, кадмия, которые способны изменять коэффициент трения на контактирующих поверхностях, а также могут поглощать определенную часть энергии вибрации. Металлографические исследования поверхностей металлов, разделенных покрытием из легкоплавкого сплава составом Bi-Sn-Pb-Cd показали, что основными механизмами образования защитных поверхностей

является адгезия с последующей когезией. Предложена аналитическая зависимость для определения величины энергии, которая расходуется на увеличение плотности дислокаций в единичном объеме и определяется по разнице плотности дислокаций до и после фреттинга. На основе принципов неравновесной термодинамики (необратимых процессов) предложены новые теоретические представления физико-химической механики фрикционного контакта, которые касаются природы и взаимовлияния процессов, которые вызывают фреттинг металлов. Предложена модель динамического поведения трибосистемы на основе метода математического моделирования и компьютерной симуляции. Изучена кинематика перехода от предварительного смещения к относительному проскальзыванию в условиях вибрационного контакта. Предложенная динамическая модель взаимодействия поверхностей контакта с учетом упруго-вязких свойств жидкостной среды. Экспериментально подтверждена адсорбционно-электрохимическая концепция развития фреттинга в инкубационный (латентный) период, когда возникают условия для формирования в зоне контакта электрохимической активной среды, которая способствует коррозионно-усталостному разрушению сопряженных поверхностей. Высокодисперсные продукты фреттинга (оксиды) способны предоставить коррозионным контактирующим явлениям автокаталитический характер, который проявляется в ускорении процессов хемосорбции кислорода и влаги в реакционноспособных радикальных и ион-радикальных формах. Показана возможность использования традиционных методов предупреждения электрохимической коррозии и подбора пары трения для снижения интенсивности изнашивания фрикционного контакта в условиях фреттинга. Экспериментально определен режим динамического сцепления-проскальзывания для ФП, как самый опасный с точки зрения максимальной концентрации фрикционной и вибрационной активности в контакте. Экспериментально установлено, что вследствие фреттинга меняется относительный элементный состав взаимодействующих поверхностей. Экспериментально установлено, что износ матрицы, при введении в зону контакта легкоплавкого сплава, начинается только после $0,15 \times 10^6 N$ до $0,3 \times 10^6 N$ циклов, и износостойкость пары трения при фреттинге исследуемых материалов увеличивается в 2-3 раза. Экспериментально установлено, что при фреттинге в окружающей среде (водная смесь эстеров, ароматических углеводов, эфиров, одноатомных и многоатомных спиртов), концентрация железа изменяется пропорционально времени течения фреттинга. Предложена технология и конструкция оборудования для нанесения легкоплавкого сплава (Bi-Sn-Pb-Cd) на поверхности номинально-неподвижных соединений деталей машин.

Ключевые слова: фреттинг, фреттинг-коррозия, номинально-неподвижный фрикционный контакт, легкоплавкий сплав, моделирование.