

Хмельницький національний університет
Міністерство освіти та науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГАНЗЮК АНДРІЙ ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 621.891

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах
Галузь знань 13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А.Л. Ганзюк

Науковий керівник: Олександренко Віктор Петрович, доктор технічних
наук, професор

АНОТАЦІЯ

Ганзюк А. Л. Підвищення зносостійкості трибосистем номінально-нерухомих з'єднань 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.

Актуальність дисертаційної роботи визначається підвищенням ресурсу роботи трибосистем, який обмежується передчасним зношуванням чи руйнуванням контактуючих деталей у результаті виникнення та розвитку особливого виду пошкоджень поверхні – фретинг-корозії. Явище фретинг, 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 фретинг-корозія 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, втулки вузла повороту колеса та втулки поршневих пальців, які перебувають в умовах динамічної взаємодії з навколишнім середовищем (активними газами повітря та агресивним водним середовищем).

Аналіз літературних джерел показав, що на сучасному етапі не існує універсальних композиційних матеріалів, здатних рівною мірою успішно застосовуватися за умов ударних навантажень, інтенсивного зношування в агресивних середовищах.

Більші можливості у цьому має вдосконалення технологічних способів застосування покриттів, що мають забезпечувати кращі експлуатаційні показники зносостійкості із одночасною нескладною їх реалізацією, енергоощадністю та іншими вимогами сучасного етапу виробництва машин.

Отже, підвищення зносостійкості трибосистем в умовах малоамплітудного

фретинга за допомогою спеціальних композиційних покриттів на основі легкоплавких сплавів є актуальним науково-технічним завданням.

У дисертації вирішена науково-технічна задача підвищення зносостійкості трибосистем номінально-нерухомих з'єднань в умовах малоамплітудного фретинга із застосуванням легкоплавких сплавів з урахуванням оточуючого середовища.

В ході виконання дисертаційного дослідження розроблено оригінальну установку для моделювання впливу оточуючого середовища при взаємодії поверхонь високонавантажених деталей машин, які знаходяться в номінально нерухомому контакті та дослідження ФК в умовах нормального вібраційного навантаження.

Експериментально виявлено, що перспективним напрямком у боротьбі із фретинг-пошкодженнями у номінально-нерухомих з'єднаннях деталей машин є застосування м'яких покриттів на основі свинцю, олова, кадмію, які мають низький опір текучості і здатні змінювати коефіцієнт тертя на контактуючих поверхнях, а також можуть поглинати певну частину енергії вібрації.

Дослідження фретинг-корозії в різних газових середовищах 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 (карбонатів) з одночасним їх насиченням адсорбованим киснем з одного боку, сприяє зниженню коефіцієнта тертя, а з іншого – створює умови для руйнування спряжень по механізмам хімічної, так і електрохімічної корозії.

Металографічні дослідження поверхонь зразків, розділених покриттям з легкоплавкого сплаву складом Bi-Sn-Pb-Cd показали, що основним механізмом утворення захисних поверхонь є адгезія, що забезпечує:

- створення ефекту екранування поверхні твердого тіла від дії оточуючого середовища, перш за все дифузії у контактуючі поверхні радикалів газів: кисню, водню і вуглекислого газу та водних сумішей;

- зменшення адгезії контактуючих поверхонь тіл завдяки розташуванню

між ними часток легкоплавкого сплаву.

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.

Запропоновано аналітичну залежність опису кінетики проходження другої фази трибохімічної реакції, яка ініціює фретинг-корозію, а також визначено закономірність зміни активності поверхні контактуючих тіл другої фази проходження трибо-хімічної реакції для сталі 45.

Результати вейвлет-аналізу часового перебігу фретинг-процесу показали, що об'єкт досліджень, під час експлуатації, переходить від стану абсолютного (пружного) зчеплення до повного проковзування з амплітудами, які значно перевищують повне попереднє зміщення (повзучість).

Запропоновано еволюційну модель динамічної поведінки трибосистеми на основі методу математичного моделювання та комп'ютерної симуляції. Експериментально встановлено, що внаслідок фретинга змінюється відносний елементний склад взаємодіючих поверхонь.

Експериментально підтверджена адсорбційно-електрохімічна концепція розвитку фретинг-корозії в інкубаційний (латентний) період, коли виникають умови для формування електрохімічного середовища, яке сприяє корозійно-втомному руйнуванню спряжених поверхонь.

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. При фретингу в оточуючому середовищі (водній суміші естерів, ароматичних вуглеводнів, одноатомних та багатоатомних спиртів) концентрація заліза змінюється пропорційно від часу перебігу фретингу.

Запропоновано рекомендації по боротьбі із ФП у номінально-нерухомих з'єднаннях деталей машин, спосіб, технологію і конструкцію обладнання для нанесення легкоплавкого сплаву (Bi-Sn-Pb-Cd) на поверхні номінально-нерухомих з'єднаних деталей машин, що забезпечує можливість отримати

стабільне за розмірами захисне покриття контактуючих поверхонь і уповільнити процес фретинг-корозії у стику різьбових поверхонь деталей, що зазнають циклічні навантаження та контактують з оточуючим середовищем.

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.

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

Практичне значення одержаних результатів.

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 рекомендації по уповільненню процесу фретинг-корозії 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».

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

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані в 24 наукових працях.

У фахових виданнях:

1. Костогриз С. Г., Шалапко Ю. І., Ганзюк А. Л. Теоретичні аспекти використання легкоплавких сплавів для пригнічення фретинг-корозії. *Вісник технологічного університету Поділля*. 1998. № 4. ч. 2. Спец. випуск. С. 80-82.

2. Ганзюк А. Л. Фізико-хімічні основи застосування низькоплавких хімічних систем в процесах, які обумовлюють фретинг-корозію. *Вісник технологічного університету Поділля*. 1998. № 4. ч. 1. С. 111-113.

3. Ганзюк А. Л., Мисліборський В. В. Деформаційна модель трибохімічних процесів при використанні легкоплавкого композиту на основі Bi-Pb-Sn-Cd для боротьби з фретинг-корозією. *Вісник технологічного університету Поділля*. 2002. № 4. ч. 1. С. 138-140.

4. Мисліборський В., Ганзюк А. Трибохімія фретинг-процесів та механізм їх розвитку з позиції фізичної хімії та хімії твердого тіла. *Проблеми трибології*. 2002. № 2. С. 95-99.

5. Костогриз С., Камбург В., Ганзюк А., Мисліборський В., Нездоровін В. Зміни елементного складу при використанні легкоплавкого композиту на основі Bi-Pb-Sn-Cd для протидії фретинг-корозії. *Проблеми трибології*. 2007. № 3. С. 49-54.

6. Мисліборський В. В., Ганзюк А. Л., Костогриз С. Г. Методика і особливості визначення початкової тангенційної жорсткості номінально нерухомого фрикційного контакту. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2008. № 2. С. 193-196.

7. Шалапко Ю. І., Ганзюк А. Л., Разуваєва М. А. Прихованість фретинг-процесів у з'єднаннях автомобільної техніки та їх вплив на безпеку експлуатації. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2010. № 5. С. 165-169.

8. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П., Нездоровін В. П. Вплив фретинг-процесів на склад водно-спиртових сумішей. *Проблеми трибології*. 2017. № 1. С. 12-18.

9. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П. Розвиток основ еволюційної моделі фретинг-корозії з позицій фізичної хімії та хімії твердого тіла із урахуванням факторів зовнішнього впливу. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 2. С. 20-28.

У іноземних періодичних виданнях:

10. Hanzjuk A. L., Oleksandrenko V. P. Protection of surfase 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) p. 28-32.

Патенти:

11. Пат. на корисну модель № 38036 України. МПК G01M3/00. Установа для дослідження процесу «напруга – 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.

12. Пат. на корисну модель № 119407 України, МПК B23K 26/00. Пристрій для нанесення на різьбову поверхню металевих деталей

легкоплавкого сплаву / А. Л. Ганзюк, В. П. Олександренко, А. І. Гордєєв ; и 2017 03190 ; заяв. 03.04.2017; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18.

13. Пат. на корисну модель № 128630 України. МПК G01N 21/79. 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. № и 2018 04393 ; заяв. 20.04.2018; опубл. 25.09.2018, Бюл. № 18.

Матеріали та тези конференцій:

14. Ганзюк А., Костогриз С., Бачинський Т. Фретінгостійке покриття металевої поверхні на основі сплаву Ві-Рв-Sn-Cd. *Львівські хімічні читання - 99* : зб. Матеріалів наук.-практ. конф. Львів, 1999. С. 118.

15. Мисліборський В., Ганзюк А., Костогриз С. Шляхи боротьби з фретингом з позиції хімії твердого тіла. *Механіка та інформатика*: Зб. Матеріалів III українсько-польської наук. конф. молодих вчених, 28-30 квіт. 2005 р. Хмельницький: ХНУ, 2005. С. 150-153.

16. Shalapko Y., Hanzyuk A., Kurskoy W. Wavelet-analysis for control of contact vibration with friction and fretting-process. *9th Conf. Active noise and vibration control methods*. Krakow-Zakopane, Poland. 2009. P. 98–99 (зб. тез конф.).

17. Shalapko Y., Hanzyuk A., Kurskoy W. Wavelet-analysis for control of contact vibration with friction and fretting-process. *Proceedings 9th Conf. Active noise and vibration control methods*. Krakow-Zakopane, Poland, 2009. P. 305-310 (зб. матеріалів конф.)

18. Шалапко Ю., Ганзюк А., Радек Н. Фізико-хімічні основи застосування низькоплавких хімічних систем в процесах, які обумовлюють фретинг-корозію. *IV Українсько-Польські наукові діалоги*: зб. Матеріалів доп. учасн. міжнар. наук. конф., 11-14 жовт. 2011 р., м. Яремче : Хмельницький: ХНУ, 2011. С. 161-162.

19. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П., Нездоровін В. П. Зміна складу органічних та водно-органічних середовищ під впливом фретинг-процесів. *Materials of the XII International scientific and practical conference Areas of scientific thought*. V.8. Technical science. Construction and architecture. Geography and geology. Sheffield. 2016/2017. С. 36-39.

20. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П., Гордєєв А.І., Нездоровін В.П. Пристрій для нанесення на різьбову поверхню металевих деталей легкоплавкого сплаву з метою запобігання фретинг-корозії. *Матеріали XIII Міжнар. наук.-практичної конференції «Новината за напреднали наука - 2017»*. V. 10. Технічні науки. Софія. «БялГРАД-БГ». 2017. С.10-13.

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

22. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П. Дослідження трибологічних параметрів при зношуванні поверхонь зразків розділених сплавами на основі Bi-Pb-Sn-Cd. *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.

23. Ганзюк А. Л. Механізм захисту контактуючих номінально-нерухомих пар покриттям на основі легкоплавкого сплаву при фретинг-корозії. *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.

24. Ганзюк А. Л. Аналітична оцінка зміни активності поверхні контактуючих тіл при проходженні трибохімічної реакції для сталі 45. *Materialy XV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Europejska nauka XXI powieką - 2019»*. - Techniczne nauki. V. 9. Przemysł. Nauka i studia. 2019. С. 44-47.

ABSTRACT

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

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

The relevance of the dissertation is determined by the increase in the life of tribosystems, which is limited by premature wear or destruction of contacting parts as a result of the emergence and development of a special type of damage to the surface - fretting corrosion. The phenomenon of fretting, as one of the contact types of interaction, is related not so much to the problem of wear of the friction nodes, but to the risk of a sudden failure of the nominally fixed connections.

The fretting corrosion acquires a particular importance at vehicle junctions, namely: the tips of the front suspension rods, loops of the traction and coupling device of the trailer, the steering mechanism and knots of fastening of tanks for transportation of various substances, bushes of knot of turn of a wheel and bushes of piston, which are located dynamic interaction with the environment (active air gases and corrosive water environment).

The analysis of the literature has shown that at the present stage there are no universal composite materials that can be equally successfully used in the conditions of shock loads, intensive wear and tear in aggressive environments.

Improved technological possibilities of coating's applications, which should provide the best working indexes of wear resistance with the simultaneous simple realization, energy saving and other requirements of the modern stage of production of machines, have greater possibilities.

Therefore, increasing the wear resistance of tribo-systems in low-amplitude fretting conditions with the help of special composite coatings based on fusible alloys is an urgent scientific and technical task.

The dissertation deals with the scientific and technical problem of increasing the durability of tribo-systems of nominally fixed joints in the conditions of low-

amplitude fretting with the use of fusible alloys considering the environment.

During the dissertation, an original unit was developed to simulate the influence of the environment upon the interaction of surfaces of high-loaded machine parts that are in nominally fixed contact and to study the FC under conditions of normal vibration loading.

It has been experimentally found that the use of soft coatings based on lead, tin, cadmium, which has a low resistance to fluidity and is able to change the coefficient of friction on the contacting surfaces, is a promising direction in the fight against fretting damage in nominally fixed joints of machine parts, can also absorb some of the vibration energy.

Studies of fretting corrosion in various gas environments have shown a general tendency to reduce friction while increasing wear, which is related to the corrosion activity of materials and their tendency to adhesion. Hydration of highly dispersed oxides (carbonates) with their simultaneous saturation with adsorbed oxygen on the one hand, contributes to the reduction of the friction coefficient, and on the other - creates conditions for the destruction of the conjugates by the mechanisms of chemical and electrochemical corrosion.

Metallographic studies of the surfaces of specimens separated by a fusible alloy coating with Bi-Sn-Pb-Cd composition showed that the main mechanism for the formation of protective surfaces is an adhesion, which provides:

- creating the effect of shielding the solid surface from the action of the environment, especially diffusion into the contacting surfaces of the radicals of gases: oxygen, hydrogen and carbon dioxide and aqueous mixtures;
- reducing the adhesion of the contacting surfaces of the bodies due to the location between the particles of the fusible alloy.

An analytical dependence is proposed to determine the amount of energy expended in increasing the density of dislocations in a single volume and determined by the difference in the density of dislocations before and after fretting.

The analytical dependence of the description of the kinetics of the passage of the second phase of the tribo-chemical reaction, which initiates the fretting corrosion,

is proposed, as well as the regularity of the change of the surface activity of the contacting bodies of the second phase of the passage of the tribochemical reaction for steel 45.

The results of the wavelet analysis of the time course of the fretting process have shown that the object of the research, during operations, changes from a state of absolute (elastic) coupling to full slippage with amplitudes that far exceed the total previous displacement (creep).

An evolutionary model of tribosystem dynamic behavior based on mathematical modeling and computer simulation is proposed. It has been experimentally established that the relative elemental composition of interacting surface's changes due to fretting.

The adsorption-electrochemical concept of the development of fretting corrosion during the incubation (latent) period when conditions for the formation of an electrochemical environment that promotes corrosion-fatigue destruction of conjugated surfaces are experimentally confirmed.

It is established that the wear of the matrix, when introduced into the contact zone of the fusible alloy, begins only after $0,15 \times 10^6 N$ to $0,3 \times 10^6 N$ cycles, and the wear resistance of the friction pair of the studied materials increases by 2-3 times. When fretting in the environment (an aqueous mixture of esters, aromatic hydrocarbons, monohydric and polyhydric alcohols), the concentration of iron changes in proportion to the time of fretting.

Recommendations for combating AF in nominally fixed joints of machine parts, method, technology, and design of equipment for the application of a fusible alloy (Bi-Sn-Pb-Cd) on the surface of nominally fixed connected machine parts are offered providing an opportunity to obtain a stable protective coating of the contacting surfaces and slow down the fretting corrosion process at the joint of the threaded surfaces of the parts subjected to cyclic loading and contact with the environment.

Scientific novelty of the obtained results:

1. The idea of the passage of tribochemical reactions in nominally fixed

frictional compounds has been further developed, taking into account the properties of the contacting materials and the influence of the environment.

2. The adsorption-electrochemical concept of the development of fretting corrosion during the incubation (latent) period, when conditions for the formation of a friction contact zone in the friction zone, contribute to the friction zone, has been experimentally confirmed.

3. The contribution of thermodynamics of irreversible processes is considered the basic deformation and tribochemical phenomena in the dissipation of mechanical energy under conditions of fretting corrosion, and their mutual influence is determined.

4. A dynamic model has been constructed to describe the conditions of interaction of contacting bodies in nominally fixed joints under alternating loading, taking into account the influence of the properties of the external liquid medium, and the kinematics of the transition from continuous displacement to continuous slipping under vibration contact conditions.

5. The regularities of wear during the fretting process with the use of fusible alloys in nominally fixed joints have been established. The practical value of the results obtained.

Based on theoretical and experimental studies, the technical problem of slowing the FC and increasing the life of the nominally fixed friction joints has been solved. A facility for the study of the process of stress-strain in mechanical contact with higher steam for materials and coatings has been developed (Pat. Ukraine № 38036). A device and technology for applying a fusible alloy on the threaded surface of Bi-Pb-Sn-Cd (Pat. Ukraine № 119407) has been developed.

A method of crystal-optic analysis of the structural structure of an aggressive aquatic environment and the degree of its activation (Pat. Ukraine № 128630) is proposed.

Scientific provisions and recommendations for slowing down the fretting-corrosion process were submitted for use at the Volochysk machine-building enterprise of "Motor Sich", LLC "Agropartner -1", Khmelnytskyi, and introduced in

the educational process of the tribology department, the department of cars and materials science of the Khmelnytskyi National University during the teaching of “Units of friction machines” and “Surface engineering” courses.

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

The main results of the dissertation research are published in 24 scientific works.

In professional editions:

1. Kostogris S. G., Shalapko Yu. I., A.L. Hansyuk A. L. Theoretical aspects of the use of low-melting alloys for the suppression of fretting-corrosion. *Herald of Technological University of Podillya. Technical Sciences*. 1998. № 4. h. 2. Special output. p. 80-82.

2. Hansyuk A. L. Physicochemical bases of application of low melting chimeric systems in processes that cause fretting corrosion. *Herald of Technological University of Podillya*. 1998. № 4. Part.1. p. 111-113.

3. Hansyuk A. L., Mistilborsky V. V. Deformation model of tribochemical processes using a low-melting composite on the basis of Bi-Pb-Sn-Cd for fight against fretting-corrosion. *Herald of Technological University of Podillya*. 2002. № 4. Part.1. p. 138-140.

4. Misliborsky V., Hansyuk A., Trigonometry of fretting processes and the mechanism of their development from the standpoint of physical chemistry and solid state chemistry. *Problems of tribology*. 2002. № 2. p. 95-99.

5. Kostogriz S., Camburg V., Hansyuk A., etc. Changes in element composition using a low-melting composite based on Bi-Pb-Sn-Cd to combat fretting -corrosion. *Problems of tribology*. 2007. №.3. p. 49-54.

6. Mysliborsky V. V., Hansyuk A. L., Kostogris S. G. Methods and peculiarities of determination of initial tangential rigidity of nominally fixed frictional contact. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2008. № 2. p. 193-196.

7. Shalapko Yu. I., Hansyuk A. L., Razuvaeva M. A. Concealment of fretting

processes in automobile vehicle combinations and their impact on the safety of operation. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2010. № 5. p. 165-169.

8. Hansyuk A. L., Oleksandrenko V. P., Nzdorovin V.P. Influence of fretting processes on the composition of water - alcohol mixtures. *Problems of tribology*. 2017 № 1. p.12-18.

9. Hansyuk A. L., Oleksandrenko V. P. Development of the basis of the evolutionary model of fretting corrosion from the standpoint of physical chemistry and solid state chemistry taking into account the factors of external influence. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2018. № 2. p. 20-28.

In foreign periodicals:

10. Hansyuk 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). p. 28-32.

Patents:

11. Pat. to the utility model №38036 of Ukraine. IPC G01M3 / 00. The unit for studying the process of "voltage-deformation" in mechanical contact with a higher vapor for materials and coatings / S. G. Kostogris, V. V. Mysliborsky, A. L. Hansyuk; owner Khmelnytskyi National University. – № u 2008 06157; statements. 05.12.2008; published 25.12.2008, Bull. № 24. – 5p.

12. Pat. on utility model №119407 of Ukraine, IPC B23K 26/00. Paints for drawing on a threaded surface of metal details of a low-melting alloy / A. L. Hansyuk, V. P. Oleksandrenko A. I. Hordeev; – u 201703190; Application 03.04.2017; Published 25.09.2017, Bul. № 18. – 6 p.

13. Pat. to utility model №128630 of Ukraine. IPC G01N 21/79. Method of crystal-optical analysis of the structural structure of water and degree of its activation and contamination with biological residues / A. L. Hansyuk, V. P. Oleksandrenko,

A. I. Hordeev, N. O. Kostyuk; – № u201804393; statements. 20.04.2018; published 25.09.2018, Bul. № 18 – 10 p.

Conference materials and theses:

14. Hanzhuk A., Kostogris S., Bachinsky T. Fretting-resistant coating of a metal surface based on the alloy Bi-Pb-Sn-Cd. *Lviv chemical reading - 99: Materials Sciences. conf.* Lviv: LDU. 1999. p. 118.

15. Misliborsky V., Hanzhuk A., Kostogrits S. Ways to combat fretting from the standpoint of solid state chemistry. *Mechanics and Informatics: Zb. materials of III Ukrainian-Polish sciences. conf. young scientists, April 28-30 2005.* Khmelnytskyi: KhNU, 2005. p. 150-153.

16. Shalapko Y., Hanzhuk A., Kurskoy W. Wavelet-analysis for control of contact vibration with friction and fretting-process. *9th Conf. Active noise and vibration control methods.* Krakow-Zakopane. Poland, 2009. p. 98-99 (coll. of proc. conf.).

17. Shalapko Y., Hanzhuk A., Kurskoy W. Wavelet-analysis for the control of contact vibration with friction and fretting process. *Proceedings 9th Conf. Active noise and vibration control methods.* Krakow-Zakopane. Poland, 2009. p. 305-310 (proceedings of Conf.).

18. Shalapko Yu., Hanzhuk A., Radek N. Physicochemical bases of application of low-melting chemical systems in processes that cause fretting-corrosion. *IV Ukrainian-Polish scientific dialogues: international. sciences Conf.*, Oct. 11-14. 2011, Yaremche city: theses of sciences. Khmelnytskyi: KhNU, 2011. p. 161-162.

19. Hanzhuk A. L., Oleksandrenko V. P., Nzdorovin V. P. Change in the composition of organic and aqueous-organic environments under the influence of fretting processes. *Materials of the XII International scientific and practical conference Areas of scientific thought.* V. 8. Technical science. Construction and architecture. Geography and geology. Sheffield 2016/2017. p. 36-39.

20. Hanzhuk A. L., Oleksandrenko V. P., Hordeev A. I., Nzdorovin V. P. Device for drawing on a threaded surface of metal parts of a low-melting alloy for the

purpose of prevention of fretting-corrosion. *Materials XIII International Scientific and Practical Conference "Novelty for Humorous Science - 2017"*. V. 10. Technological science. Sofia. "BialGrad-BG". 2017. p. 10-13.

21. Hansyuk A. L., Oleksandrenko V. P. Influence of vibration load on nominally immobile connection and evolutionary model of fretting -corrosion with influence of external environment. *Vibrations in technology and technologies: Collection of abstracts of reports of the XVI International Science*. Tech. conf. Vinnitsa. VNTU, 2017. p. 29-31.

22. Hansyuk A. L., Oleksandrenko V. P. Investigation of tribo-logical parameters when wearing surfaces of samples separated by alloys on the basis of Bi-Sn-Pb-Cd. *Materials of the XIII International scientific and practical Conference Trends of modern science - 2018*. V.6. Sheffield. Science and education LTD. 2018. p. 10-13.

23. Hansyuk A. L. Mechanism of protection of contacting nominally and immobile pairs by coating on the basis of low-melting alloy during fretting-corrosion. *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. p. 92-96.

24. Hansyuk A. L. An analytical evaluation of the change in the activity of the surface of contacting bodies during the tribo-chemical reaction for steel 45. *Materials of the XV International scientific-practical Conference «European science XXI eyelid-2019»*. Technician of study. V.9. Przemysł. Learning and studying. 2019. p. 44-47.

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	18
ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАСЛІДКІВ ФРЕТИНГ–ПОШКОДЖЕНЬ З'ЄДНАНЬ ТА МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ ФРЕТИНГОСТІЙКОСТІ	29
1.1. Аналіз характеристик ушкоджень деталей машин при фретинг- корозії з вібраційними навантаженнями.....	31
1.2. Аналіз досліджень механізмів процесу фретинг-корозії.....	37
1.3. Прояви фретингу та його зв'язок з будовою твердих тіл	40
1.4. Аналіз методів підвищення фретингостійкості конструкційних матеріалів.....	44
1.5. Висновки до розділу 1 та основні завдання досліджень	49
РОЗДІЛ 2. УСТАНОВКИ І МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	52
2.1. Установа для дослідження зразків на фретинг-зношування по схемі площа-площа.....	52
2.2. Установа для дослідження фрикційного контакту в умовах фретингу.....	57
2.3. Матеріали, що досліджувались.....	60
2.4. Технологічне обладнання та методика дослідження характеристик трибоелементів.....	61
2.4.1. Металографічний аналіз та дослідження	61
2.4.2. Рентгенівський флуоресцентний аналіз.....	63
2.5. Газовий хроматограф «Кристал-2000М».....	65
2.6. Обробка експериментальних даних та оцінка точності отриманих результатів	66

РОЗДІЛ 3. ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА ФРЕТИНГ-КОРОЗІЇ.....	68
3.1. Енергетична картина фретинг-процесів	69
3.2. Особливості розвитку трибохімічних процесів.....	86
3.3. Трибохімія впливу газового середовища	97
3.4. Вплив водного середовища.....	106
3.5. Термодинаміка фретинг-корозії.....	110
3.6. Висновки до розділу 3.....	116
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ФРЕТИНГ-ЗНОШУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА НОВИЙ МЕТОД ЗАХИСТУ.....	118
4.1. Окислювальні та адсорбційно-електрохімічні процеси при фретинг-корозії	108
4.2. Механіка контактної взаємодії та особливості фретинг-пошкоджень	124
4.3. Застосування захисного покриття від фретинг-корозії.....	133
4.4. Висновки до розділу 4.....	139
РОЗДІЛ 5. ФРЕТИНГОСТІЙКІСТЬ КОНТАКТНИХ ПАР В УМОВАХ РОЗМЕЖУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ЛЕГКОПЛАВКИМИ СПЛАВАМИ НА ОСНОВІ Bi-Sn-Pb-Cd	140
5.1. Умови перебігу трибохімічних реакцій.....	140
5.2. Дослідження трибологічних параметрів при фретинг-зношуванні поверхонь зразків розділених сплавами на основі Bi-Sn-Pb-Cd	145
5.3. Зміни відносного елементного складу поверхонь твердих тіл покритих Bi-Pb-Sn-Cd та відносного складу продуктів зношування на різних стадіях фретинга.....	147
5.4. Вплив на фретинг-процес середовища водяної суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів.....	157

5.5. Методика та обладнання для нанесення легкоплавких сплавів Bi-Sn-Pb-Cd на контактні поверхні.....	163
5.6. Висновки до розділу 5	168
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	170
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	173
Додаток А.....	189
Додаток Б.....	193
Додаток В.....	199
Додаток Д.....	204

ВСТУП

Основна тенденція розвитку сучасної техніки полягає в прагненні до підвищення реалізованих швидкостей, тисків, робочих температур при одночасному рості надійності, зокрема, ресурсу конструкції, зниженні маси на одиницю потужності, а також поліпшення експлуатації окремих вузлів і машин у цілому за умов впливу агресивних середовищ. Це неможливо без використання деталей, що мають високі триботехнічні характеристики поверхневих шарів, тому що в абсолютній більшості випадків саме вони відповідальні за зносостійкість, корозійну стійкість, адгезійну сумісність і інші експлуатаційні характеристики виробів.

Розвиток техніки вимагає суттєво нового підходу до вирішення різного роду трибологічних проблем, які пов'язані з контактними мікропереміщеннями в номінально-нерухомих з'єднаннях при динамічному та вібраційному навантаженні механічного вузла. Реалії сьогодення висувають завдання, пов'язані з створенням високоефективної техніки нового покоління та вдосконалення існуючих наукоємних інженерних конструкцій. Технічний розвиток ініціює випуск готового виробу, який зможе працювати в умовах обмеженого робочого об'єму і має різноманітні механічні функції. Специфічний науковий підхід у галузі автомобілебудування, машинобудуванні, полягає у виборі конструкційних матеріалів при підвищенні динамічного навантаження в місцях спряження деталей вузлів та різноманітних механізмів.

Часовий фактор зношування створює умови щодо порушення цілості вузлів та механізмів, при цьому втрачається точність просторового розміщення деталей та переміщення, виникають вібрації, удари, заклинювання, що призводить до додаткових витрат енергії та перегріву механізмів. Явища тертя та зношування є взаємно обумовлені: тертя призводить до зношування, а зношування поверхні твердих тіл в ході контактної взаємодії веде до зміни параметрів тертя.

Вирішення науково-технічної задачі, а саме захисту конструкційних матеріалів, що знаходяться у номінально-нерухомих фрикційних з'єднаннях від

фретинг-корозії з урахуванням оточуючого середовища не втрачає актуальності. Згідно деяких оцінок використання новітніх розробок в даному напрямку дасть змогу на третину скоротити затрати на ремонт та експлуатацію різного роду механізмів. В техніці тертя є ініціатором деформаційних, динамічних, теплових, акустичних, електричних, адгезійних та інших процесів, які визначають ресурс працездатності вузлів тертя машин, їх енергетичні показники та ефективність використання.

Актуальність теми. Відомо, що ресурс роботи трибо-з'єднань обмежується передчасним зношуванням чи руйнуванням контактуючих деталей у результаті виникнення та розвитку особливого виду пошкоджень поверхні – фретинг-корозії (ФК). Явище фретинг, 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, розробка та використання змащувальних матеріалів четвертого, п'ятого покоління, а також екологічно чистих матеріалів.

Розвиток наукових основ еволюційної моделі перебігу фретинг-процесів (ФП) у номінально-нерухомих з'єднаннях дасть змогу уповільнити різного роду

впливи на поверхневу та об'ємну втому та корозією 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 ударного навантаження, 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. Робота виконана відповідно 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 08.09.2011 р. № 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 бюджетної теми № 1Б-2016 «Теоретико-експериментальні методи та комп'ютерні моделі забезпечення живучості циліндричних трибо-систем 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 досліджень. Метою роботи є підвищення зносостійкості трибосистем номінальнонерухомих 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 на основі Bi-Pb-Sn-Cd та встановити характер змін відносного мікроелементного складу в зоні фретингу при введенні легкоплавкого композиту;
- розробити технологію нанесення покриття на основі 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 трибохімічних реакцій в номінально-нерухомих фрикційних з'єднаннях, закономірності зношування при веденні легкоплавкого сплаву для уповільнення фретинг-корозії.

Методи та засоби дослідження. Теоретичні висновки отримані за результатами застосування методів металографічного, рентгенофлуорисційного та хроматографічного аналізу із використанням високоточного аналітичного обладнання, а саме: рентгенофлуоресцентного спектрометра, ІЧ-Фур'є спектрометра, газорідного 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. Аналіз вібросигналів, енергетичні характеристики мікропроковзування, визначались за методом вейвлет-аналізу часових рядів фретинг-процесу.

Дослідження мікроструктури поверхневого шару проводились на мікроскопах МИМ-10 та Leica. При обробці результатів дослідів було застосовано методи математичної статистики. Характеристики об'єктів дослідження визначалися 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. На базі теоретичних та експериментальних досліджень вирішена технічна задача уповільнення фретинг-корозії та підвищення строку експлуатації номінально-нерухомих фрикційних з'єднань введенням в зону контакту легкоплавких сплавів для уповільнення фретинг-корозії. 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). Для визначення ступені активації агресивного середовища при дії знакозмінного навантаження запропоновано спосіб кристалооптичного аналізу структурної будови водного агресивного 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. Усі наукові результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, належать особисто здобувачу. Постановка задачі, формулювання завдань досліджень дисертаційної роботи та аналіз результатів виконано спільно з науковим керівником. Автору належать основні ідеї захисту конструкційних матеріалів автомобільної техніки в умовах малоамплітудного фретинга, а саме розробка методу та конструкції пристрою для нанесення легкоплавкого сплаву на різьбові поверхні [158, 159]. Роботи [122, 152, 153] здобувачем написано одноосібно. В сумісних публікаціях особисто здобувачу належить:

– в роботах [36, 85, 86, 150, 152] – проаналізовано умови пошкоджень вузлів автомобільної техніки, визначено актуальність роботи та сформульовано завдання та напрямки вирішення поставленого завдання;

– в роботах [153, 150] – визначені принципи структурної цілісності номінально-нерухомих з'єднань;

– в роботах [116, 121, 154, 139] – участь у побудові теоретичної еволюційної моделі фретингу з урахуванням впливу зовнішнього середовища;

– в роботах [149, 155] – визначено зміни елементного складу композиту на основі Bi-Pb-Sn-Cd при фретинг-корозії та зміну складу водно-спиртового середовища під впливом фретинг-процесів;

– в роботах [149, 143] – запропоновано фізико-хімічні основи застосування низькоплавких сплавів в процесах, які обумовлюють фретинг-корозію;

– в роботах [143, 150] – проведено дослідження трибологічних параметрів при зношуванні поверхонь зразків розділених сплавами Bi-Pb-Sn-Cd;

– в роботах [123, 141, 142] – обґрунтовано схеми навантаження, визначено амплітудно-частотні характеристики зміни сили тертя в часі в номінально-нерухомому контакті запропоновано динамічну модель номінально-нерухомого контакту.

Участь у розробці дослідного обладнання полягала в обґрунтуванні схем тензометрії, розробці способів запису осцилограм, математичній обробці часових рядів. Вирішення проблем математичного характеру, обговорення та висновки по роботі проводилися сумісно з науковим керівником.

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, 24-27 травня 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». Софія. (15-22 травня 2017 р.);
- XII International scientific and practical conference «Areas of scientific thought». Sheffield. (грудень 2016- січень 2017р.);
- XVI міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях». м. Вінниця.(26-27 жовтня 2017 р.);
- XIII International scientific and practical Conference «Trends of modern science – 2018». Sheffield. (30 травня - 7 червня 2018);
- XV International scientific and practical Conference «Modern scientific potential-2019». Sheffield. (28 лютого-7 березня 2019).
- XV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Europejska nauka XXI powieką -2019». Przemyśl. (7 -15 травня 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 анотацій 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАСЛІДКІВ ФРЕТИНГ–ПОШКОДЖЕНЬ З'ЄДНАНЬ ТА МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ ФРЕТИНГОСТІЙКОСТІ

Фундаментальним основам теорії фретинг-процесів та методикам теоретичних підходів забезпечення працездатності протягом терміну експлуатації машин приділялась увага в працях [1-3] вітчизняних та зарубіжних науковців в галузі ФЗ: Уотерхауз Р., Томлінсон Г., Хоуппнер Д., Шевеля В. В., Похмурський В. І.; подальший розвиток теорії ФП було отримано у фундаментальних працях [4 -7] 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 Хілла Д., Джонсона К., Костогриза С. Г., Шалапка Ю. І. [8-9]. На основі механізмів зношування та закономірностей тертя у роботах [10-16] Б. І. Костецького, І. В. Крагельського, М. О. Буше, Ф. Боудена, Д. Тейбора, Е. Рабіновича, А. В. Верховського, Л. І. Бершадського, Р. Г. Мнацаканова, Я. М. Гладкого отримали подальший розвиток фізико-механічні передумови руйнування контакту в результаті фрикційної взаємодії.

Поряд із розвитком адгезійної теорії необхідно зазначити важливу роль енергетичних уявлень в модулюванні природи трибологічних процесів. Дослідження структурно-енергетичних особливостей проводились в роботах [17-20] Алябьева А. Я., Голего Н. Л., Шевелі В. В., Олександренка В. П., Іванової В. С., Костецького Б. І.

На першому етапі фретингу в результаті механічного реверсивного руху відбувається руйнування оксидних плівок в місці контакту, внаслідок чого утворюється ювенільна поверхня чистого металу, здатна до швидкого окислення. При цьому в першій частині циклу руху відбувається утворення

оксидної плівки, а при зворотному рухові другої половини циклу – її руйнування. Видалення подрібнених металічних частинок з поверхні контакту здійснюється шляхом механічного руйнування утворених в локальних місцях точок зварювання. При цьому руйнування проходять по поверхнях, які не співпадають з початковою поверхнею локального контактування.

Утворенні продукти окислення грають роль абразивного матеріалу для подальшого пошкодження поверхні. На початковій стадії розвитку фретингу практично з перших циклів спостерігається ріст окисних плівок на поверхні метала. Утворюється досить твердий і крихкий окисний шар. Унаслідок неоднорідності розподілу нормального навантаження окисний шар має тенденцію до локального руйнування, допускаючи контакт ювенільних поверхонь. Цей момент внаслідок підвищеної адгезії характеризується різким зростанням сили тертя та зниженням електричного опору контакту [3].

Зношування в основному відбувається внаслідок розшарування поверхні. Продукти зношування, які утворюються в зоні тертя підлягають циклічному передеформуванню та інтенсивно окислюються. Одночасно у під поверхневих шарах починається розвиток втомних пошкоджень. Формується корозійно-автивне середовище завдяки адсорбції на окислах вологи та кисню повітря. Формування в зоні тертя середовища в умовах постійного окислення стимулює електрохімічну корозію продуктів та поверхні тертя [3].

З моменту, коли в зоні контакту починає формуватися шар з дрібнодисперсною крихкою структурою, настає третя стадія. Її можна кваліфікувати як період накопичення поверхнею пошкоджень які втратили стійкість від корозійної втоми. Інтенсивність зношування в цій стадії невелика. Після чого починається інтенсивна деградація поверхні в результаті корозійної та контактної втоми, що в кінцевому результаті призводить до прискорення зношування [3].

З точки зору рівня концентрацій напружень та ймовірності переходу від поверхневого до об'ємного руйнування найбільш небезпечні пошкодження першого типу, які утворюються при руйнуванні локальних поверхонь шарів

внаслідок малоциклічної втоми. Матеріали в зоні цього концентрату знаходяться в сильно розвпорядкованому стані, вони насичені великою кількістю дефектів, починаючи від коагуляції вакансій, дислокацій по границі зерна, і закінчуючи суб- і мікротріщинами.

Згідно теорії І. В. Крагельського [14], взаємодія поверхонь тертя має подвійну молекулярно-механічну природу. Молекулярна взаємодія обумовлена взаємним притягуванням твердих тіл, їх адгезією; механічне – взаємним впровадженням елементів стиснених поверхонь. Така взаємодія реалізується на плямах контакту через виникання і зникнення відповідних фрикційних зв'язків. На основі цього виділяється п'ять основних видів порушення фрикційних зв'язків: пружне відтиснення металу; пластичне відтиснення; мікрорізання; схоплювання поверхневих плівок і їх руйнування; схоплювання поверхонь і глибинне виривання металу. В природі існують наступні види руйнування поверхневих шарів при зношуванні деталей машин: абразивне зношування, адгезія, втома поверхні, термовтома, фретинг, звичайна корозія, кавітаційна ерозія. При цьому в кількісному співвідношенні фретинг становить 8-10 % від всіх видів пошкоджень металевої поверхні [21, 22].

1.1. Аналіз характеристик ушкоджень деталей машин при фретинг-корозії з вібраційними навантаженнями

Проблема фретингостійкості постійно виникає при створенні нових машин, експлуатації конструкцій існуючих машин, впровадженні нових матеріалів та технологій. Методи захисту від фретингу потребують детального вивчення та спеціального підходу до кожного конкретного випадку.

Фретинг можливий при малих повторюваних мікропереміщеннях контактуючих поверхонь. Відносне ковзання в з'єднаннях може виникнути в наступних випадках: при вібрації всієї конструкції в цілому, або при виконанні з'єднанням своїх робочих функцій. Фретинг виникає в таких контактах, де дві

прилягаючі поверхні постійно знаходяться в контакті, а також і в контактах, які знаходяться в спокої лише на протязі деяких періодів часу.

До таких з'єднань відносяться болтові, заклепочні з'єднання, втулки з пресовою посадкою. Досліджуючи зношувальність, викликану вібраціями з амплітудою в декілька мікрон було встановлено, що фретинг служить причиною половини випадків пошкодження несучих поверхонь у гелікоптерів [23]. Зовнішній вигляд продуктів пошкодження є найкращою розрізнявальною ознакою там, де пройшов фретинг. На сталі продукти фретинг-корозії мають більш червоне забарвлення чим звичайна іржа; на алюмінієвих сплавах вони мають чорний колір, в той час як продукти звичайної корозії білі. Порошкоподібні продукти фретингу в основному являють собою окисли, об'єм яких для найбільш поширених металів більше об'єму металу з якого вони утворились. На практиці коли продукти фретинг-корозії не видаляються із зони контакту відбувається збільшення тиску. В контактах нерухомого типу це не представляє серйозної небезпеки, а у випадку сталених тросів, де пошкодження відбуваються між сплетеними проволоками, останні можуть бути розсунуті і в результаті виникають здуття на поверхні троса. При рухомому контакті, який рухається час від часу, продукти руйнування можуть викликати заїдання запобіжних клапанів і регуляторів. Якщо ж продукти руйнування виходять із зони контакту, то це у свою чергу може призвести до послаблення посадки та зменшення тиску, що в свою чергу призводить до збільшення вібрацій. В механізмі продукти руйнування можуть переноситися на інші деталі та викликати проблеми подальшого зношування. Утворення продуктів фретингу в електричних контактах викликає зміну контактної опору, що призводить до нестабільності електричних сигналів [24].

В болтових з'єднаннях, які повністю або частково передають зовнішнє зусилля силами тертя, відбувається зношування поверхонь під головкою болта та шайбою. Зношувальність контактних зон призводить до пониження попереднього натягу болтів і, відповідно, до зниження несучої здатності поверхонь [25, 26]. Послаблення без викручування гайки відбувається

внаслідок: зняття мікровиступів, просідання шайби в матеріал стягуючої деталі, фретинг - зношування та теплової дії.

Роликові та шарикові підшипники можуть отримувати пошкодження в точках контакту елементів кочення з біговими доріжками. У кулькових підшипниках на доріжках внаслідок фретинг-зношування можуть утворюватися каверни сферичної форми, які мають назву “хибне бринелювання”. В роликових підшипниках поверхні пошкоджень на біговій доріжці називаються жолобками та мають циліндричну форму, якщо доріжка є циліндричною, або еліптичну, якщо доріжка є бочкоподібною.

Муфти використовуються в конструкціях машин для з'єднання обертаючих валів і бувають жорсткого та гнучкого типів. Фретинг-процеси у зубчатих муфтах, шліцевих валах, шпонкових з'єднаннях відрізняються значними контактними навантаженнями і складним трьохмірним відносним рухом контактуючих поверхонь, а також ударним навантаженням [27 - 29]. Такі умови роботи призводять до заклинювання, а глибина зношування може досягати декілька міліметрів [30].

Дуже поширеним місцем, де виникає фретинг-корозія, є область контакту деталі з навантаженим валом, на який вона напресована, наприклад, ступиця посаджена на вісь. Тиск під ступицею збільшується до максимуму в зовнішніх кромках зони контакту. При навантаженні осі виникають згинаючі напруження, які призводять до її деформування. При обертанні осі кожна точка на поверхні проходить через послідовні цикли стискаючих та напружень які розтягують, так що між втулкою і віссю проходить локальний рух, який досягає найбільшої величини на краях втулки. Небезпека фретингу в цьому випадку полягає в ініціюванні тріщин втоми на осі. Дослідження [30] виявили, що фретинг може знизити міцність від втоми такої осі більше ніж на 42 %.

Експлуатація автомобільної техніки з точки зору надійності вузлів кріплення та фретинг-процесів відрізняється головними чинниками: нестационарністю динамічних навантажень та впливом зовнішнього середовища. Саме нестационарність навантаження призводить до раптового

руйнування вузлів нерухомого спряження, а прихованість довготривалої дії від фретингу не дає можливості передбачати аварійну ситуацію.

В процесі роботи транспортних засобів найбільші динамічні навантаження різного напрямлення, як тангенціальні так і нормальні до площини контакту, сприймають: наконечники штанг передньої підвіски, петлі тягово-зчепного пристрою причепу, корпус рульового механізму та вузли кріплення баків для перевезення різних речовин, шкворневі втулки вузла повороту колеса та втулки поршневих пальців. У роботі [31] наведено діапазони функції збурення амплітуд та частот коливань вузлів транспортних засобів на розбитій ґрунтовій дорозі при різних швидкостях руху, які лежать у межах - частота від 1 до 60 Гц та амплітуда від 1 до 200 мм., що призводить до виникнення у номінально-нерухомих з'єднаннях коливань з відповідною частотою та амплітудами від 10 до 70 мкм. Руйнування номінально-нерухомих з'єднань може відбутися при зміщенні центру ваги вантажу (вузол кріплення причепу), різкі маневри на дорозі, удари о бордюрні камені, динамічний дисбаланс при пошкодженні шини, перенавантаження автомобіля, неякісний монтаж [31].

Проведемо аналіз деяких ДТП внаслідок руйнування номінально-нерухомих з'єднань, що відбулися за останні роки. Шостого березня 2007 на автодорозі Житомир-Чернівці стався виїзд автобуса «Ікарус» за межі лівої смуги руху, наїзд на захисне металеве огороження з подальшим його пошкодженням та з'їздом автобуса в кювет, де відбулось перекидання автобуса на дах. Під час дослідження технічного стану вказаного автобуса спеціалістами автотехніками НДЕКЦ при УМВСУ в Хмельницькій області виявлено несправність його ходової частини, яка полягала в порушенні різьбового з'єднання лівої штанги передньої підвіски з переднім наконечником автобуса «Ікарус» та зриву даної штанги з наконечника, і відповідно до висновку спеціаліста, має експлуатаційний характер і яка виникла під час руху автобуса до дорожньо-транспортної пригоди під дією циклічних динамічних експлуатаційних навантажень (рис. 1.1, рис. 1.2), що викликало порушення

співвісності переднього та заднього мостів автобуса із зміщенням лівої частини передньої вісі до задньої частини автобуса і могло стати причиною виникнення крутного моменту, направленого в сторону зміщення вісі (ліворуч) по ходу руху автобуса та втрати по цій причині керованості транспортного засобу.



Рис. 1.1. Фотографія загального вигляду пошкодження елементів передньої підвіски автобуса «Ікарус»



Рис. 1.2. Фотографія детального вигляду пошкодження різьбової частини наконечника лівої штанги передньої підвіски автобуса «Ікарус»

27.04.2009 року в с. Подолянське Віньковецького району сталась дорожньо-транспортна пригода автомобіля ЗІЛ-131, який із завантаженим причепом, рухався вгору по вулиці Козацькій. Під час руху відбулось від'єднання причепа від автомобіля, внаслідок чого причіп, покотившись донизу в некерованому стані, здійснив наїзд на пішохода.

Під час дослідження технічного стану вказаного автомобіля та причепа експертами НДЕКЦ при УМВСУ в Хмельницькій області виявлено несправність петлі тягово-зчепного пристрою причепа, що виникло у порушенні різьбового з'єднання петлі з гайкою її кріплення до дишла причепа, яке за висновком спеціаліста має експлуатаційний характер і виникло внаслідок експлуатаційного зношування різьбової ділянки вказаного з'єднання (рис. 1.3 - рис. 1.5).



Рис. 1.3. Фотографія детального вигляду пошкодження різьбової частини петлі причепа до автомобіля ЗІЛ-131



Рис. 1.4. Фотографія детального вигляду пошкодження різьбової частини петлі причепа до автомобіля ЗІЛ-131

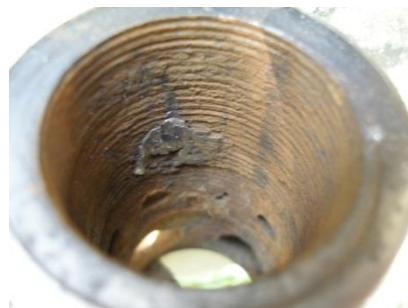


Рис. 1.5. Фотографія вигляду різьбової частини гайки кріплення петлі до дишла причепа

Аналіз кольору поверхні деталей та вид руйнування функціональних елементів, призведених дією циклічних динамічних експлуатаційних навантажень, показує, що пошкодження металу пов'язане з накопиченням та взаємодією дефектів структури, хімічною взаємодією метала та середовища спричинених малоамплітудним фретингом.

Детальний аналіз досліджень технічного стану автомобільної техніки та причин деяких ДТП внаслідок руйнування номінально-нерухомих з'єднань приведено у додатку А.

1.2. Аналіз досліджень механізмів процесу фретинг-корозії

Існувала гостра дискусія в науковій літературі відносно головної ролі механічного чи хімічного фактора при фретинг-зношуванні. Ідею хімічної пасивності поверхонь підтримують Н. А. Буше, В. В. Копитко [32], виходячи з експериментів з матеріалами, що не окислюються (скло, платина, кварц і ін.). Досліджуючи доріжку зносу при фретинг-корозії вони спостерігали утворення плівок, рахуючи їх, як результат ущільнення оксидів. Проти механічного чинника, як провідного механізму руйнування поверхні при фретинг-корозії, виступали дослідники [33]. Вони вважали, що за наявності кисневого середовища фретинг-корозія обумовлена хімічними процесами, а механічна взаємодія сприяє утворенню ювенільних поверхонь і видаленню продуктів зносу. Оскільки механічний і хімічний чинники в умовах фретинг-корозії взаємозв'язані, то теорії авторів [32, 33] є спрощеними.

Відомо, що на ранній стадії при фретингу утворюються окисні плівки, руйнування яких переважає над відновленням [2, 17]. Міцність адгезії при цьому тим вища, чим більша площа контакту, параметр, визначений властивостями пластичної текучості поверхні метала. Наступний фактор – деформаційне зміцнення. Розміри і форма області деформаційного зміцнення свідчить про те, що механізм їх утворення більш складний ніж просте зчеплення і наклеп, за яким слідує пружне поглинання напружень в поверхні.

При фретингу деформаційне зміцнення має зв'язок з хімічною перебудовою в тонких поверхневих шарах [17, 34].

У роботах Алябьева А. Я., Голего Н. Л., Шевелі В. В. [2, 3, 17 - 19] на підставі комплексного дослідження процесів при фретинг-корозії з урахуванням особливостей деформації, руйнування і хімічних реакцій було запропоновано нове трактування механізму зношування. Модель руйнування металевих контактуючих поверхонь в умовах фретинг-корозії складається з трьох стадій [2]. На першій стадії відбувається пластична взаємодія мікронерівностей контактуючих поверхонь, це сприяє схоплюванню ювенільних ділянок металу після руйнування окисних плівок на взаємодіючих мікровиступах, зміцнення поверхонь контакту і циклічна плинність підповерхневих шарів. Мікровиступи, що зруйнувалися внаслідок втоми, і вузли схоплювання, що зрізалися, створюють первинні продукти руйнування, частина яких окислюється. Виміри мікротвердості показують, що вже на першій стадії утворюються ділянки, що не знаходяться у безпосередньому контакті, пов'язані з циклічним навантаженням мікроконтактів. На другій стадії розвитку фретинг-корозії продовжує накопичуватися втомна пошкоджуваність в підповерхневих шарах, формується корозійно-активне середовище при адсорбції на оксидах кисню і вологи, кількість продуктів зносу в зоні тертя досягає рівноважного значення. У щонайтонших поверхневих шарах виникає розупорядкована дрібнодисперсна структура, внутрішньо окислена, яка може грати захисну роль, зменшуючи швидкість зносу. Таким чином, друга стадія фретинг-корозії може бути названа інкубаційною. В цей час заздалегідь зміцнені шари витримують помірніші циклічні навантаження і в них накопичується втомна пошкоджуваність за рахунок циклів укріплення-розукріплення, що посилюється окислювальними і корозійними процесами, а також з'являються втомні мікротріщини. Продукти зносу активно беруть участь в процесі, передаючи локальні тиски. На третій стадії відбувається катастрофічне руйнування зон пошкоджуваності, заздалегідь розпушених втомними і корозійними процесами. З урахуванням можливості протікання

електрохімічних процесів цю стадію можна визначити як стадію корозійно-втомного руйнування. Таким чином, в даному механізмі фретинг-корозії на перших двох стадіях при протіканні втомно-окислювальних, а потім корозійно-втомних процесів створюються структурні передумови для інтенсивного процесу руйнування поверхні на третій стадії.

Вивчення співвідношення адгезії та зношування показує, що на початковій стадії адгезія приводить до зношування від розшарування поверхні метала. В. В. Ковалевським [4] розвинуті уявлення про малоамплітудний фретинг. Важливу роль надано такому фактору, як вплив адгезії на стадійність фретингу та виявлення концентраторів напружень, які впливають на об'ємне руйнування при фретинг-втомі. Руйнування оксидних плівок більше в порівнянні з їх відновленням.

Деформаційне зміцнення внаслідок зростання нормального навантаження приводить до зменшення адгезії. При цьому області пересікання площин сковзання є джерелами мікротріщин. Деякі мікротріщини зливаються, що приводить до локалізації в межах контурного контакту об'єму матеріалу. Відділена маса сильно деформована і насичена великою кількістю тріщин. Взаємодія з зовнішнім середовищем викликає її окислення [4].

При фретинг-втомі з навантаженням зміна адгезії відбувається немонотонно. Перший пік спостерігається на межі від декількох сотень циклів, після чого адгезія починає падати. В цей період спостерігається витіснення частинок метала, що свою чергу викликає контакт "чистих" поверхонь. Повторний ріст адгезії спостерігається в межах від 70000 до 200000 циклів мікропереміщень. Далі адгезія падає та досягає мінімуму, що пов'язано з підвищенням хімічної активності гранично зміцненої поверхні.

Поряд із розвитком адгезійної теорії слід зазначити важливу роль енергетичних уявлень в модулюванні природи трибологічних процесів.

В роботі [17] розглядаються термодинамічні системи в яких мають місце дві підсистеми. В одній з них протікають лише деформаційні процеси, а в іншій мають місце трибохімічні реакції. При цьому незворотне пошкодження металу

пов'язане з накопиченням та взаємодією дефектів структури, хімічною чи електрохімічною взаємодією металу та середовища, утворенням нових поверхонь, термодинамічна система є гомогенна та ізотропна, процеси втомі протікають в ізобарно-ізотермічних умовах. Металографічний та дифрактографічний аналіз дозволили виділити три найбільш впливових концентраторів напружень, які викликають об'ємне руйнування при фретинг-втомі. По-перше, це малоамплітудне руйнування локальних об'ємів поверхневих шарів; по-друге, геометричний концентратор, який виникає внаслідок абразивної дії продуктів зношування; по-третє, концентратор корозійної втомі. Виникнення кожного з трьох типів пошкоджень поверхні характерне для певного числа циклів мікропереміщень при терті тіл.

1.3. Прояви фретингу та його зв'язок з будовою твердих тіл

В твердому стані хімічні елементи являють собою кристалічні тіла, утворені з іонів, атомів чи молекул, розмішених певним чином в просторі, заповненому електронним газом. Характер такого розміщення відповідає мінімальному значенню потенціальної енергії та визначається типом зв'язку, який проявляється між структурними частинками, які утворюють тверде тіло.

Відомо чотири види хімічного зв'язку, відповідно розрізняють чотири основні типи кристалів: іонний чи координаційний, де основним видом зв'язку є іонний зв'язок; поляризаційний чи молекулярний, де зв'язок відбувається за рахунок сил Ван-дер-Ваальса: атомний – із різко вираженим валентним зв'язком та металічний – із характерним металічним зв'язком.

В залежності від способу розміщення іонів або атомів хімічні елементи у твердому стані кристалізуються в одну з 14 типів просторових кристалічних ґраток [35]. Приведені основні комірки деяких з них: кубічна проста (К), об'ємноцентрована (ОЦК), гранецентрована (ГЦК), гексагональна проста (Г) та щільноупакована (ГЦУ). Ці види ґраток найбільш поширені в "істинних" металах. Розміри кристалічної решітки визначаються параметрами, чи

періодом ґратки. Період ґратки є важливою характеристикою. Їх розмір невеликий і для елементів які кристалізуються в кубічні системи, він коливається в межах від 0,28 до 0,60 нм.

В просторових кристалічних ґратках вузли утворюють три групи площин. Для їх позначення застосовують індекси, які характеризують не фактичне положення площин, а лише їх напрямки відносно координат, проведених паралельно ребрам елементарних комірок з будь якого вузла. Тому сукупність індексів характеризує не якусь певну площину, а ціле сімейство однаково направлених паралельних площин. В залежності від кількості атомів, які складають дану площину, вони можуть бути щільно- і нещільноупаковані.

В зв'язку з цим структури ГЦК та ГЦУ є щільноупакованими, так як їх побудову можна уявити в вигляді послідовного накладання однієї на одну щільноупакованих площин кристалічних ґраток. Характерним для них є високе координаційне число ($z = 12$), яке вказує на максимальну кількість найближчих сусідів, які розміщуються на однаковій відстані. Інші кристалічні ґратки (прості кубічні, гексагональні) є нещільно упакованими та мають $z < 12$. Встановлено, що зменшення координаційного числа від 12 до 8,6 чи 4 супроводжується зменшенням міжатомної віддалі в кристалічних ґратках на 3, 4 і 12% відповідно.

Елементи з менш вираженими металічними властивостями мають більш складну кристалічну структуру, це пояснюється частковою заміною металічних зв'язків ковалентними. Але відомі метали, які не враховуючи високої валентності, ведуть себе подібно до «істинних» (алюміній, індій, талій, свинець). Так свинець з чотирма валентними електронами на атом має типову металічну ГЦК-ґратку. Подібна поведінка атомів цих елементів при кристалізації пояснюється неповною іонізацією атомів у кристалах, так деякі валентні електрони залишаються при іонах і не стають вільними.

Дослідження металічних кристалів, які не піддаються дії зовнішніх сил, показує, що атоми в них займають положення, які відповідають рівновазі сил міжатомної взаємодії. Під дією зовнішніх сил атоми зміщуються з своїх

початкових положень, їхнє взаємне розміщення змінюється, в результаті чого змінюються розміри та форма тіла – воно деформується. При незначній величині зовнішніх сил процес деформації буде зворотнім, тобто після зняття навантаження атоми повертаються в попереднє положення і тіло набуває першопочаткові розміри та форму – це пружні деформації. При значних зовнішніх навантаженнях в тілі можуть відбутися незворотні процеси – пластична деформація з подальшим руйнуванням, або крихкі розриви. Вивчення процесу пластичної деформації дозволило встановити, що його особливістю є сковзання одних атомних площин кристалічної ґратки відносно інших паралельних площин, в результаті чого одна частина кристала зсувається відносно іншої. Виявляється, що при сковзанні проявляється різко виражена анізотропія, а сам процес сковзання можливий не по всім атомним площинам і напрямках даної площини.

Викривлення кристалічної ґратки, пов'язане з тепловими коливаннями. Необхідно розрізняти ідеальний кристал, у якому нерухомі атоми утворюють правильну систему точок, і реальний недосконалий кристал, який містить точкові, лінійні, поверхневі та об'ємні дефекти.

В більшості випадків при дослідженні фретинг-корозії пошкоджених матеріалів не приділялось належної уваги вивченню кристалічної структури. Так внаслідок фретинг-корозії відбувається розхитування міжкристалічних зв'язків та розрихлення кристалічної ґратки внаслідок зворотно - поступальних переміщень контактуючих поверхонь.

Кристалічна текстура залежить від швидкості кристалізації, забруднень, які виникають при кристалізації, механічній, термічній обробці. При деяких умовах невеликі забруднення чи незначні домішки суттєво змінюють властивості твердого тіла. Невеликі домішки можуть суттєво покращити не лише фізичні, але і хімічні властивості. Досить часто хімічна стійкість міжкристалічних шарів нижча, ніж самих кристалів, які складають основну частину речовини. Це призводить до того, що корозія чи інший хімічний процес, що прискорює руйнування твердого тіла йде по границях зерен. Отже

покращення властивостей сплавів в основному ґрунтується на покращенні кристалічної структури.

Вагомим підтвердженням розвитку в поверхневих шарах металів при фретінг-корозії процесів від втоми служить зміна мікротвердості в залежності від глибини до поверхні [17]. Все це говорить про те, що в поверхневому шарі чергуються ділянки укріплення і розукріплення. Отримані дані свідчать, що при збільшенні кількості циклів навантаження об'єми, які перебували в розукріпленому стані, укріплюються, а об'єми, які були раніше укріплені – розукріплюються. При цьому відбувається ніби рух хвиль «укріплення – розукріплення» вглибину шарів.

Цей процес пояснюється наступним чином [2]. Спочатку знакозмінне контактне навантаження пластично деформує приповерхневі шари (малоциклічна втома), викликаючи їх укріплення до стану, який споріднений активному статичному укріпленню. Наступні реверсивні навантаження пов'язані з пружним передеформуванням поверхневих шарів. Перехід в режим пружного циклічного деформування викликаний, з однієї сторони, зміцненням металу, а з іншої, пониженням ефективної амплітуди знакозмінного перемінного навантаження внаслідок полегшення умов тертя при появі продуктів зношування. Треба зазначити значний вплив мікронерівностей поверхонь які не однаково розподілені по висоті, та під час навантаження контакту нормальним зусиллям вони будуть стискатись по різному по площадці контакту. Одержанні авторами [36] аналітичні залежності для початкової тангенційної шорсткості контакту можна використати для оцінки пружно-пластичних властивостей зон фрикційного контактування конкретних типів з'єднань деталей машин, а також для розробки методів оцінки їх вібростійкості та демпфуючої здатності.

Далі процеси розвиваються за звичайними законами для втоми [18] попередньо розукріплені шари спочатку розвпорядковуються до певного рівня, а після цього (в умовах передеформування) відбувається їх нове укріплення з

наступним розукріпленням. Процеси від втоми супроводжуються інтенсивним утворенням вакансій, коалесценція яких приводить до виникнення пор.

Таким чином, розглянувши вищевикладене, можна зробити висновок, що фретинг-процеси пов'язані з механічним зношуванням в контексті структурних змін в матеріалах контактуючих поверхонь.

1.4. Аналіз методів підвищення фретингостійкості конструкційних матеріалів

Існуючі технологічні методи захисту від фретинг-корозії та підвищення фретингостійкості перш за все направлені на попередження чи уповільнення процесів фретингу. Серед них найбільшого застосування отримали: пластичне деформування поверхні, термічна, хіміко-термічна обробка, іонна імплантація, використання захисних плівок, обробка поверхні висококонцентрованими джерелами енергії.

Існують три основні шляхи підвищення зносостійкості при фретинг-корозії: конструкторський, технологічний і метод штучного розділення контактуючих поверхонь (полімерні покриття, мастила, порошки) [2].

Розділення поверхонь дозволяє перенести відносний рух контактуючих поверхонь в проміжне середовище. Таким середовищем можуть бути пружні прокладки [37], полімерні [38] та композиційні покриття [39-41], змазки [42], свинцеві, мідні чи кадмієві покриття [2]. Позитивні результати отримали органічні композиційні плівки епоксидної смоли з включеннями мастила, високу фретингостійкість проявили фторопластові покриття. Основний недолік використання полімерних покриттів у нездатності витримувати циклічне навантаження в стані текучості, а для змазок – повністю розділяти взаємодіючі поверхні.

Надійність вузлів при фретинг-втомі збільшується, якщо середнє значення циклу не розтягує, а стискає. Утворення на поверхні деталей залишкових стискаючих напружень є одним з основних завдань підвищення

фретингостійкості [43]. При цьому використовують такі процеси, як обкатування поверхні роликками та шариками, чеканка роликками, дробоструменевий наклеп, та інше. За допомогою цих методів досягається значного підвищення фретингостійкості сталей, алюмінієвих та титанових сплавів.

На рис. 1.6 приведено порівняння показників фретинго-стійкості сталі 45 у нормалізованому стані і після різних видів обробки [2].

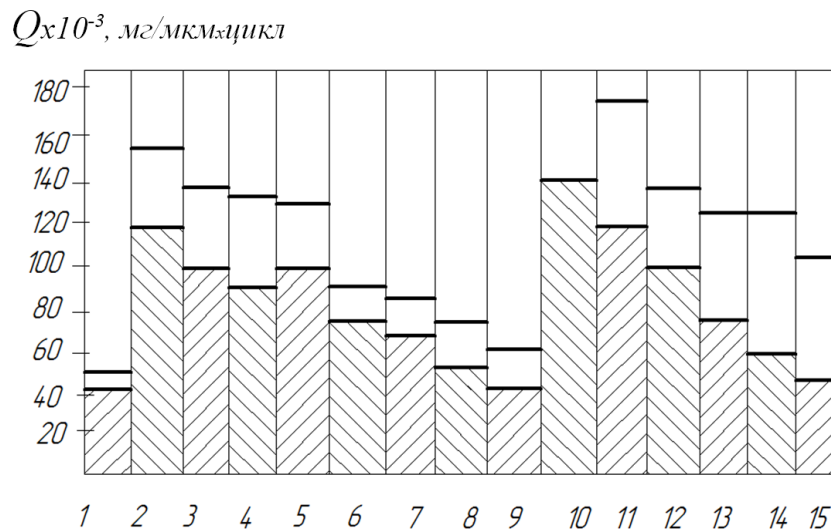


Рис. 1.6. Гістограма зносостійкості при фретингу зразків з сталі 45 у нормалізованому стані в залежності від модифікації поверхні: амплітуда вібропереміщень $A = 50$ мкм; частота $f = 30$ Гц; число циклів $N = 0,5 \cdot 10^6$;
 ▨ – питоме навантаження 10 мН/м^2 ; □ – питоме навантаження 50 мН/м^2 ;
 1 – нормалізований стан; 2 – віброшліфування; 3 – віброзміцнення;
 4 – пневмодробострумінна обробка; 5 – лудіння; 6 – сріблення;
 7 – кадміювання; 8 – фосфатування; 9 – свинцювання; 10 – алітування;
 11 – бороміднення; 12 – силіціювання; 13 – гартування СВЧ; 14 – гартування у печі; 15 – ванадіювання

Зміцнення поверхні пластичним деформуванням проявляється в області відносно невеликих питомих навантажень. При питомих навантаженні 10 мН/м^2 фретингостійкість сталі 45, обробленої віброшліфуванням з віброзміцненням, порівняно з сталлю 45 в нормальному стані зростає в 4 рази, а

при питомому навантаженні 50 мН/м^2 – лише в 2,5 рази. При алітуванні зносостійкість при фретінгу збільшується в 4 рази. Це пояснюється тим, що при алітуванні утворюється стійка окисна плівка, яка має хороші захисні властивості. Але алітування на глибину від 0,1 до 0,2 мм призводить до зменшення міцності. Високу ефективність дає зміцнення сталевих деталей композиційними боридними структурами. Зношування композиційних боридних структур у 16-18 разів менше порівняно із загартованою сталлю 45. Це пояснюється їх високою мікротвердістю, низькою здатністю до схоплювання та високою демпфуючою здатністю. Дифузійні процеси, такі як азотування та хромування, корисні для підвищення міцності від втоми в умовах фретінгу, але при цьому має існувати оптимальна товщина покриття.

Перспективним для підвищення фретингостійкості деталей є електроіскрова обробка та оброблення лазерним випромінюванням [44 - 49]. Виконані експерименти [50 - 51] з вуглецевими сталями, малолегованими та високолегованими сплавами, обробленими лазерним випромінюванням при густині потужності $10^5 - 10^6 \text{ Вт/см}^2$ продовж імпульсу від 5 до 7 мс, показали, що зносостійкість опроміненої поверхні зростає у 1,5 - 3 рази. Дослідження триботехнічних властивостей поверхонь із нанесеними двошаровими покриттями у вигляді сполук In-Ni, Ag-Ni, Cu-Ni, Cd-Cr з сумарною товщиною 6-12 мкм, оброблених випромінюванням твердотільного неодимового лазера з густиною потужності від 10^7 до 10^9 Вт/см^2 дозволяють говорити про те, що коефіцієнт тертя в умовах малоамплітудного фретінгу у 5-10 разів менше, ніж для вихідних поверхонь.

Іонна імплантація – це технологічний процес, який дозволяє осаджувати на поверхню та в середину твердого тіла практично будь який елемент та формувати захисні властивості поверхневого шару. Іонні покриття дають тертя від 10 до 17 % менше, ніж плівки, осаджені з парової фази в вакуумі [52].

Дослідження зношування сталі 45 (HRC 45...47) показало, що при проникненні барію формується окисна плівка (BaTiO_3), яка має високу пластичність та міцність. При цьому міцність збільшується більш ніж на 30 %.

При включенні легких елементів (В, N, Al), їх іони займають положення в міжвузлах кристалічної решітки, що близько до ефекту загартування. Дослідження сплаву Ti-6Al-4V на фретинг-зношування за схемою перехресування циліндрів найкращий результат дало для іонів V^{+} та N^{+} [53]. Значне підвищення фретингостійкості отримано при комбінованій імплантації сумішшю Sn^{+} та N^{+} . При цьому утворюється тонка плівка олова з включеними в неї іонами азоту [54]. Обробка нержавіючої сталі SUS440C, яка використовується для підшипників кочення, зменшила фретинг-зношування до 100 разів [55].

За допомогою лазерної хіміко-термічної обробки (ЛХТО) можна створити шари з специфічними властивостями [56-61]. При цьому, завдяки взаємній розчинності заліза та перехідних металів в рідкому стані легований шар може мати всі властивості, які характерні для об'ємних сплавів. ЛХТО широко використовується для обробки деталей автомобілів. Це дозволило у 1,5-2 рази підвищити довговічність та надійність їхньої експлуатації [56].

Дослідження на зносостійкість при фретингу сталей з різним вмістом вуглецю після ЛТХО показали, що при амплітуді 30 мкм мінімальне зношування мали зразки з вмістом вуглецю менше 0,3% та більше 0,7% [57]. В роботі [58] досліджені на фретингостійкість леговані сталі ХВГ, Р6М5, Р9, Х12М, 35ХГСА та інші, тверді сплави типу ВК з різним вмістом кобальту. Оптимізація технологічного процесу за критерієм зношування при фретингу забезпечило підвищення експлуатаційної довговічності у 1,5-3 рази.

Дослідження сталей 20Х, чавуну СЧ20 показали, що метастабільна структура отримана лазерним опроміненням, забезпечила підвищення зносостійкості машинобудівних матеріалів у 2 рази, а опромінення титанового сплаву ВТЗ-1 підвищило зносостійкість у 1,5 - 3 рази [61]. Силова взаємодія в зоні контакту збільшує степінь закінченості фазових перетворень у поверхневому шарі, підвищує пластичність при високій твердості. Це пояснюється тим, що процес зношування відбувається за рахунок фретинг-втоми та утворення мікротріщин, а накопичення окислів і абразивних частинок

відбувається менш інтенсивно. Перспективним напрямком підвищення зносостійкості сталевих деталей є фрикційно-електрична модифікація поверхонь тертя [62 - 65], яка збільшує фретингостійкість від 1,2 до 1,4 разів.

В результаті проведених досліджень авторами [66 – 75] запропоновано шляхи створення методів формування функціональних поверхонь і матеріалів з необхідними керованими властивостями та методів оцінювання і прогнозування фретинг-корозійної сумісності та зносостійкості елементів трибосистем. Визначено закономірності та механізм зношування матеріалів при одночасній дії тангенціальних вібраційних мікропереміщень і нормальних до поверхні контакту динамічних навантажень.

Відомий цілий ряд умов, необхідних для забезпечення стану зносостійкості та антифрикційності [76,77]. Відповідно антифрикційність визначається наступними властивостями матеріалів пари тертя: здатністю забезпечувати більш низьку температуру на поверхні тертя, яка попереджує руйнування граничного змашувального шару від руйнування (висока теплопровідність, температуропровідність, теплоємність); властивістю матеріалу легко деформуватися при терті, в результаті чого досягається перерозподіл навантаження та зниження місцевих питомих тисків і температури; властивістю матеріалу давати при навантаженні відносно велику пружну (квазіпружну) деформацію (внаслідок низької величини модуля пружності), в результаті чого також досягається більш рівномірний розподіл навантаження на поверхні тертя; властивістю утворювати міцний граничний шар мастила (підвищення теплоти змочування); властивістю після місцевого руйнування граничного шару мастила забезпечувати низький коефіцієнт тертя та здатні попереджувати заїдання.

В працях Костецького Б. І. [11, 12] стан антифрикційності пов'язується з відсутністю будь-якого виду руйнування основного металу, локалізацією руйнування в тонких поверхневих шарах вторинних структур, динамічною рівновагою їх утворення та руйнування. Тому існують спеціальні вимоги до матеріалів: здатність до утворення та регенерації вторинних структур, які

екранують поверхні від зчеплення та покращують ефект змащування; при порушенні динамічної рівноваги процесів утворення та руйнування вторинних структур матеріали пар тертя мають виявляти невисоку схильність до схоплення для попередження зчеплення при підвищенні температури в зоні контакту матеріали повинні мати високу теплопровідність та теплоємність. Вказані структурні особливості антифрикційності матеріалу мають забезпечити рівномірний розподіл напружень у поверхневих шарах контактуючих металів та знижувати деформаційну складову сили тертя.

На теперішній час немає єдиного механізму процесу зчеплення металів внаслідок фретингу. Вважається, що при наближення двох поверхонь при умові, коли забезпечується міжатомна взаємодія, на ділянках фактичного контакту виникає металічний зв'язок, який викликає адгезію, що і призводить до зчеплення. Також умовою для утворення міцних зв'язків між металами є відсутність на взаємодіючих поверхнях різноманітних плівок та забруднень.

1.5. Висновки до розділу 1 та основні завдання досліджень

1. Виходячи із виконаного аналізу процесів, що відбуваються на контактуючих поверхнях різних конструктивних з'єднань виявлено, що діапазони функції збурення амплітуд та частот коливань вузлів транспортних засобів на розбитій ґрунтовій дорозі при різних швидкостях руху, які лежать у межах: частота від 1 до 60 Гц та амплітуда від 1 до 200 мм., що призводить до виникнення у номінально-нерухомих з'єднаннях коливань з відповідною частотою та амплітудами від 10 до 70 мкм.

2. Більші можливості уповільнення фретиг-корозії має вдосконалення технологічних способів застосування покриттів, що забезпечують кращі експлуатаційні показники зносостійкості, енергоощадністю та іншими вимогами сучасного етапу виробництва машин.

3. Недостатня вивченість явищ, що відбуваються у номінально-нерухомих з'єднаннях з позицій фізичної хімії твердого тіла обумовлює потребу

подальших досліджень у цьому напрямку.

Таким чином, 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 на основі Bi-Pb-Sn-Cd та встановити характер змін відносного мікроелементного складу в зоні фретингу при введенні легкоплавкого композиту;
- розробити технологію нанесення покриття на основі легкоплавкого сплаву та вивчити його працездатність з урахуванням умов експлуатації та впливу зовнішнього середовища.

РОЗДІЛ 2

УСТАНОВКИ І МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Установа для дослідження зразків на фретинг-зношування по схемі площа-площа

Для дослідження матеріалів на фретинг-корозію, була використана установка, зображена на рисунках 2.1., 2.2. [78].

На основі 20 розташовані механізм перетворення обертового руху в зворотно – поступовий та система навантаження зразків. Загальний привід здійснюється двигуном змінного струму потужністю 1,5 кВт на вал 1, на якому закріплені направляючі 2 рухомого повзуна 4. За допомогою гвинтової пари 3 встановлюється необхідне положення повзуна 4 разом з валом 5, згідно вибраної амплітуди вібропереміщень. Отриманий ексцентриситет фіксується затиском гвинтів 6. Зміщення осі вала 5 відносно вала 1 грає роль кривошипа (рис. 2.1). Через шатун 8 передається коливальний рух кулісі 9, який являє собою систему затисків зразкотримачів.

За допомогою рухомих губок затискується рухомий зразкотримач 10 та нерухомий 11 у аналогічному затиску 12. Напрямні 18 вертикального руху затисків встановлені на трьох колонах 19 та можуть встановлюватися в необхідні положення у залежності від висоти зразків 11. Затиски верхніх зразків закріплені жорстко з валом 13, який має можливість само встановлюватися та фіксуватися в головці 17. Через важіль 15 досліджувана пара навантажується нормальною силою.

Технічна характеристика: частота вібрації рухомого зразка: 70, 60, 50, 40, 30, 20 Гц; амплітуда відносного проковзування: 10 ... 100 мкм; максимальний тиск: 140 МПа; потужність: 1,5 кВт.

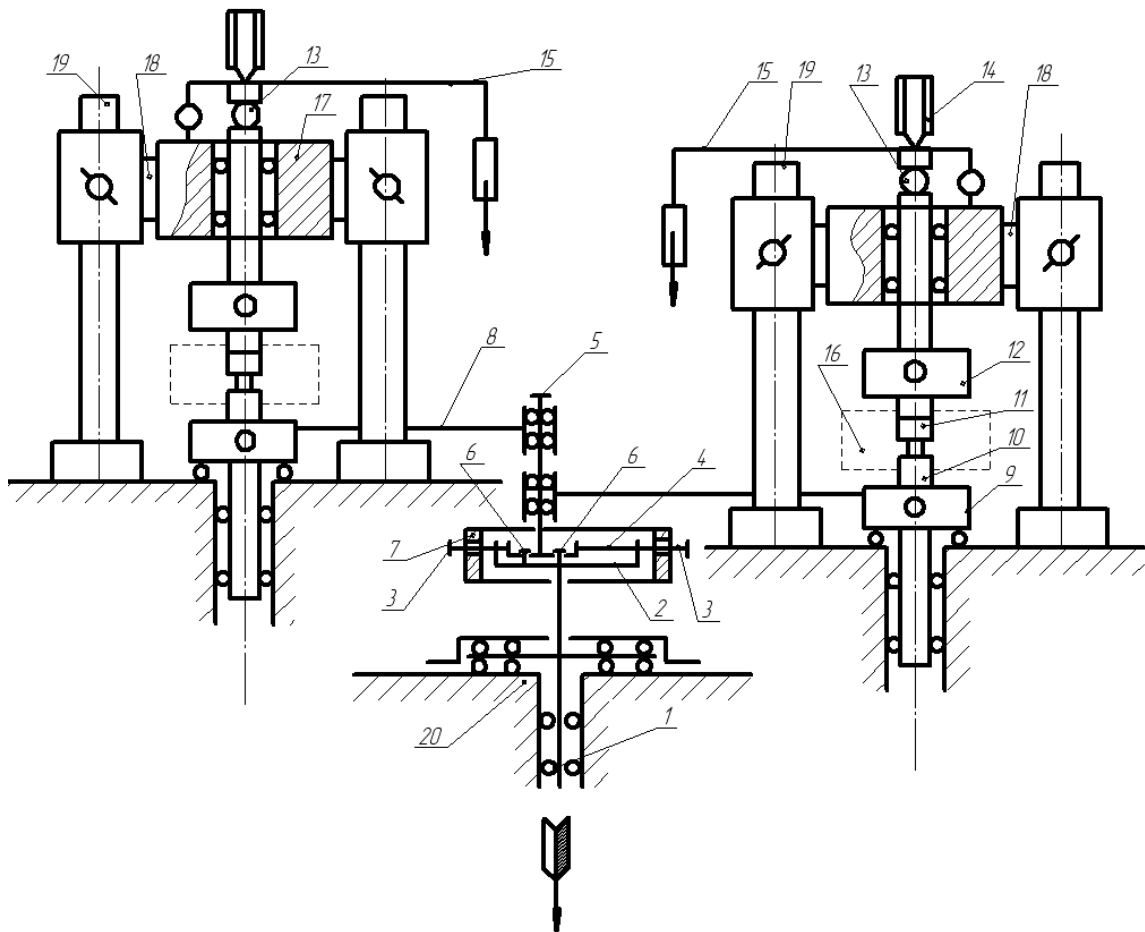


Рис. 2.1. Принципова схема установки для дослідження на фретінг - зношування: 1 – вал; 2 – напрямні; 3 – гвинтова пара; 4 – рухомий повзун; 5 – вал; 6 – затискні гвинти; 7 – корпус; 8 – шатун; 9 – куліса; 10 – зразкотримач рухомий; 11 – зразкотримач нерухомий; 12 – затискувач; 13 – вал; 14 – датчик переміщень; 15 – важіль; 16 – ємкість для проведення фретинг-процесу; 17 – головка; 18 – напрямні вертикального руху затисків; 19 – колона; 20 – корпус

Установка споряджена цифровим омметром Щ-34 для вимірювання контактного електроопору, тензостанцією ТОПАЗ-3-01, осцилографом “Нева-ТМ”, мікрометрами моделі 217, вимірювачем шуму та вібрації ВШВ-003-М2. Сила тертя визначається тензодатчиками за величиною переміщення поверхні зразкотримачів та тарувальному графіку тензодатчиків, наклеєних на плоску поверхню зразкотримачів.



Рис. 2.2. Фотографія установки для дослідження на фретинг-зношування

Підготовка зразків

Креслення зразка та контрзразка зображені на рис. 2.3. Робоча поверхня зразків шліфувалась та доводилась до $Ra = 0,1-0,2$ мкм. Контртіло виготовлено з сталі 45 HRC 46-48. Номінальна площа контакту $S = 4,4 \times 10^{-5} \text{ м}^2$. Проведенні дослідження відповідали ГОСТ 23.211-80.

Очищені та промиті зразки встановлювали у зразкотримачі. Кріплення жорстке для запобігання зміщення зразків. Контроль прилягання поверхонь проводився за допомогою копійовального паперу. Контакт вважається щільним, якщо відбиток на просвіт має форму номінального контакту. Після центрування, положення верхнього зразка фіксується та поверхні протираються ацетоном. За допомогою рухомого повзуна встановлюється необхідна амплітуда зміщення нижнього зразка. Підключаються вібродатчики.

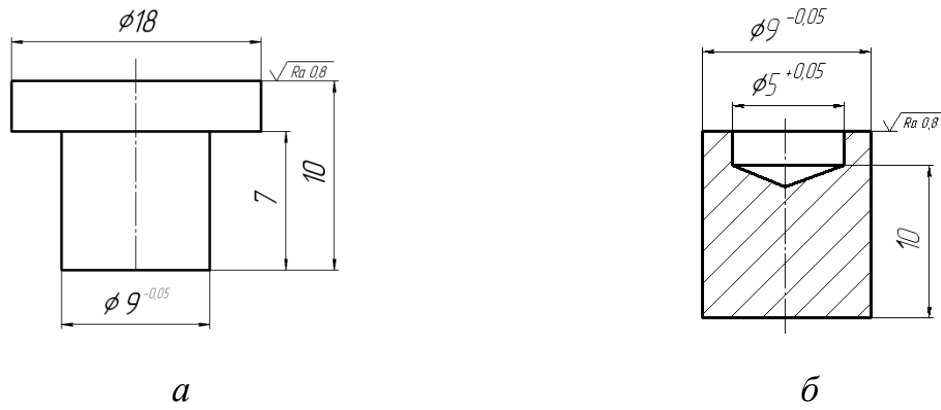


Рис. 2.3. Робочі креслення зразка (а) та контрзразка (б) для досліджень на фретинг-зношування

По завершенні певної кількості циклів зразок виймається та протирається бензином. Шар окислу з доріжки тертя знімається ортофосфорною кислотою. Дослідження проводились не менше ніж на п'яти парах тертя.

Методика вимірювань та обробка результатів

В процесі досліджень визначались наступні параметри: сила тертя, коефіцієнт тертя, нормальне переміщення в стику при фретингу, віброшвидкість та віброприскорення нерухомого зразка, масове зношування, інтенсивність зношування.

Зразкотримачі представляють собою пружну балку певної жорсткості, на яку наклеєні тензодатчики. Для тарування сили тертя зразки навантажувались набором наважок за схемою, аналогічній дії сили тертя при фретингу.

Сигнал розбалансу тензометричного моста підсилюється тензопідсилювачем "ТОПАЗ-3-01" та виводиться на шлейфовий осцилограф "Нева-ТМ" (рис. 2.4). Відхилення світлового променя відповідає певній силі тертя. Величина сили тертя визначалась як середньоарифметичне значення п'яти вимірів на осцилограмах.

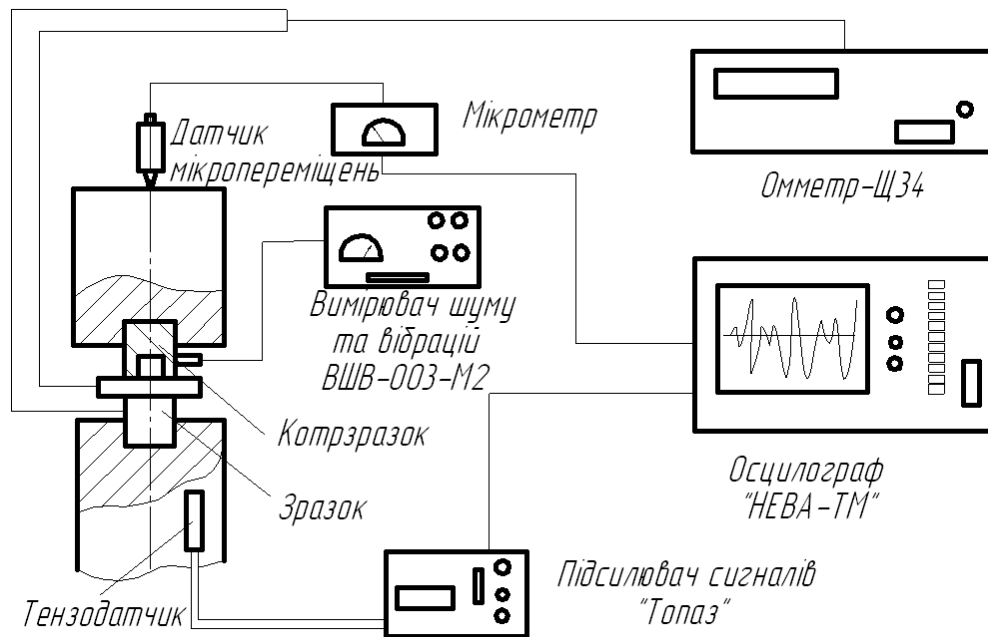


Рис. 2.4. Схема підключення контрольних і вимірювальних приладів при дослідженні пари тертя на фретинг-зношування

Підсилені сигнали від датчиків мікропереміщень дозволяють фіксувати мікропереміщення з точністю 0,5 мкм по шкалі даного приладу. Для дослідження нормальних віброколиваний при терті та неперервному записі в стикі мікрометр підключається до осцилографа. Амплітуду коливаний визначають як середнє на шляху тертя пройденому за одну секунду. Частота вібраційних коливаний вираховується за формулою:

$$f = \frac{1}{n}, \quad (2.1)$$

де n – кількість коливаний за 1 секунду.

Масове зношування визначали на аналітичних терезах ВЛР-200М з точністю до 0,00015 г при температурі 18-22°C.

Інтенсивність масового зношування:

$$I_m = \frac{\Delta m}{2 \cdot A \cdot N}, \quad (2.2)$$

де Δm – втрата маси, мг;

N – кількість циклів;

A – амплітуда, мкм.

Лінійне зношування визначається як середнє значення глибини фретинг-пошкоджень виміряних за допомогою профілографа-профілометра моделі 201 заводу “Калибр”, згідно методики ГОСТ 2789-73:

$$h = \sum \frac{h_i}{5},$$

де h_i – глибина фретинг-пошкодження в i -тому перерізі.

Інтенсивність зношування визначається за формулою:

$$I_h = \frac{h}{2 \cdot A \cdot N}. \quad (2.3)$$

Для оцінки фретингостійкості різних пар тертя використовувався критерій співвідношення питомого масового зносу зразків:

$$F = \frac{I_m}{I_{hm}}, \quad (2.4)$$

де $I_m = \Delta_m / 2AN$ – питома масове зношування вихідного матеріалу;

$I_{hm} = \Delta_{mh} / 2AN$ – питома масове зношування зразка з легкоплавким сплавом.

2.2. Установка для дослідження стану фрикційного контакту в умовах фретинга

Схема установки для дослідження стану фрикційного контакту в умовах фретинга надана на рис. 2.5 та в таблиці 2.1 приведено технічну характеристику установки.

Таблиця 2.1

Технічна характеристика установки для установки для дослідження стану фрикційного контакту в умовах фретинга

Нормальне навантаження, P	0...30 Н
Амплітуда коливань, A	1...60 мкм
Частота коливань, ν	5...1000 Гц
Температура зразка	292...402 К
Точність вимірювання амплітуди	$\pm 0,1$ мкм
Габарити, м	0,8 \times 1,0 \times 1,2
Маса	350 кг

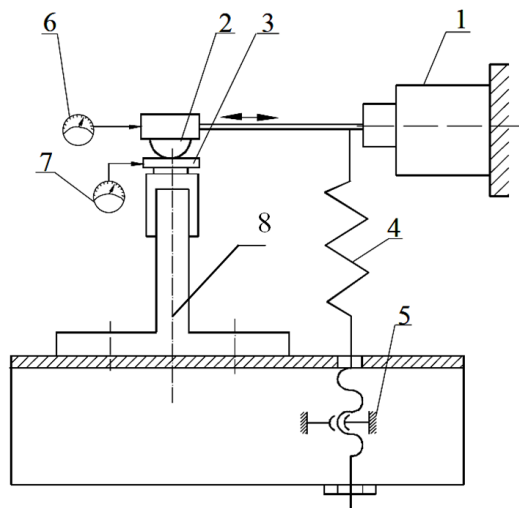


Рис. 2.5. Схема установки для дослідження стану фрикційного контакту в умовах фретинга: 1 – вібратор; 2 – кулька; 3 – плоский зразок; 4 – пружний елемент; 5 – гвинт; 6, 7 – датчики-мікрометри індуктивного типу; 8 – основа

На пружній балці розміщується плоский зразок 3. Кулька 2 закріплена на вібраторі 1 електромагнітного типу. Зсув кожного елементу контактної пари перевіряють за допомогою датчиків (6,7) індуктивного типу, зонди яких жорстко закріплені. Це виключає інерційні мікровпливи між зондом датчика і контрольного органу.

Нормальне навантаження формується пружним елементом 4 обертаннями гвинта 5. Контрзразок 2 через пружний елемент 4 та гвинтову пару 5 створює нормальний контакт з площиною зразка 3. З метою максимальної ізоляції джерела вібраційних коливань від об'єкту досліджень 3, механічна система 1,2 розташована окремо на масивній основі. Зразок 3 разом з тензометричною балкою кріпиться на основі 8.

Вібраційний електромагнітний привод коливань 1 потужністю 120Вт створює тангенціальні циклічні переміщення. Амплітуда коливань регулюється напругою, а частота – за допомогою генератора низькочастотних імпульсів ГЗ-309 через підсилювач «Radiotechnika». Схеми контактування: “кулька – площина”, або “площина – площина”.

На рисунку 2.6 показано загальний вигляд установки для дослідження стану фрикційного контакту при малоамплітудному фретингу та детальний вид системи контактування.



Рис. 2.6. Фотографія загального вигляду установки для дослідження стану фрикційного контакту при малоамплітудному фретингу

Установка оснащена аналого-цифровим комплексом і програмним забезпеченням для автоматичного запису сигналів від тензодатчиків та датчиків мікропереміщень для коректної часової розгортки сигналу і відтворення його у цифровому вигляді та їх математичної обробки.

Вимірювання мікропереміщень здійснювалось індуктивним давачем - мікрометром моделі 217 заводу «Калібр». Вимірювальна схема ґрунтується на частотній та фазовій модуляції сигналів. На відміну від мостової схеми, яка живиться напруженням низької частоти і обмежує частотний діапазон вимірювання, частотна модуляція дозволяє без екранування вимірювати вібрації частотою до 1500 Гц. Використання на виході підсилювача постійного струму дозволяє виконувати статичне тарування, що значно підвищує точність проведення експерименту. За годину прогріву приладу «нуль» практично встановлюється у сталому положенні.

Тарування датчиків здійснюється статичним або динамічним способом. За допомогою мікрометричної головки і аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) мікроскопа ІМЦ-100 задається мікропереміщення рухомої частини датчика і фіксується відповідна сила струму. Цей сигнал через пристрій датчика і АЦП виводиться на екран комп'ютера і записується в окремий файл [79].

Візуальний моніторинг за коливаннями і цифровою обробкою інформації здійснювався через розроблений авторами [56, 80] програмний продукт Dual ADC.

2.3. Матеріали, що досліджувались

В якості матеріалів для дослідження були вибрані матеріали, що широко використовуються для виготовлення деталей та конструкцій у транспортних засобах.

Наконечники штанг передньої підвіски, петлі тягово-зчепного пристрою причепа виготовляються з сталі 45 (Fe – 98,23 %; С – 0,45%; Mn – 1,39 %; Si – 0,29 %; Cr – 0,09 %). Корпус рульового механізму та вузли кріплення баків для перевезення різних речовин виготовляються з сплаву на основі алюмінію АЛ4 (Al – 94,43%; Cu – 4,77%; Fe – 0,28%; Mn – 0,33%; Zn – 0,19%). Шк ворневі втулки вузла повороту колеса та втулки поршневих пальців виготовляються із

сплаву Л63 на основі міді (Cu – 60,07%; Zn – 36,45%; Si – 0,22%; Fe – 0,12%; Co – 0,09%; Ni – 0,05%).

В дослідженнях застосовувались: армко-залізо – низьковуглецева нелегована сталь, яка має домішки до 0,08-0,1 %, вуглецю до 0,02 % та леговані сталі 40ХНМА, ЭИ268, ЖС6-К, ЭИ481, ЭИ703.

Для досліджень з метою уповільнення фретинг-корозії застосовувався легкоплавкий сплав у порошковому стані та пасти припою складом: Ві – 50,1%, Sn – 14,2%, Рь – 24,9%, Cd – 10,8% з температурою плавлення 65,5°C.

У випадку, коли поверхня зразків покривалася легкоплавким сплавом, коефіцієнт, який враховує пружні властивості матеріалів η визначався зняттям площинки контакту з подальшим перерахунком по приведеним вище формулах.

В якості агресивного середовища для досліджень використовувалась водяна суміш алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів та одноатомних та багатоатомних спиртів, тобто ті органічні сполуки, які попадають на деталі транспортних засобів при їх безпосередній експлуатації.

2.4. Технологічне обладнання та методика дослідження характеристик трибо-елементів

2.4.1. Металографічний аналіз та дослідження

Аналіз мікроструктури проводили на мікрошліфах. Дослідження проводились на металографічному мікроскопі МИМ-10 (рис. 2.7) та на цифровому порівняльному мікроскопі «Leica FS CB» (рис. 2.8). Мікрошліфи готувались за методикою, викладеною у [81].

Для травлення використовувались травники:

- а) трьохпроцентний розчин азотної кислоти в метилову спиртї ;
- б) розчин хлорного заліза 25 мл, соляної кислоти 40 мл, води 100 мл ;
- в) розчин плавикової кислоти – 1 частина, азотної кислоти – 2 частини, води – 4 частини.



Рис. 2.7. Фото загального вигляду металографічного мікроскопу МИМ-10



Рис. 2.8. Фото загального вигляду цифрового порівняльного мікроскопа
«Leica FS CB»

Застосування цифрового порівняльного мікроскопу "Leica FS CB" з моторизованим змінником збільшення зображення дозволяє виявити найдрібніші деталі поверхні.

2.4.2. Рентгенівський флуоресцентний аналіз

Найбільш перспективним методом аналізу металів та сплавів є рентгенівський флуоресцентний аналіз (РФА), якому властиві висока експресність, точність і відтворюваність визначень як значних, так і малих вмістів елементів.

З цією метою використовувалось спеціальне обладнання, портативний рентгенофлуоресцентний спектрометр «ElvaX» (рис. 2.9).

Цей прилад являє собою нове покоління аналітичного обладнання для високоточного аналізу елементного складу речовин, який одним з перших у світі рентгенівських спектрометрів об'єднав точні характеристики коштовного стаціонарного лабораторного устаткування з економічністю і простотою експлуатації автоматизованих настільних вимірювальних систем.

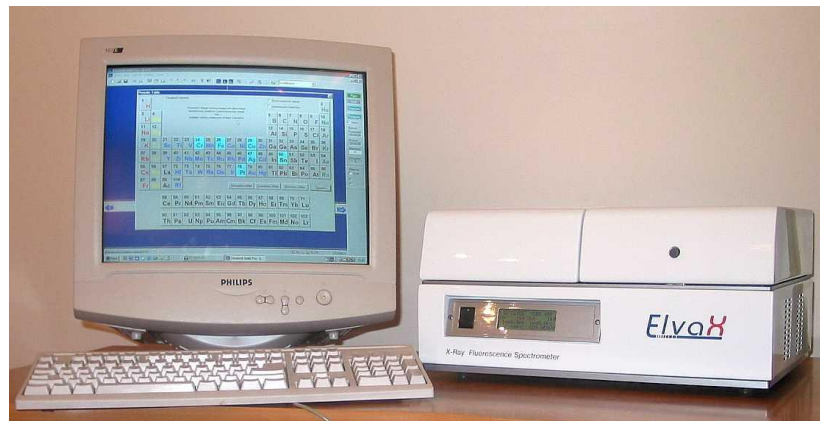


Рис. 2.9. Фотографія портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра «ElvaX» з програмно-методичним забезпеченням роботи

Основними конструктивними вузлами рентгенофлуоресцентного спектрометра є джерело первинного випромінювання (рентгенівська трубка), камера для вміщення зразків та система диспергування і реєстрації спектрів.

До окремих переваг прилада можна віднести малі габаритні розміри (500×400×240 мм), малий час вимірювання зразка (від 10 до 1200 с), точність визначення елементів ($\pm 0,3\%$), наявність програмно-методичного забезпечення,

яке не потребує від персоналу спеціальної підготовки. Теоретично метод дозволяє аналізувати елементи від бора до урану, але даний рентгенофлуоресцентний аналізатор працює у діапазоні елементів від ^{11}Na до ^{92}U . Основою метода є залежність інтенсивності аналітичних ліній елементів від їх масової долі в зразку. Об'єктами аналізу можуть бути металеві зразки, що знаходяться в різних фізичних станах: розчини, порошкоподібні та тверді матеріали. Прилад має хорошу відтворюваність визначень як значних, так і малих вмістів елементів в пробах.

Збудження аналітичних ліній елементів, що входять до складу зразка, здійснюється гальмівним, або змішаним первинним випромінюванням, джерелом якого є рентгенівська трубка. Вимірює інтенсивність аналітичної лінії в результаті взаємодії первинного та вторинного випромінювання з матеріалом проби залежить не тільки від масової долі елемента, але і від хімічного складу проби.

Характеристична складова аналітичного сигналу формується рядом фізичних процесів: генеруванням вторинного випромінювання потоком первинного випромінювання, фільтрацією первинного випромінювання атомами визначуваного елемента, вибірковою поглинанням первинного випромінювання, вибірковою збудженням вторинного випромінювання, послабленням випромінювання аналітичної лінії безпосередньо в пробі.

Спектр флуоресцентного випромінювання є індивідуальним для кожної речовини, що дає можливість його використання для визначення елементного складу металів та сплавів (рис. 2.10). Точність аналізу характеризується двома чинниками: правильністю і відтворюваністю. Під правильністю розуміється відсутність розбіжностей результатів аналізу, чи їх незначних відхилень від істинного вмісту елементів в зразку. Відтворюваність свідчить про те, наскільки окремі результати аналізу різняться від середнього значення.

Чутливість визначень – це найменший вміст елемента, який можна визначити з похибкою, визначеною в межах конкретної методики. Межа чутливості визначається мінімальним вмістом, який обумовлює таку

інтенсивність аналітичної лінії, яку ще можливо виділити на загальному фоні.

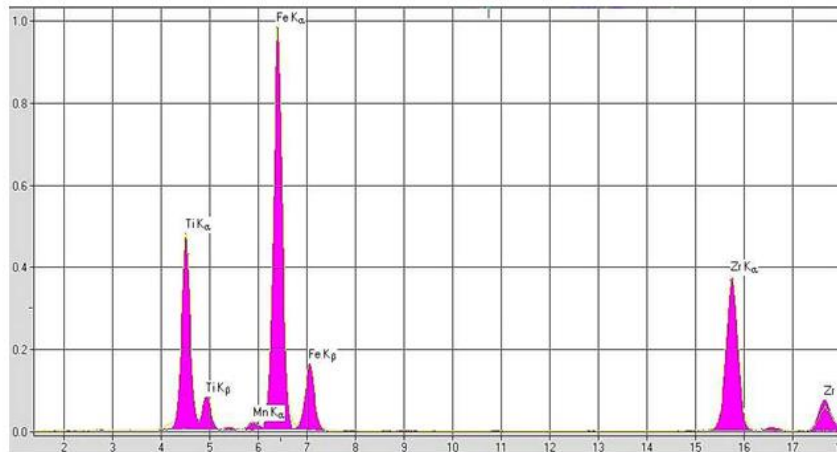


Рис. 2.10. Спектр флуоресцентного випромінювання металевого порошку

Точність та інші вищезгадані характеристики методики розраховують на основі даних контрольних експериментів. Обробка результатів цих дослідів методами математичної статистики дає об'єктивну оцінку можливостей методики.

2.5. Газовий хроматограф «Кристал-2000М»

Газовий хроматограф є пристроєм для аналізу складних газових речовин шляхом їх диференціювання на монокомпоненти. Далі компоненти суміші піддаються аналізу на предмет якісних і кількісних характеристик. Принцип дії хроматографа ґрунтується на застосуванні методів газо-адсорбційної і газорідинній хроматографії в ізотермічному режимі, в режимі лінійного програмування температури термостата колонок.

Хроматограф конструктивно є настільним приладом, що складається з функціональних вузлів: термостата колонок, електронного блоку, випарників, детекторів, регуляторів витрати газу розміщених в єдиному корпусі рис. 2.11.

Електронний блок хроматографа має панель управління зі вбудованою клавіатурою, текстовим дисплеєм. Вбудоване програмне забезпечення контролеру дозволяє робити самодіагностику хроматографа і захищене від умисних або неумисних змін. Вихідні сигнали детекторів і інформація про

параметри управління хроматографа передаються на комп'ютер за допомогою оригінального протоколу обміну по цифровому інтерфейсу.



Рис. 2.11. Фотографія загального вигляду газового хроматографу «Кристал-2000М»

Метод аналізу вирізняється високою абсолютною та відносною чутливістю та дозволяє з великою точністю визначати в розчинах біля вісімдесяти елементів з малими концентраціями. Чутливість більшості елементів лежить у інтервалі від 0,005 до 1^{-10} мкг/мл, при цьому використовується від 0,1 до декількох мілілітрів розчину.

2.6. Обробка експериментальних даних та оцінка точності отриманих результатів

Для зменшення випадкових помилок проводили контрольні вимірювання, а для видалення систематичних помилок усі вимірювальні прилади були повірені та протаровані.

Основні дослідження проводились як однофакторні, тобто змінювався один фактор при сталості всіх інших. Кількість основних дослідів вибиралося не менше п'яти згідно з рекомендаціями [82,83], а місця перегину кривих досліджувалась додатково п'ятьма дослідженнями.

Обробка результатів експериментів проводилась із застосуванням методів математичних статистики. Визначалось середнє арифметичне значення вимірювань:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2.5)$$

де N – кількість вимірювань;

x_i – значення величини яка вимірюється в i - дослідженні.

Абсолютна похибка вимірювання визначалися за формулою:

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X}. \quad (2.6)$$

Середнє значення відхилення змінної:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2}{N - 1}}. \quad (2.7)$$

Величина стандартного відхилення середнього значення:

$$\delta_m = \frac{\delta}{N}.$$

Графічні залежності будували за середнім значенням відповідних серій досліджень.

РОЗДІЛ 3

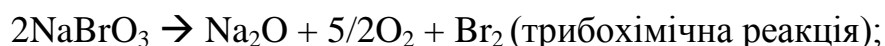
ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА ФРЕТИНГ-КОРОЗІЇ

Складність фретинг-процесів полягає у тому, що поряд із механічними факторами в них значну роль відіграють трибохімічні процеси, пов'язані зі структурними змінами в поверхневих шарах контактуючих матеріалів. Повний механізм фретинг-процесів далеко не вивчений: не дивлячись на значний період розвитку теорії не зрозуміло наскільки обґрунтоване перенесення на складні молекулярні системи тих математичних прийомів і методів, які виявились ефективними при розрахунках найпростіших механічних систем. При цьому, пояснити численні встановлені експериментально, порівняно прості якісні трибохімічні закономірності та кількісно передбачити властивості різних отриманих сполук, досить важко.

Більшість вузлів тертя працюють в хімічно активних середовищах і виготовляються з металів або їх сплавів, які є термодинамічно нестійкими. Це обумовлює протікання між ними трибохімічних реакцій [84].

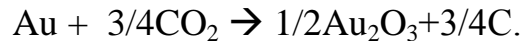
З одного боку трибохімічні реакції відносяться до потужних релаксаційних процесів, що сприяють дисипації підведеної до твердого тіла механічної енергії, а з іншого боку вплив трибохімічних явищ на процеси тертя та зношування металів пов'язаний із властивостями, складом, кількістю продуктів гетерогенної взаємодії [84], що залежать для певного трибо-спряження і умов його навантаження від хімічної активності оточуючого середовища.

Але трибохімічні реакції досить відрізняються від термічних. Для прикладу можна навести наступні реакції [85] (розкладання броматів):



Так звичайні хімічні реакції ідуть при значно нижчих температурах ніж трибохімічні. Тому при відсутності механічних напружень на утворення оксидної плівки товщиною 0,5 мкм для деяких легованих сталей необхідно було би 10^{17} років.

Цікаво, що можливий перебіг реакцій, які неможливі при нагріванні. Для прикладу відбувається окислення такого металу як золото:



Деякі реакції ідуть із позитивною зміною вільної ентальпії $< G$:



Трибохімічна рівновага відрізняється від теплової рівноваги, а всі трибологічні процеси суттєво відрізняються від хімічних [85, 86].

3.1. Енергетична картина фретинг-процесів

Для будь якої відкритої системи, до якої відноситься і трибосистема, виконується концепція збереження енергії [2], яка характеризується виникненням стаціонарних нерівноважних станів з високим ступенем неупорядкованості. Опис системи тертя з позицій термодинаміки в своїх роботах [87-89] запропонували Klamecki P., Varney E. та Гутман Э. М.

Процес зношування відбувається з перерозподілом речовини та пов'язаний з поняттям ентропії, при цьому термодинамічна модель базується на двох основних постулатах:

- в ізольованій системі ентропія позитивна, тобто $S \geq 0$, а в рівноважному стані ентропія наближається до максимуму;

- ентропія системи S залежить від термодинамічних параметрів матеріалу, внутрішньої енергії U , градієнта деформації F , площі взаємодії A та маси m , $S = S'(U, F, A, m)$.

В роботі [87] описане існування нульової швидкості відносного проковзування між тілами. Все це вказує на те, що проковзування є нерівноважним процесом. Для опису даного процесу Barney E., Klameski P. використовують класичну концепцію збереження енергії. Модель процесу розсіювання енергії описується системою двох рівнянь. Нелінійність моделі надає різноманітні можливості в поведінці системи.

Згідно першого закону термодинаміки для рівноважних процесів зміна енергії системи пов'язана з роботою W та з теплотою Q . Енергія системи при цьому складається: з внутрішньої енергії U , кінетичної енергії E_k , потенціальної енергії E_p , поверхневої енергії G :

$$dU + dE_k + dE_p + dG = dQ - dW. \quad (3.1)$$

Внаслідок виникнення та розвитку дисипативних структур ентропія системи буде значно більшою, ніж ентропія окремих процесів:

$$\frac{dS_c}{dt} \geq \frac{dS_i}{dt}. \quad (3.2)$$

Виникають специфічні структурні шари по типу дислокаційних кластерів. Фретинг-процеси характеризуються нерівноважним станом при якому відбувається перерозподіл напружень та дисипація енергії. Надлишок енергії в системі викликає утворення дефектів структури – вакансії, включення та дислокації. Зміна ентропії системи з часом має наступний вигляд:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_i}{dt} + \frac{dS_c}{dt}, \quad (3.3)$$

де dS_i – ентропія нерівноважного процесу в системі протягом часу dt ;
 dS_c – зміна ентропії системи.

На dS_c не існує ніяких обмежень. В залежності від умов вона може бути як позитивна так і негативна. Зміна ентропії може бути від'ємною, якщо енергія підводиться до системи таким чином, що потік ентропії з неї більший, ніж її утворення.

Для більшості випадків система представляє собою геометричний простір дефектів кристалічної ґратки та на значення ентропії впливає лише скалярна компонента. В такому випадку збільшення ентропії визначається лише числом дефектів n .

$$d_i S_n = \frac{dS}{dn} dn \geq 0. \quad (3.4)$$

Взаємодія системи тертя з її зовнішнім оточенням супроводжується анігіляцією дефектів, що проявляється в зменшенні енергії контактуючих тіл.

Barney E., Klameski P зробили спробу проаналізувати дисипацію енергії при контактуванні двох тіл, виходячи з природи двох процесів: зміни кристалічної структури матеріалу та виділення тепла. Система реагує на збільшення енергії таким чином, що виникають дисипативні процеси. Вони проходять в часі в результаті структурних змін разом з розсіюванням енергії. В результаті чого в приповерхневому шарі формуються вторинні структури.

Подальший розвиток термодинамічного підходу до вивчення процесів тертя та зношування отримано в роботах В. В. Шевелі [90], М. А. Буше, [91] І. С. Гершмана [92]. В 70-х роках минулого століття Л. Бершадським був сформульований «принцип дисипативної гетерогенності», відповідно до якого система намагається сконцентрувати всі види взаємодії в тонких поверхневих шарах. Вторинні структури при фретингу відіграють захисні функції, які обмежують розповсюдження взаємодії в середину твердих тіл та запобігають їх безпосередній взаємодії. При цьому від 90 до 98 % енергії тертя акумулюється у вторинних структурах.

Як показано в роботах [92-94] на ранніх стадіях фретингу нерівноважний стан виникає при наявності не нульової сили тертя. Тоді утворення вторинних структур є процесом самоорганізації, який проходить із зменшенням ентропії твердого тіла.

Відповідно, до запропонованої Г Ніколісом і І. Пригожиним [95] схеми, зміна ентропії системи складається з двох частин:

$$dS = dS' + dS_{\text{внутр}}, \quad (3.5)$$

де dS' – потоку ентропії зумовленої взаємодією тіла з оточуючим середовищем;

$dS_{\text{внутр}}$ – потоку ентропії пов'язаного з процесами всередині самої системи:

Потік ентропії зумовлений взаємодією з оточуючим середовищем (dS') буде зростати внаслідок притоку речовини та енергії з оточуючого середовища, а її зменшення проходить внаслідок розсіювання енергії в тілі ($dS_{\text{внутр}}$). Баланс ентропії при фретингу визначається наступним чином:

$$dS = dS'_{\text{ex}} - dS'_{\text{eux}} + dS_{\text{внутр}}. \quad (3.6)$$

Швидкість зміни ентропії за проміжок часу становить:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS'_{\text{ex}}}{dt} + \frac{dS'_{\text{eux}}}{dt} + dS_{\text{внутр}}. \quad (3.7)$$

Стаціонарний стан вторинних структур в умовах фретингу характеризується мінімумом ентропії:

$$\frac{dS_{\text{внутр}}}{dt} \rightarrow \min. \quad (3.8)$$

Малоамплітудні фретинг-процеси характеризуються нерівноважними станами, які є наслідком неперервного перерозподілу напружень та дисипації енергії в контакті. Перехід з одного нерівноважного стану в інший супроводжується еволюцією субструктури в номінальному контакті твердих тіл. Стан вторинних структур при малоамплітудному фретингу характеризується мінімумом ентропії.

Відомо, що в термодинаміці нерівноважних процесів [95, 96-98] для виникнення нових структур необхідне виконання наступних умов: необхідний обмін енергії речовини з оточуючим середовищем, мікроскопічні процеси мають проходити узгоджено, відхилення від рівноваги перевищують критичні значення, динамічні рівняння системи нелінійні.

Прикладом використання енергетичної теорії при моделюванні тертя може служити модель А. Дубініна [99]. Вона побудована на уявленні реальної поверхні контакту у вигляді сукупності деяких сферичних частинок, які піддаються пластичному деформуванню подібно до атомної взаємодії мікрооб'єктів в контакті. При цьому мова не йде про вирішення задачі контактування за допомогою використання сфер як геометричних тіл. Нижче наведені деякі положення, які лежать в основі такого уявлення:

- на початковій стадії поверхневі частинки перебувають в деякому енергетичному стані;
- при наявності ненульової швидкості ковзання виникають нестационарні електричні та температурні поля, які характеризуються високими градієнтами потенціала та температури;
- внаслідок механічної взаємодії твердих тіл змінюється їх положення та відбувається деформування;
- матеріальний світ дискретний та являє собою нескінченну сукупність рухомих систем від найпростіших до самих складних, для всіх систем виконуються класичні закони руху;

- елементи дискретної системи матеріального світу взаємопов'язані один з одним, а також елементами інших систем за допомогою електричних, гравітаційних та магнітних полів.

Взаємодія одного тіла з іншим в площі контакту пов'язана з мікрочастинками (атомами, електронами, іонами), а також конкретними структурними групами (молекул, кристалів). Всі структурні групи контактуючих між собою тіл мають різний ступінь деформації. При цьому кінетична енергія одного тіла перетворюється в потенціальну енергію взаємної деформації контактуючих частинок та їх структурних груп.

Дані припущення в повній мірі узгоджуються з моделлю фретигу в молекулярно-механічній теорії тертя. Це дозволяє уявити площину контакту як сукупність частинок з вимушеними коливальними рухами відносно початкового положення рівноваги, амплітуда та частота яких залежить від граничних умов і трибохімічних особливостей взаємодіючих тіл.

В роботі Н. Буше [91] запропоновано вираз для сили тертя ковзання:

$$F = (\mu_1 + \mu_2)N, \quad (3.9)$$

де μ_1 – коефіцієнт тертя на субмікроскопічних масштабах поверхні тертя;

μ_2 – коефіцієнт тертя на мікроскопічних масштабах;

N – навантаження.

Коефіцієнти тертя μ_1 та μ_2 визначаються аналітичним методом.

В процесі тертя епіцентром хвильових та коливальних рухів субмікроскопічних і мікроскопічних частинок буде те місце поверхні, в якому пари тертя перебувають в контакті. Тому найбільш імовірно, що саме в таких точках спостерігається найбільша густина енергії. В умовах фретинг- процесу накопичення енергії ініціює утворення поверхневих тріщин, а в подальшому і до об'ємного руйнування матеріалу. Дослідження [20, 79] показали, що кожний матеріал в початковому стані може приймати певну кількість енергії, яка не

перевищує граничної межі. По досягненню гранично допустимої межі густини енергії відбувається руйнування матеріалу.

Поглинання енергії E , необхідної для руйнування одиниці об'єму, 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:

$$E_c = \int_0^{L_0} \frac{P \cdot dl}{V} = \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma \cdot d\varepsilon + \alpha(N), \quad (3.10)$$

де V – локальний об'єм руйнування, виділений по поперечному перерізу у 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.

Автори [101 - 104] розглядають густину енергії деформації як керуючий параметр, який контролює процеси, що проходять в зоні нестійкості. Розглядаючи процеси, які відбуваються в номінально нерухомому механічному контакті, а також нехтуючи пружною частиною відносної деформації в контакті, формулу (3.10) [105, 106] можна представити в наступному вигляді:

$$E = q \cdot \mu \left[\frac{n^2(n+1)}{2n+1} \right] + \alpha(N). \quad (3.11)$$

З формули (3.11) видно, що густина енергії пластичної деформації в контактi залежить від параметра пластичності n , характеристик матеріалу та числа циклів навантаження. Формула (3.11) придатна для кількісного визначення густини енергії пластичної деформації в різноманітних сплавах.

Підсумовуючи вищевикладене, можна зазначити наступне: густина енергії пластичної деформації на початковій стадії малоамплітудного фретингу співрозмірна з енергією, яка необхідна для зародження тріщин. Найбільш енергоємним при фретингу є поверхневий шар твердого тіла, який характеризується високим коефіцієнтом тертя та великою кількістю площин ковзання.

Одним із важливих факторів в процесі малоамплітудного фретинга є адгезія металів. Відповідно до механічної теорії [107, 108] на ранній стадії адгезія приводить до зношування від розшарування. При цьому з частинок відшарованого металу утворюється клин, який видавлює ці частинки з області контакту. Внаслідок розклинювання зростає нормальне навантаження, що призводить до деформаційного зміцнення та зменшення адгезії. З початку руху внаслідок руйнування оксидних плівок роль адгезії зростає. Виникає зчеплення, внаслідок чого спостерігається деформація металу та змінюється напрямок дії тангенційної сили на кут θ . При зміні напрямку руху на протилежний, кут θ переноситься на протилежну грань, при цьому має місце деякий зсув металу по першопочатковій площині ковзання. Постійні тангенційні коливання в зоні контакту призводять до накопичення зрізаного металу між двома поверхнями, при цьому за рахунок розклинюючої дії тиск в контактi зростає.

Ковалевським В. В. [105] запропонована модель залежності зміни коефіцієнта адгезії від числа циклів навантаження при малоамплітудному фретинг-процесі. Перший максимум спостерігається при довговічностях від декількох десятків циклів. Внаслідок відшарування тонких частинок металу відбувається утворення безпосереднього контакту поверхонь, при цьому зростає коефіцієнт тертя та збільшується пластична деформація поверхонь. Процес розшарування поверхневих шарів металу супроводжується двома

явищами – це зниженням адгезії внаслідок деформаційного зміцнення поверхневих шарів металу та імовірним утворенням в областях передання площин ковзання мікротріщин. В мікротріщини попадають елементи оточуючого середовища, які ініціюють корозію. Деякі мікротріщини зливаються, розхитуючи при цьому локалізований в межах контурного контакту об'єм металічної поверхні. Поверхня сильно деформована та містить велику кількість тріщин, подальше її окислення призводить до її руйнування. Залишки розсіюються по поверхням тертя, змінюючи загальний баланс в сторону збільшення хімічної активності поверхні, що веде до росту вторинних оксидних плівок та приводить ефект адгезії до мінімуму.

Роль адгезії полягає в тому, що вона сприяє виникненню напруженого стану в локальних об'ємах поверхневого шару, і в значній мірі ініціює структурне зміцнення. Адгезія є одним з основних факторів, які характеризують час, необхідний для розвитку поверхневих мікротріщин.

Можна виділити три найбільш типових концентратора напружень, які впливають на об'ємне руйнування при фретиг-втомі: малоциклічне руйнування локальних об'ємів поверхневих шарів, геометричний фактор викликаний абразивною дією продуктів зносу, корозійний концентратор [105].

Вплив кожного концентратора характерне для певної кількості циклів. Перші цикли навантаження ($1 \times 10^4 \dots 2 \times 10^4$) характеризуються утворенням окисного шару товщиною від 1 до 2 мкм. Руйнування даного окисного шару веде до підвищення адгезії та різкого збільшення сили тертя в контакті. Далі продукти зносу підлягають циклічній передеформації та інтенсивно окислюються. В цей період проходить ріст вторинних плівок товщиною від 10 до 20 мкм із за вологості в контакті та наявності електрохімічної корозії. Дані стадії завершуються до $2 \cdot 10^4$ циклів. Третя стадія фретингу характеризується формуванням в зоні контакту мілкодисперсного, розрихленого шару. При цьому інтенсивність фретинг-зношування досить невелика.

В роботах [109 - 112] встановлено, що нормальне коливання зразків носить резонансний характер, амплітуда цих коливань та резонансна частота визначаються пружними та дисипативними властивостями контакту.

Шляхом математичної апроксимації експериментальних даних встановлено [108] емпіричний зв'язок коефіцієнта тертя з фізико-механічними властивостями контактуючих матеріалів для малоциклічного навантаження:

$$\mu = 0,1^{\frac{\sigma_{\tau}}{\sigma_b}} \cdot \ln N^{\frac{\sigma_{\tau}}{\sigma_{-1}} + 0,001}, \quad (3.12)$$

де μ – коефіцієнт тертя;

N – число циклів навантаження;

σ_{τ} – межа текучості;

σ_b – межа міцності;

σ_{-1} – межа витривалості;

Відповідно до залежності коефіцієнт тертя при постійному номінальному тиску в контакті визначається властивостями контактуючих матеріалів та числом циклів навантаження. Але необхідно зазначити, що область використання даної формули обмежена від одиниць до декількох сотень циклів.

В. С. Іванова [20], вивчаючи об'ємну надійність матеріалів, висунула гіпотезу руйнування, згідно якої руйнування відбувається в тому випадку, коли внутрішня енергія матеріалу досягає критичної енергоємності. При цьому критична густина внутрішньої енергії не залежить від умов в яких протікає процес, а є фізичною константою матеріала. Термодинамічний підхід до оцінки стану твердого тіла дозволяє робити достовірні висновки.

В. В. Федотов [113] на основі гіпотези подібності механічного та теплового руйнування матеріалів прирівнює критичну густину внутрішньої енергії до ентальпії – теплоти плавлення речовини.

Якщо відомі зміни ентальпії при плавленні та густина D , критична енергоємність може бути розрахована за формулою:

$$E^* = \Delta \cdot T_{nl} \cdot D. \quad (3.13)$$

Для розрахунку критичної енергоємності може бути використана також формула:

$$E^* = T_{nl} \cdot M \cdot D, \quad (3.14)$$

де T_{nl} – теплота плавлення;

M – молекулярна маса;

D – густина матеріалу.

Розрізняють дві основні групи енергетичних критеріїв: перший з них оснований на вимірюванні чи математичному описі накопичення матеріалом енергії пластичної деформації, а другий залежить від діючих напружень і механічних властивостей матеріала та врахуванні термодинамічних властивостей матеріала.

Енергетична теорія досить повно описує реальну картину тертя та зношування. Такий підхід сформований Г. Фляйшером [114] та його наступниками. Основним в цій теорії є те, що для відділення частинок зношування необхідно, щоб деякий об'єм матеріала накопив певний критичний запас внутрішньої енергії. Уявна густина енергії (e_{me}^*) характеризується як функція:

$$e_{me}^* = e_{me} \cdot n_k / X [K(n_k - 1)], \quad (3.15)$$

де e_{me} – дійсна густина енергії розриву;

n_k – критичне число імпульсів енергії;

X – коефіцієнт накопичення енергії;

K – коефіцієнт структури, складу та типу робочого матеріалу.

Точне аналітичне визначення уявної густини енергії тертя на основі даного рівняння неможливе, так як не вияснений взаємозв'язок між окремими

розрахованими величинами та заданими фізико-механічними властивостями робочого матеріалу.

Г. Сорокін та Б. Сафонов [115] рахують, що енергоємність матеріалу залежить від твердості та структури матеріалу.

Енергетична концепція базується на умові Гріффітса, згідно якої існуюча мікротріщина буде інтенсивно поширюватися, якщо швидкість звільнення енергії пружної деформації буде більшою ніж швидкість приросту поверхневої енергії тріщини в одиницю часу.

Критичне напруження, при якій починається інтенсивний розвиток тріщин з подальшим руйнуванням поверхні:

$$[\sigma] \geq \sqrt{\frac{E(W_1 + W_2)}{\pi \cdot l}}, \quad (3.16)$$

де $[\sigma]$ – критичні напруження у зразку;

E – модуль пружності;

W_1 – енергія поверхневого натягу тріщини;

W_2 – робота пластичної деформації;

l – довжина мікротріщини.

Мінімальне нормальне напруження, при якому виникає граничне проковзування зерен та утворення субмікротріщин визначається за формулою:

$$\sigma_{\min} = \sqrt{\frac{12 \cdot W \cdot G}{\pi \cdot d}}, \quad (3.17)$$

де W – поверхнева енергія пластичної деформації, зв'язана з виникненням тріщини в сусідньому зерні;

d – середній діаметр зерна;

G – модуль пружності другого роду.

Структурно-міцносні властивості тісно пов'язані з енергоємністю матеріала. Процес зношування при цьому підпорядковується закону збереження енергії. У відповідності з першим законом термодинаміки його можна подати співвідношенням

$$A = Q + \Delta E, \quad (3.18)$$

де ΔE – зміна внутрішньої енергії речовини;

Q – тепловий ефект;

A – робота тертя, еквівалентна затраченій механічній енергії.

Зміна внутрішньої енергії зношеного матеріалу дорівнює енергії нових поверхонь, які утворюються при руйнуванні. В процесі зношування акумульовані енергії пружної деформації приходять до руйнування кристалічної ґратки. При цьому відбувається розрив міжатомних зв'язків та утворення нових поверхонь.

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 [115, 116]. Енергія деформації являє собою енергію, що міститься в дислокаціях E_p , точкових дефектах $E_{тд}$, залишкових напружень $E_{зн}$, а також енергію структурних перетворень $E_{сн}$ та виділення нових фаз $E_{нф}$:

$$E_{\delta} = E_p + E_{тд} + E_{зн} + E_{сн} + E_{нф}. \quad (3.19)$$

Із збільшенням ступеню деформації кількість енергії, яка акумулюється в металі, збільшується та може коливатися в широких межах від декількох до сотень джоулів на 1 моль.

Руйнування твердого тіла відбувається внаслідок того, що кристалічна ґратка при подальшому навантаженні перестає поглинати підведену зовні енергію. Тобто даний об'єм металу насичений енергією граничної величини, яка визначається силами зв'язку кристалічної ґратки.

Процес тертя у номінально нерухомому з'єднанні призводить до деформаційних процесів в металі, а також до утворення мікротріщин, подальший розвиток яких викликає руйнування поверхневих мікрооб'ємів.

Енергія дислокацій залежить від характеру розміщення дислокацій та відстані між ними. Якщо енергія деформації в локальному об'ємі досягає граничної величини для даного металу, то саме в цьому об'ємі виникає тріщина. Енергія, яка витрачається на збільшення густини дислокацій в даному об'ємі, може бути визначена по різниці густини дислокацій до та після тертя:

$$E_p = \Delta\rho \cdot E_p' \cdot V_p, \quad (3.20)$$

де $\Delta\rho$ – 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;

$$\Delta\rho = \int_0^{l_p} f(l_p) dl_p;$$

$f(l_p)$ – 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 згідно співвідношення [117]:

$$E_p' = \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0} - l_{\text{я}}\right) G \cdot b^2}{4\pi(1-\mu)}, \quad (3.21)$$

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.

З урахуванням (3.23) в результаті отримаємо залежність:

$$E_p = \frac{G \cdot b^2}{4\pi(1-\mu)} \ln\left(\frac{r_1}{r_0} - l_{\text{я}}\right) \cdot V_p \cdot \int_0^{l_p} f(l_p) dl_p. \quad (3.22)$$

Залежність (3.22) [116] дає можливість оцінити величину енергії, яка витрачається на збільшення густини дислокацій в даному об'ємі при фретинг-процесі зміцнення та зробити порівняння з граничною величиною енергії деформації в локальному об'ємі для даного металу при утворенні мікротріщин.

Руйнування поверхневих шарів стає можливим після такої кількості робочих циклів, яке необхідне для накопичення енергії, рівній її межі, здатній акумулюватися в сплаві певного складу та структури. Тертя неможливе без затрати енергії, тому згідно закону збереження енергії, вона не втрачається, а перетворюється з одного виду в інший. При подоланні сили тертя енергія розподіляється наступним чином:

- на деформування поверхневих шарів матеріалу та зміни його структури;
- на збільшення амплітуди коливань атомів в вузлах кристалічної решітки та подолання міжатомних сил;
- на ріст внутрішньої енергії;
- на подрібнення абразиву та переміщення мікрооб'ємів матеріала.

Згідно принципу Ле Шательє система, яка перебуває в рівноважному стані, намагається звести до мінімуму збуджуючі зміни параметра, що виводить систему з стану рівноваги [117]. Це має місце відповідно, до систем тертя в умовах фретингу, так при зміні параметрів системи в поверхневих шарах виникають вторинні структури, які ведуть до зменшення коефіцієнта тертя та накопичення структурних пошкоджень в поверхневому шарі матеріалу [118, 119].

Відомо, що в нерівноважних системах тертя розвиваються зони нестабільності з збудженням широкого спектру коливань [99]. Першочерговим завданням є визначення ступеня нерівноважності при заданих зовнішніх умовах. Якщо в якості факторів нерівноважності взяти швидкості, градієнти густини енергії та інтенсивності зовнішньої дії, для яких відповідними структурними факторами служать проміжки часу релаксацій, енергія зв'язку, інтенсивність потоків, які поглинаються системою, то ступінь нерівноважності визначається значеннями наступних параметрів:

$$r = \tau_i \left| \frac{d \ln p}{d \tau} \right|; \quad g = l_i \left| \frac{d \ln p}{dx_i} \right|; \quad \sigma = \frac{(p - p_s)}{p_s}; \quad N = \frac{p}{p_s}, \quad (3.23)$$

де τ_i , l_i – час та довжина, які характеризують структуру системи;

p – визначаючі величини, яким відповідають структурні параметри p_s

Носіями структури є структурно-кінетичні елементи, на основі яких і визначаються всі внутрішні параметри (τ_i , l_i , p_s).

Характеристики структурно-кінетичних елементів суттєво залежать від фактору нерівноважності системи: чим вища ступінь нерівноважності, тим мілкіша структура. Так при фретинг-процесах еволюція структури зміщується в сторону зменшення зерен та формування дислокаційних кластерів. Зміна фактора нерівноважності відбувається до певного порогового значення та приводить до якісної зміни структури, властивостей та поведінки системи [120].

Принцип «нерівноважність – джерело впорядкованості» доводить те, що в будь-якій дисипативній системі, яка першопочатково перебуває в однорідному стаціонарному стані, при проходженні стаціонарних потоків, інтенсивність яких перевищує критичні значення, повинні виникнути дисипативні структури. Найбільш виражено дане твердження знаходить місце для матеріалів, які працюють в екстремальних умовах тертя, до яких відносяться і фретинг-процеси.

Дисипативною системою тертя в умовах фретинга є система, повна механічна енергія якої внаслідок руху зменшується та переходить в інші форми. Дисипація енергії це перехід частини енергії впорядкованого руху в енергію неупорядкованого процесу.

Стійка дисипативна структура внаслідок еволюційних процесів досягає межі нестійкості, внаслідок виникнення різного роду флуктуацій осцилює, що приводить до самоорганізації нової, більш стійкої на даному рівні дисипативної структури. В процесі відбуваються переходи «стійкий стан – нестійкий стан – стійкий стан», тобто система тертя при фретингу знаходиться поблизу стану рівноваги і тому реагує на будь які збудження, намагаючи повернутись в стан рівноваги. В точці біфуркації поведінка системи стає неоднозначною, тому малоамплітудний фретинг приводить до резонансу тангенційних сил.

У відкритих системах вихід ентропії за систему врівноважує її ріст у самій системі. При таких умовах може виникнути та підтримуватися стаціонарний стан, чому сприяють окисно-корозійні процеси при фретингу. При певних умовах сумарне зменшення ентропії за рахунок обміну з зовнішнім середовищем може перевищити її внутрішнє утворення.

Виникає нестійкість та неупорядкованість системи, що веде до виникнення максимальної кількості флуктуацій. Саме на даній стадії можливе виникнення дисипативних структур тертя.

3.2. Особливості розвитку трибохімічних процесів

Виникнення вторинних структур при фретинг-процесах відповідає принципу збереження енергії зі зменшенням коефіцієнта тертя, що супроводжується інгібітуванням процесів пошкоджуваності поверхневих шарів [120, 121].

Функціонування трибохімічних процесів починається з квазіадіабатичного накопичення енергії на твердій поверхні тіла внаслідок дії механічних факторів. Внаслідок чого за досить короткий час і в невеликому просторі накопичується досить значна енергія. Причиною накопичення енергії є обмежена швидкість розповсюдження електронних збуджень в реальній системі, яка не є неперервною. В деяких точках виникають збуджені стани, які наближаються за енергетичними параметрами до трібоплазми [107]. Саме вони характеризуються найбільш сильно порушеною кристалічною структурою та наявністю нестационарних високозбуджених фрагментів кристалу та оточуючим реакційним середовищем у вигляді компонентів кристалічної решітки (іонів, електронів). Дана фаза характеризується дисипативним накопиченням енергії з утворенням великої кількості вільних електронів, внаслідок чого реакційна здатність трибосистеми в окремих точках надзвичайно висока. Збуджені стани, близькі до трібоплазми, виникають на досить короткі проміжки часу, тому в такій ситуації розподіл Максвелла-Больцмана по енергетичним станам не може встановитися.

Найвищий енергетичний стан динамічно переходить в більш низькі збуджені стани. Саме на даній стадії можливий перебіг трибохімічних реакцій, які супроводжуються утворенням ювенільних поверхонь, рухом дислокацій, утворенням дефектів кристалічної решітки, розтріскуванням. Значна емісія електронів змінює синергетику процесу. За досить короткий час життя метастабільних станів накопичується велика кількість енергії, що викликає розупорядкування структури [116].

Загальний хід трибохімічної реакції зображений на рисунку 3.1. Перша фаза характеризує взаємодію поверхні необробленого матеріалу. Перша фаза без збудження, тому будь який перебіг хімічних реакцій з поверхнею матеріалу має сталий характер.

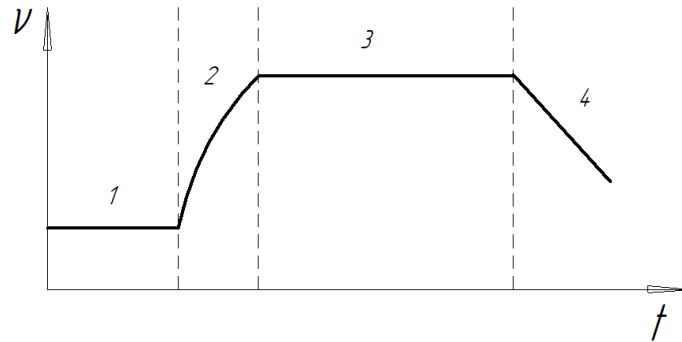


Рис. 3.1. Загальний хід трибохімічної реакції: V – швидкість протікання реакції; 1, 2, 3, 4 – фази протікання реакції [116]

Друга фаза характеризується утворенням нестійкої, високореакційної поверхні внаслідок чого росте швидкість трибохімічних реакцій, які ініціюють процес фретинг-корозії. Третя фаза пов'язана з структурними змінами та синергетикою поверхневого шару матеріалу. Зміна реологічних показників в четвертій фазі веде до спаду її активності та стрімкого зменшення швидкості всіх реакцій.

Запропоновано аналітичну залежність опису кінетики проходження другої фази трибохімічної реакції на поверхнях контактуючих тіл [116,121].

Закономірно, що всі трибохімічні реакції відбуваються по активних, збуджених центрах:



де A – неактивні центри;

A' – активні центри;

W – поверхнева енергія;

W' – додатково ініційована поверхнева енергія від фретинг-процесу.

Далі для визначення швидкості зміни числа активних центрів маємо:

$$\begin{aligned}\frac{dN_A^*}{dt} &= WN_0 - (W + W')N_A^*, \\ \frac{d\left(\frac{N_A^*}{N_0}\right)}{dt} &= W - (W + W')\frac{N_A^*}{N_0},\end{aligned}\tag{3.25}$$

де N_A^* – кількість активних центрів;

N_0 – загальна кількість центрів;

t – час зміни числа активних центрів.

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

отримаємо залежність:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + (W + W')\Phi = W.\tag{3.26}$$

Враховавши, що часовий зв'язок зміни поверхневої енергії W та активної поверхневої енергії W' пропорційний потенціальним бар'єрам для утворення та розпаду активних центрів отримаємо:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t^*} + Z_1(t^*)\Phi = Z_2(t^*),\tag{3.27}$$

де Z_1 – потенціальний бар'єр утворення активних центрів;

Z_2 – потенціальний бар'єр розпаду активних центрів;

t^* – час спаду енергії.

Праналізуємо зміну активності поверхні контактуючих тіл на другій фазі проходження трибохімічної реакції [116,121] (див рис.3.1).

Проведемо перетворення у рівнянні (3.27) та отримаємо:

$$\frac{1}{Z_1(t^*)} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \Phi = \frac{Z_2(t^*)}{Z_1(t^*)}.\tag{3.28}$$

Уведемо позначення: $T = \frac{1}{Z_1(t^\#)}$. (коефіцієнт T має розмірність часу і називаються постійною часу і його значення визначають швидкість і характер протікання перехідних процесів);

$k \cdot \mu = \frac{Z_2(t^\#)}{Z_1(t^\#)}$. (коефіцієнт k називають коефіцієнтом передачі і визначають взаємозв'язок змінних у сталих статичних режимів); μ – характеризує зміну вхідної величини.

Величина коефіцієнту k залежить від складу металу, шорсткості його поверхні, твердості поверхні, амплітуди коливань, коефіцієнту тертя, контактного тиску, критичних напружень у зразку.

$$k = \varphi(Me, Ra, A, f, MПа, [\sigma]). \quad (3.29)$$

Провівши заміни, отримаємо наступне рівняння:

$$T \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \Phi = k \cdot \mu. \quad (3.30)$$

Маємо характеристичне рівняння:

$$Tp + 1 = 0. \quad (3.31)$$

Рішення рівняння (3.30) має вигляд:

$$\Phi(t) = k \cdot [1 - e^{(-\frac{t}{T})}], \quad (3.32)$$

де $t = N$ циклів, $k = 2$ (прийнято умовно для сталі 45), e – число Ейлера ($e \approx 2,718$).

Побудуємо, згідно залежності (3.32), графік зміни активності поверхні контактуючих тіл на другій фазі проходження трибохімічної реакції для сталі 45 при наступних умовах: $P = 30$ МПа, $A = 30$ мкм, $f = 30$ Гц, $Ra = 2,5$.

Експериментально для сталі 45 [122], при визначенні інтенсивності

зношування встановлено, що період активності поверхні контактуючих тіл $T = 0,3 \times 10^6 \dots 0,32 \times 10^6$ циклів або від 2,8 до 3 години, що корелюється з отриманою залежністю. Активність поверхні контактуючих тіл при проходженні трибо-хімічної реакції для сталі 45 зменшується з часом проходження реакції внаслідок адгезійних процесів та виникнення третього тіла (окисних плівок і продуктів зношування).

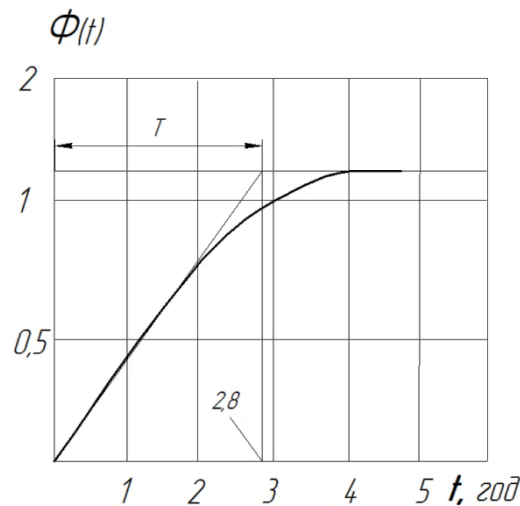


Рис. 3.2. Графік зміни активності поверхні контактуючих тіл на другій фазі проходження трибо-хімічної реакції для сталі 45: $P = 30$ МПа, $A = 30$ мкм, $f = 30$ Гц

Звичайно час життя збуджених станів залежить не лише від будови твердого тіла, але й від інших параметрів таких як тиск, температура, складу оточуючого середовища. Якщо на контактуючий матеріал при фретингу діють певні навантаження, які створюють силу тертя F , то в такій системі діючу механічну енергію E можна виразити через амплітуду A та силу тертя [18, 116]. Отримаємо залежність:

$$E \sim 2A \cdot F. \quad (3.33)$$

Якщо рахувати, що високоактивні центри, які утворюються при терті стійкі на протязі долі секунди, то хімічні реакції можуть відбуватися лише в тому випадку, коли гази встигають вступити в реакцію за досить короткий проміжок часу.

В такому випадку, можна запропонувати [116,121] наступну трибокінетичну модель на прикладі взаємодії радикалів CR (аналогічно і для радикалів інших газів O_2 , OH , H^+) з поверхнею твердого тіла: радикали газу досягають поверхні метала шляхом дифузії та адсорбується на ній. Трибо-адсорбція проходить по точках, які піддаються механічній дії. В залежності від умов проходить трибо-абсорбція на активних центрах з газової фази разом із трибохімічними реакціями, або адсорбція з хімічними реакціями радикалів газу на поверхні твердого тіла (рис.3.3).

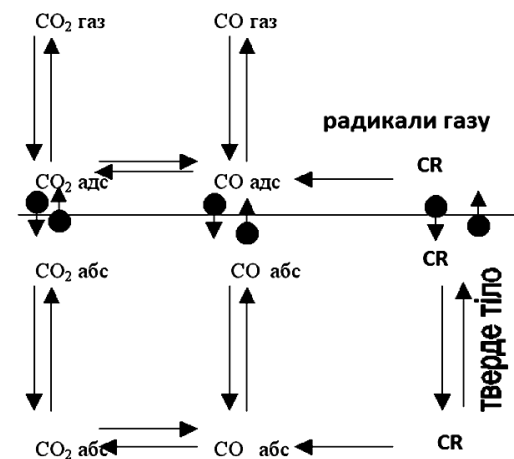


Рис. 3.3. Трибокінетична модель трибо-абсорбції в системі « CO_2 -метал»; $CO_{2\text{ газ}}$ - CO_2 у газовій фазі; $CO_{2\text{ адс}}$ - CO_2 в адсорбованому стані; $CO_{2\text{ абс}}$ - CO_2 в абсорбованому стані

В залежності від активності поверхні металу проходять дифузійні процеси, які забезпечують проникнення активних складових середовища на поверхню металу. Таким чином, взаємодія середовища і поверхні твердого тіла залежить від: хімічного складу твердого тіла, кристалічної структури даного металу, пластичної та пружної деформації, стану активної поверхні тіла на якій середовище взаємодіє з металом.

Процес дифузії кількісно описується законом Фіка, згідно якого:

$$f = -D \frac{dN}{dx}, \quad (3.34)$$

де f – потік дифузії;

dN/dx – градієнт концентрації;

D – коефіцієнт дифузії.

Температурна залежність коефіцієнта дифузії описується експонентою у вигляді:

$$D = D_0 e^{-\frac{\Delta H}{RT}}, \quad (3.35)$$

де ΔH – енергія активації процесу,

D_0 – постійна, яка пов'язана з рухом атомів в кристалічній ґратці.

В свою чергу, D пов'язано з рухом атомів у ґратці:

$$D = \frac{v \cdot l^2}{c}, \quad (3.36)$$

де v – середня частота коливань атомів;

l – відстань, яку проходить атом в даному елементарному акті;

c – геометричний фактор, який характеризує будову даної речовини.

Отже реакції між газовою фазою і твердим тілом описуються процесами переносу всередині твердого тіла. Процес дифузії крізь оксидну плівку на поверхні твердого тіла описується за лінійним законом для плівок з малою адгезією, а за параболічним законом описується процес дифузії крізь плівку, сильно пов'язану з поверхнею [123].

Але регулярна дифузія не може забезпечити швидкого проникнення на великі глибини всередину металу елементів зовнішнього середовища, тому при взаємодії середовища та твердого тіла великого значення набуває така його властивість, як дефектність будови. Лише через розв'язані дефекти елементи зовнішнього середовища можуть взаємодіяти зі значними об'ємами металу.

Найпростішим видом атомних дефектів є теплові коливання складових частин кристалічної решітки. Середня амплітуда атомних коливань може збільшуватися від різних чинників в тому числі і в результаті тертя. При нагріванні від кімнатної температури (300⁰К) до температури плавлення

багатьох елементарних кристалів (1200^0 - 1900^0 K) амплітуда збільшується від 2 до 2,5 разів.

Механічне та термічне збудження атомів приводить до утворення електронних дефектів. Природа даних дефектів буде залежати від ступеня збудження, тобто чисто механічних параметрів, які діють на протязі певного часу на дане тверде тіло. Якщо ж енергія збудження нижче потенціалу іонізації, то електрон переходить на одну з віддалених орбіт, залишаючись при цьому в складі атома. Якщо ж енергія збудження перевищує потенціал іонізації, то утворюються вільні електрони. Вільні електрони неперервно хаотично рухаються, причому середня кінетична енергія їх руху рівна $2/3RT$. Вони обмінюються енергією з кристалічною ґраткою при зіткненнях. Внаслідок механічної дії при фретингу в металі проходить процес збільшення кількості збуджених електронів, що в свою чергу збільшує імовірність їх зіткнень з кристалічною ґраткою, утворення ювенільної поверхні здатної до взаємодії з компонентами оточуючого середовища. Що сприяє утворенню різного роду дефектів структури, викривлення кристалічної ґратки, зародження тріщин та поступового руйнування поверхні твердого тіла [86].

Зміна розподілу вільних електронів за енергіями відіграє вирішальну роль при утворенні квазіонестійкої трибосистеми. Заповнення рівнів електронами задається функцією Фермі:

$$f = \frac{1}{e^{(E-E_f)/kT} + 1}, \quad (3.37)$$

яка визначає імовірність заповнення електроном енергетичного рівня з енергією E в умовах термодинамічної рівноваги електронів в системі, де E_f є рівнем Фермі.

Якщо температура металу наближається до абсолютного нуля ($T \rightarrow 0^0\text{K}$), то для $E > E_f$ функція $f(E) \rightarrow 0$, а для $E < E_f$ функція $f(E) \rightarrow 1$, тобто рівні, розміщені вище рівня Фермі, не зайняті електронами, а рівні розміщені

нижче рівні Фермі обов'язково заповнені електронами. Отже енергія Фермі – це максимальне значення енергії, яке може мати електрон у металі при 0°K .

Отже для будь яких температур маємо:

якщо $E = E_f$, то $f(E) = 1/2$;

якщо $E > E_f$, то $f(E) < 1/2$;

якщо $E < E_f$, то $f(E) > 1/2$.

Можна припустити, що при дії механічних навантажень відбувається розширення перехідної ділянки від $f(E) = 1$ до $f(E) = 0$, що змінює реакційну здатність даного металу і прискорює окислювальні процеси.

Так як при абсолютному нулі в енергетичній зоні металу зайняті всі рівні навіть до рівня з енергією в декілька електронвольт, а енергія теплових коливань кристалічної ґратки складає величину декількох сотих долів електронвольта, то при підвищенні температури металу лише незначна частина електронів, отримавши додаткову енергію від теплових коливань ґратки, може перейти на більш високі енергетичні рівні. Тоді вплив температури на розподіл електронів в металі зведеться до зміни енергії електронів, розміщених на енергетичних рівнях поблизу рівня Фермі.

Основні властивості моделі, в тому числі характер електропровідності та залежність питомої теплоємності від температури, обумовлені існуванням поверхні Фермі. Тому кулонівська взаємодія між електронами не повинна суттєво міняти розподіл і загальний характер орбіталей поблизу поверхні Фермі.

Властивості металів визначаються станом електронів всередині металу, де існує періодичне поле кристалічної ґратки. Границя між металом та іншим середовищем (в конкретному випадку газ, тверде тіло) порушує періодичність поля ґратки, тому на границі металу буде змінюватися стан електронів. Отже і властивості поверхневих шарів металу відрізняються від його об'ємних властивостей.

Виникнення ювенільних поверхонь та утворення частинок окислів при фретинг-корозії, а також викривлення кристалічної ґратки приводить до

збільшення кількості вільних електронів на поверхні розділу фаз. Саме наявність великої кількості цих частинок змінюють умови перебігу хімічних реакцій.

Звичайно, при фретингу крім реакцій між поверхнею твердого тіла та газоподібною фазою, значну роль в утворенні кінцевих продуктів реакції відіграють твердофазні перетворення. Відомо, що будь який хімічний процес передбачає наявність контакту між реагуючими частинками. Такі контакти виникають в рідкій чи газоподібній фазах. У твердих фазах прямий контакт реагуючих частинок можливий лише в початковий момент часу, після цього внаслідок фретинг-корозії виникає шар окислу, який розділяє реагенти, і подальше протікання реакцій лімітується масопереносом атомів через шар утвореного продукту.

Так як механічні навантаження призводять до виникнення усіх вищенаведених дефектів в кристалі, то можна припустити, що фретинг у значній мірі прискорює об'ємну і поверхневу дифузію в твердому тілі.

Стоїть питання, чому в результаті фретингу утворюється велика кількість дефектів структури. Відомо, що в природі самочинно проходять ті процеси в результаті яких вільна енергія системи зменшується. Вільна енергія системи визначається співвідношенням:

$$G = H - TS, \quad (3.38)$$

де G – вільна енергія системи;

H – ентальпія;

S – ентропія;

T – температура.

Ентальпія визначає тепловміст системи, тобто характеризує весь запас теплоти, отриманої системою при переході від абсолютного нуля до даного стану. Якщо в процесі $\Delta H = H_{\text{кінцева}} - H_{\text{початкова}} > 0$, це означає, що в системі відбувається поглинання тепла (ендотермічний ефект); при $\Delta H < 0$ має місце виділення тепла (екзотермічний ефект).

Що до ентропії, то вона характеризує степінь неупорядкованості, до якого йде кожна система при $T > 0^\circ\text{K}$. Так два гази нерозділені перегородкою самовільно змішуються, в результаті чого утворюється суміш. Разом із тим зворотній процес – розділення газів потребує затрати певної енергії. Також і тверді тіла можуть поглинати різноманітні речовини з оточуючого середовища, хоча зворотній процес в кристалі в принципі неможливий.

В результаті виникає запитання, чому ж все-таки існують впорядковані системи типу кристалічних структур і наскільки вони стійкі. Пояснюється це тим, що кожна система рухається до зменшення вільної енергії, тобто процес проходить самочинно, якщо:

$$\Delta G = (\Delta H - T \cdot \Delta S) \leq 0. \quad (3.39)$$

Так як зміна ідеального порядку в розміщення атомів потребує додаткової енергії, тобто для процесу дефектоутворення $\Delta H > 0$, то при температурі абсолютного нуля, коли $\Delta G = \Delta H$, дефекти не можуть утворюватися в кристалі самочинно. Крім того при $T = 0^\circ\text{K}$ в системі повинно реалізуватися повне структурне впорядкування.

При підвищенні температури ідеальний порядок в розміщенні атомів порушується, так як $T\Delta S > \Delta H$. Отже, щоб процес протікав самовільно необхідно щоб $\Delta G = \Delta H - T\Delta S < 0$. Таким чином, при температурі $T > 0^\circ\text{K}$ в кристалі всі процеси протікають із збільшенням безпорядку. При цьому в залежності від умов формується кристал із певним видом дефектів, який при найменших затратах енергії забезпечує максимальне збільшення ентропії.

В статичних умовах поверхня металу внаслідок неоднорідності складу має певний запас енергії, який сприяє протіканню певних хімічних реакцій. Ініціювання трихімічних реакцій викликається тим, що в процесі тертя внаслідок пластичної деформації тонких шарів металу відбувається ріст ентропії системи, проходить значний розігрів поверхні та утворення ювенільних поверхонь разом із збільшенням каталітичної активності. Все це

призводить до інтенсифікації протікання трибохімічних реакцій. Внаслідок фретингу хімічні реакції протікають у високозбудженому стані з коротким часом існування, тому розподіл Максвелла-Больцмана не встигає встановитися.

Приймаючи до уваги рух системи до мінімуму вільної енергії та, використовуючи принцип еквівалентності різних джерел ентропії легко зрозуміти, чому ідеальний монокристал термодинамічно нестабільний та при підвищенні температури самочинно намагається набути різноманітні дефекти (утворення дислокацій, втягування домішкових атомів).

3.3. Трибохімія впливу газового середовища

Згідно результатів досліджень, отриманих авторами [2], вплив агресивного оточуючого середовища на фретинг-корозію пов'язано із електрохімічною активністю матеріалів та окиснювальною активністю газової складової. Виходячи з позицій адсорбційно-електрохімічного механізму фретинг-процесу продукти руйнування, у вигляді окислів є, як правило, напівпровідниками, які прискорюють окиснення та корозію [2].

Оточуюче середовище є одним з факторів, який визначає хід фізико-хімічних процесів в зоні тертя. Так на поверхнях металів в атмосферних умовах присутні окисні та адсорбовані газові плівки, які попереджують безпосередній контакт ювенільних металевих поверхонь. В процесі тертя ці плівки зношуються та руйнуються. Але активна взаємодія газового середовища з матеріалом в зоні тертя приводить до їх регенерації. Тому закономірності тертя в повітрі в значній мірі визначаються властивостями поверхневих плівок [18].

Загальні закономірності поведінки газового середовища описується кінетичною теорією газів. Її основне припущення є в тому, що молекули, з яких складається газ, перебувають в постійному русі, причому величина швидкості молекули не пов'язана з її положенням в просторі. При русі молекули пружно взаємодіють одна з одною. Роль стінок зводиться до пружного розсіювання молекул по закону косінуса. Кількість молекул, які

приймають участь в процесі, досить велика, щоб її можна було рахувати нескінченною.

Частинки твердого тіла зв'язані між собою силами взаємного притягання. Всередині твердого тіла всі ці сили взаємноврівноважені. Але частинки, які знаходяться на поверхні мають надлишковий запас поверхневої енергії та створюють поле поверхневих сил. Молекули газу при зіткненні з поверхнею твердого тіла стримуються цим полем та залишаються на ній деякий час. Тоді час перебування молекул газу на поверхні твердого тіла визначається величиною і характером поверхневих сил, станом поверхні, її температурою, природою газових молекул і їхньою кінетичною енергією [126]. В залежності від характеру зв'язку розрізняють фізичну адсорбцію та хемосорбцію.

При хемосорбції між поверхнею твердого тіла виникають сили, які зумовлені обміном електронів. Енергія зв'язку при цьому досить близька до енергії утворення хімічної сполуки. Для свого виникнення вона потребує енергії активації. Хемосорбція в основному незворотна. Вона може ініціювання при механічному терті двох тіл.

Процес початкового окислення металів [18] зумовлений хемосорбцією кисню з повітря, яка дозволяє атомам кисню наблизитись до атомів металу настільки, що між ними відбувається взаємодія на електронному рівні, тобто проходить обмін валентними електронами. При цьому на поверхні метала утворюється окисна плівка товщиною в декілька ангстрем. Наявність такої плівки призводить до прискорення процесу окислення, який продовжується до того часу, поки товщина плівки не досягне десятків ангстрем. Після цього швидкість окислення різко зменшується.

Окисні плівки мають значну крихкість [18], внаслідок неоднорідності кристалічної ґратки окисла та металу, що призводить до послаблення металічного зв'язку. Плівка окислу має іншу твердість, ніж метал. Тому при терті окисна плівка досить легко відділяється від поверхні металу. Метал оголюється, і, якщо вміст кисню в газовому середовищі досить великий, на

поверхні знову утворюється окисна плівка. Тому при фретинг-корозії зношування відбувається за рахунок видалення окисного шару металу.

Хемосорбція є необхідною умовою для проникнення молекул газу в тверде тіло, так як чисто фізична адсорбція з її слабкими зв'язками не може забезпечити дифузійне проникнення радикалів газу в метал. Крім цього, для протікання дифузії на границі «тверде тіло – газ» повинна пройти дисоціація молекул. Розчинність газів в металах залежить від структури кристалічної ґратки металу, розмірів та хімічної активності атомів газу, наявності домішок, дефектів ґратки. При цьому розчинений газ може утворювати з металом розчини включення і заміщення, хімічні сполуки. Розчинення газу в металі відбувається до того часу, поки не встановиться певна концентрація розчиненого газу, яка відповідає стану рівноваги з оточуючим середовищем. Зміна зовнішніх умов супроводжується газовиділенням, або газопоглинанням в залежності від того який з цих процесів може призвести до встановлення нового рівноважного стану. При цьому швидкість переходу в рівноважний стан лімітується процесом дифузії. Якщо швидкість дифузії мала, то концентрація газу в металі може суттєво відрізнитися від рівноважної.

Якщо на поверхні металу утворюється хімічна сполука, то швидкість дифузії перестає залежати від тиску оточуючого середовища і визначається в основному властивостями новоутвореної сполуки. Так при окисленні поверхні металу швидкість дифузії у нього чи з нього інших газів (водню, азоту і т.п.) знижується або повністю припиняється [12]. Такий само ефект можуть відігравати поверхневі плівки, захисні шари та металеві покриття.

В основному метали такі як мідь, алюміній, залізо, нікель, хром, марганець розчиняють досить невелику кількість водню. Рівноважна розчинність водню в цих металах пропорційна квадратному кореню з парціального тиску водню в газовому середовищі. Водень розчиняється у металі в атомарному стані. Є дані про перебування водню в кристалічних ґратках металів в іонізованому стані, у вигляді протона. В пустотах водень може перебувати в молекулярному стані. Ділянки викривлень та порушень

кристалічної ґратки, границі блоків, зерен, включень, пори та інші дефекти кристалічної будови є також ділянками накопичення водню. Цим можна пояснити перевищення воднем рівноважної концентрації в вищезгаданих системах.

Розчинність водню в залізі та його сплавах з ростом температури збільшується [18]. Вона також змінюється при переході від однієї модифікації до іншої, великий вплив на розчинність водню має кристалічна структура металу чи сплаву. Так вона зменшується пропорційно кількості утвореної ферито-карбідної фази в процесі перетворення переохолодженого аустеніту у феритом-карбідну суміш. Розчинність водню в аустенітних сталях вища, ніж в сталях зі структурою перліту. Приклад участі дифузії в такому складному фізико-хімічному процесі, як фретинг-корозія металів, показує, наскільки важливим в практичному відношенні є перенос речовини через плівку. Роль дифузійного бар'єра в даному випадку відіграє тверда окисна плівка.

Внаслідок корозії проходять гетерогенні хімічні реакції, які приводять до переходу метала в окислений, іонний стан. Гетерогенність кородуючого середовища визначається тим, що метал перебуває в контакті з газовою або рідкою фазами агресивних агентів, які викликають окиснення. Швидкість окиснення визначається термодинамічною нестабільністю металу в агресивному середовищі, яка характеризується величиною ізобарно-ізотермічного потенціалу G°_{298} . Наприклад [18], залізо в соляній кислоті кородує повільніше, ніж алюміній в лужному середовищі $G^{\circ}_{298} [\text{Al}(\text{OH})_3] = 272,4$ ккал/моль, а $G^{\circ}_{298} [\text{FeCl}_3] = 72,6$ ккал/моль. Стандартні ізобарно-ізотермічні потенціали окислення металів добре відомі та приведені в більшості довідників. Здавалося б, що проблема оцінки швидкості корозії вирішена, але як і всі гетерогенні реакції, процес корозії спряжений з транспортними дифузійними процесами. В деяких металах [18] на поверхні утворюється окисна чи сольова плівка, яка запобігає подальшій дифузії агресивних компонентів середовища до металу та відводу продуктів реакції. Ступінь уповільнення корозії визначається якістю цієї плівки та її адгезією з металом.

Так, наприклад [18], алюміній у вологому середовищі більш стійкий, ніж залізо, внаслідок утворення на його поверхні герметичної плівки Al_2O_3 .

Трибохімія фретинг-корозії металів визначається, як хімічну активність пари тертя, так і властивостями зовнішнього середовища. У той же час залишається не до кінця зрозумілим питання, що є первинним: попереднє окислення фрикційного контакту, схильного до вібрації, з подальшим відділенням оксидів або первісне механічне відділення металевих частинок у вигляді високодисперсного порошку і подальше його окислення.

Роль зазначених хімічного і механічного факторів можна виявити, змінюючи склад зовнішнього газового середовища. Так, при зміні в газовому середовищі парціального тиску кисню представляється можливість оцінити роль корозійного чинника, а проводячи дослідження в середовищі вуглекислого газу, гальмуючого окислювальні процеси, можна контролювати внесок механічного фактора у пошкодженні фрикційного контакту. Потребує подальшого з'ясування питання ролі хімічної та електрохімічної корозії металів в умовах фретингу.

Досліджувався вплив адсорбційної здатності і хімічної активності газового середовища на інтенсивність фретинг-корозії армко-заліза і сталі 45 у нормалізованому стані, які відрізняються механічними властивостями (табл. 3.1), корозійної активністю і схильністю до адгезії.

Таблиця 3.1

Матеріал	Механічні властивості			
	HV, кГ/мм ²	σ_{-1} , кГ/мм ²	σ_v , кГ/мм ²	δ , %
Армко-залізо	140	12	24	50
Сталь 45	210	25	60	13

У якості газових середовищ використовувалися повітря, кисень і вуглекислий газ. Перед кожним дослідом газову камеру експериментальної установки очищали від повітря продуванням відповідним газом, після чого встановлювався його потік з невеликим надлишковим тиском.

Досліджувалися однойменні пари тертя в кільцевому контактi при коливальному русi торця втулки навколо власної осi щодо торця нерухомого цилiндра, знос якого служив показником фретингостойкостi сполучення. Результати дослiдженнь представленi на рис. 3.4.

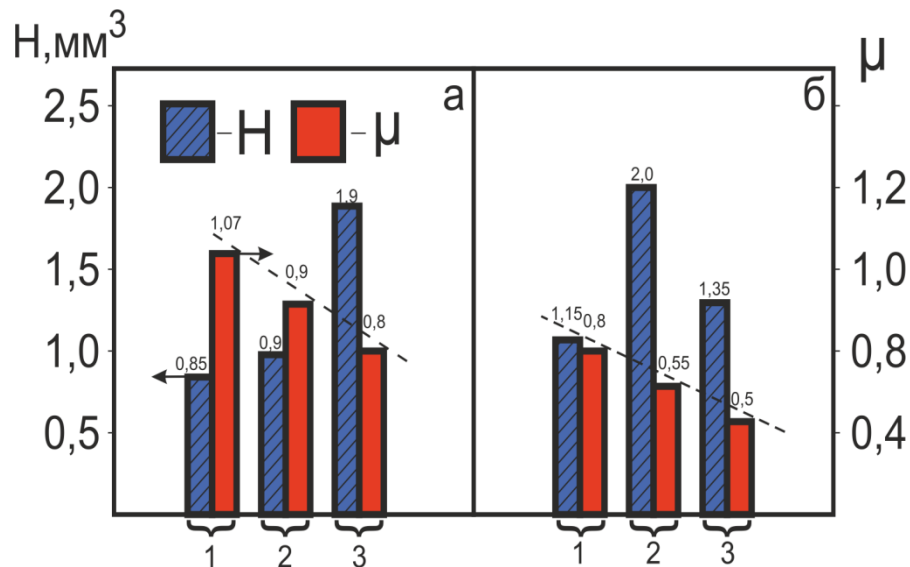


Рис.3.4. Гiстограми об'ємного фретинг-зношування (H) i коефiцiєнта тертя (μ) при випробуванні армко-залiза (a) i сталi 45 (б) в рiзних газових середовищах: 1 – повітря; 2 – кисень; 3 – вуглекислий газ ($P = 60$ МПа; $A = 50$ мкм; $N = 25 \cdot 10^4$ циклiв; $f = 25$ Гц)

З отриманих експериментальних даних можна зробити наступнi висновки.

1. Обидва матерiали, якi дослiджувались в середовищi кисню зношуються бiльше, нiж в повітряному середовищi, причому такий прирiст зношування супроводжується зниженням коефiцiєнта тертя. Сталь 45 з трьох газових середовищ показала в середовищi кисню максимальне зношування при вiдносно низькому коефiцiєнті тертя (рис. 3.4, б).

2. У порiвнянні з повітрям бiльш високе фретинг-зношування матерiалiв спостерiгалось i в середовищi вуглекислого газу. В цьому середовищi армко-залiзо показало максимальну втрату ваги (бiльшу, нiж в киснi) при найменшому коефiцiєнті тертя. Зростання фретинг-зношування

армко-заліза при зміні складу газового середовища супроводжувався зниженням коефіцієнта тертя (рис. 3.4, *a*).

3. Незважаючи на меншу міцність (див. табл. 3.1), армко-залізо в окисних середовищах (повітря, кисень) зношувалося менше сталі при більш високому коефіцієнті тертя. У той же час в середовищі вуглекислого газу (гальмуючого окислювальні процеси) і зношування, і коефіцієнт тертя армко-заліза значно перевищували подібні показники для сталі.

Менше зношування армко-заліза в порівнянні зі сталлю в окислювальних середовищах (повітря, кисень) пояснюється, з одного боку, більшою схильністю армко-заліза до схоплювання з взаємним перенесенням металу з однієї поверхні на іншу, а з іншого – більш високу корозійну активність сталі 45. Дійсно, для хімічно малоактивного армко-заліза збільшення в газовому середовищі вмісту кисню лише ненабагато підвищує зношування. У той же час для хімічно активної сталі 45 роль газового середовища, яке сильно окислює, стає домінуючою в руйнуванні фрикційного контакту. Цей факт суперечить абразивній теорії фретинг-зношування, згідно з якою зношування більш м'яких металів повинно бути вище, ніж твердих [2].

З огляду на то, що природа продуктів фретинг-корозії в обох випадках однакова (оксиди заліза), ступінь прояву їх абразивної дії з підвищенням вмісту кисню у зовнішньому середовищі повинна зростати, що не підтверджується експериментом: зношування армко-заліза в середовищі кисню менше зношування сталі, хоча коефіцієнт тертя у випадку сталі нижче. Це говорить про те, що крім окислювальних процесів при фретинг-корозії отримують розвиток і інші види корозії. При накопиченні в зоні фрикційного контакту достатньої кількості оксидів, насичених адсорбованою вологою і киснем повітря, процес починає набувати характер електрохімічної корозії [2]. З огляду на нейтральність середовища, процес повинен йти з кисневою деполяризацією переважно при катодному контролі [125]. Наявність у сталі катодних домішок (цементит) збільшує швидкість електрохімічної корозії, що і проявляється в більш інтенсивному зношуванні сталі в порівнянні з армко-залізом (особливо, в

середовищі кисню). Якщо тертя відбувається в чисто окислювальному режимі, надлишок кисню повинен сприяти пасивації поверхонь зі зниженням зношування, а в режимі електрохімічної корозії, коли контролюючим фактором є катодний процес, підвищення в зоні тертя концентрації катодного деполаризатора (кисню) підсилює корозійне зношування.

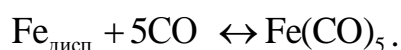
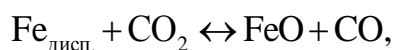
Рентгенографічні дослідження показали, що в продуктах фретинг-зношування заліза в повітряному середовищі поряд з оксидами γ - $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ і α - Fe_2O_3 присутні гідроокси типу γ - $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (або γ - FeOOH). Оксиди в високодисперсному стані є активними каталізаторами, добре адсорбують вологу і кисень, що сприяє прискоренню електрохімічної корозії з утворенням корозійних продуктів типу $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ [126].

Мабуть, в умовах вологого середовища і вільного доступу кисню окислювання протікає з високою швидкістю і утворюються α - $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (або α - FeOOH), а при обмеженому доступі кисню окислювання протікає повільно і закінчується утворенням γ - $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (γ - FeOOH) [1]. Оксиди, які на спочатку структурно пов'язані з металом сполучених поверхонь, мають відмінності від продуктів фретингу, що виходять із зони тертя. У порошку поряд зі звичайними оксидами виявляються продукти, які мають електрохімічну природу.

Підвищене зношування сталі і аномально високе зношування армко-заліза в середовищі вуглекислого газу при мінімальних значеннях коефіцієнта тертя, мабуть, пов'язані з утворенням в зоні тертя хімічних сполук, що перешкоджають адгезії і схоплюванню з взаємним перенесенням металу, а самі трибо-хімічні реакції в цьому середовищі, мабуть, активізують руйнування фрикційного контакту.

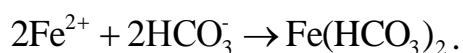
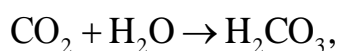
Фазовий рентгеноструктурний аналіз після випробувань в середовищі CO_2 показав в продуктах фретинг-корозії, крім оксидів (γ - Fe_2O_3 , α - Fe_2O_3) і гідроокисах γ - $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, наявність карбонілу $\text{Fe}_3(\text{CO})_{12}$. Хімічний аналіз дозволив також встановити освіту гідрокарбонатів типу $\text{Fe}(\text{CO})_{12}$ і наявність значної кількості води (до 15%). Високодисперсні оксиди, будучи

каталізатором, є активними для реакції гідратації, при якій розірвані хімічні зв'язки насичуються або за рахунок ОН-груп (після дисоціації адсорбованих молекул H_2O), або ці зв'язки притягують воду в молекулярній формі [126], забезпечуючи підвищений вміст вологи в продуктах фретингу. Високодисперсне (або аморфізоване) залізо в середовищі CO_2 окислюється відповідно до двох етапів [6]:



Надалі можлива взаємодія пентакарбонілу заліза $\text{Fe}(\text{CO})_5$ з оксидами, в результаті чого утворюються його похідні типу $\text{Fe}_3(\text{CO})_{12}$.

У середовищі CO_2 руйнування фрикційного контакту може сприяти утворенню і подальшої дисоціації вугільної кислоти H_2CO_3 , в результаті чого утворюються гідрокарбонати:



Виникнення в зоні тертя при фретинг-корозії радикальних форм хемосорбції (наприклад, $\text{Fe}_3(\text{CO})_{12}$) є наслідком процесів гетерогенного каталізу, які свідчать про формування в умовах вібрації на поверхнях тертя і в прошарку продуктів фретинг-корозії великої кількості адсорбційних центрів [127].

Таким чином, утворення в середовищі CO_2 карбонілов і гідрокарбонатів, що володіють підвищеною схильністю до гідратації, з одного боку, сприяє видаленню продуктів корозії із зони тертя, а з іншого – корозійні процеси ускладнюють схоплювання, що супроводжується взаємними перенесенням металу з однієї поверхні контакту на іншу. В таких умовах, незважаючи на істотний знос, відбувається зниження коефіцієнта тертя.

3.4. Вплив водного середовища

Спряження контактуючих поверхонь вузлів транспортних засобів знаходяться під дією значних знакозмінних навантажень, які діють не тільки у тангенціальному, а і у нормальному напрямку до поверхні спряження (рис. 3.5), що призводить з часом до виникнення мікрозазорів у які просочується агресивне оточуюче середовище – вода із різними домішками. У результаті різнонаправленості циклічних навантажень (перпендикулярних до площин контакту у мікрозазорах) в рідині виникають кавітаційні процеси (рис. 3.5) [116, 121].

Проведено ряд експериментальних досліджень із зміни властивостей та енергетичного стану води, яка піддавалася впливу вібраційних коливань із виникненням кавітаційних процесів [116]. В результаті досліджень встановлено, що зменшується коефіцієнт поверхневого натягу рідини, збільшується водневий показник рН від 6,7 до значення 9 одиниць.

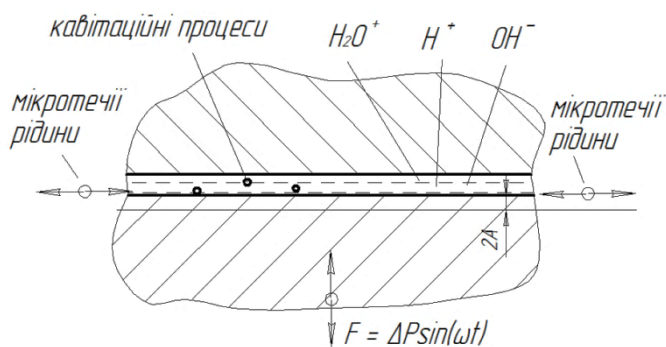


Рис. 3.5. Модель впливу вібраційних коливань на агресивне водне середовище

На стадії, коли діють вібраційні коливання на повітрі, на хід процесу можуть впливати практично тільки хімічно активні гази – O_2 і H_2 . Але коли вібраційні коливання діють на поверхні у водних середовищах вони створюють гемолітичний розрив ковалентних зв'язків у молекулі води та утворення радикальних частинок H^+ , OH^- , які мають підвищену окиснювальну здатність

(див. рис.3.6). 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. У кінцевому підсумку, вплив кавітації на водні розчини зводиться до єдиного процесу – розщепленню молекул води в кавітаційних пухирцях.

Експериментальні результати [128] показали, що при вібраційному впливу на водні розчини спостерігається різка зміна фізико-хімічних і хімічних властивостей води. Наприклад, при ударному стисненні (позначено \rightarrow) до $1,27 \cdot 10^4$ МПа концентрація кожного з одночасно існуючих іонів H^+ , OH^- , досягає 5 моль-екв/л, тобто змінюється на сім порядків. Збільшення електролітичної дисоціації води було використано для проведення у водних розчинах за вельми короткий проміжок часу ~ 1 мкс при тисках $(2,7 \dots 4,0) \cdot 10^3$ МПа деяких окисно-відновних реакцій за участю іонів хромату, нітрату, перхлорату, сульфату і т. п. Результати досліджень Тальрозе і Лейдлера [129] показали, що нижчий потенціал, при якому утворюються (у невеликій кількості) іони H^- , дорівнює $5,6 \pm 0,5$ В. Утворення основного іона H_2O^+ проходить при $13,0 \pm 0,2$ В. Кількість іонів H_2^+ , O^- та інших настільки мала, що їхньою присутністю можна знехтувати.

Імовірність здійснення реакції



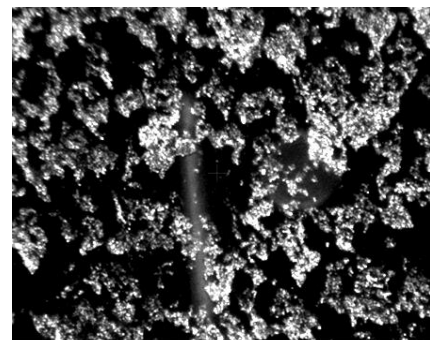
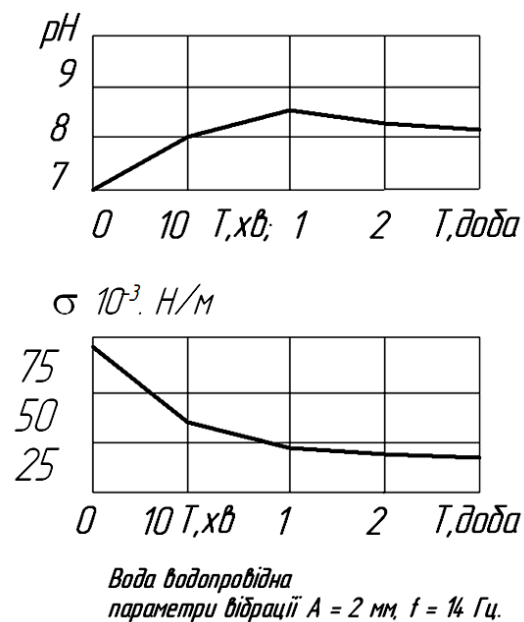
велика, тому що відносна кількість іонів H_2O^+ перевищує суму усіх інших первинних продуктів розщеплення води. Радикал OH^- утворюється головним чином за реакцією:



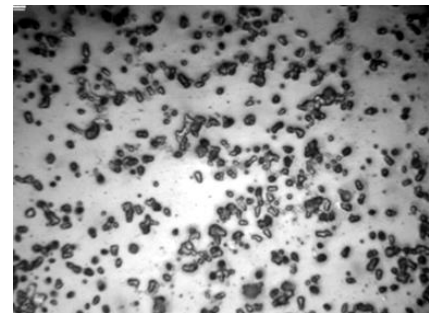
тому що, судячи з інтенсивності смуги H^+ , з досліджень [129] у мас-спектрі, кількість іонів H^+ мала. В ході проведених експериментальних випробувань за методикою [129] та згідно способу [131] досліджувалася зміна параметрів води, а саме: водневого показника рН та окисного відновного потенціалу води (показник *ORP*) від тривалості оброблення кавітацією та їх зміна у часі після обробки кавітацією (рис. 3.6). Зростання водневого показника рН (рис. 3.6), за

період оброблення кавітацією, спричинене розриванням водневих зв'язків у молекулах, але з часом цей показник стабілізується на рівні 8,2 рН. Встановлено, що зменшується коефіцієнт поверхневого натягу рідини (рис.3.6).

Структура кристалів осаду краплі води, обробленої протягом 10 хвилин вібраційними коливаннями представлена на рис. 3.7,б. 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.3.7,а.



а



б

Рис. 3.6. Зміна показників води: рН, σ з часом, оброблення кавітацією та їх зміна у часі після обробки кавітацією

Рис. 3.7. Структура кристалів осаду води: а – без обробки; б – оброблена кавітацією, збільшення у 250 разів

Такий вигляд кристалів осаду краплі води пояснюється отриманим низьким коефіцієнтом поверхневого натягу та розривом водневих зв'язків.

3.5. Термодинаміка фретинг-корозії

Різноманіття трибохімічних процесів, що викликають фретинг-корозію і їх взаємовплив ускладнює аналітичний опис цього явища. Розгляд різних за своєю природою фізико-хімічних процесів, які спільно протікають, можна проводити з єдиних енергетичних позицій в рамках термодинаміки незворотних процесів [132] 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 процеса: пластична деформація, хімічна корозія (окислення), електрохімічна корозія і утворення нових вільних поверхонь при розвитку явищ поверхневого руйнування. Вказані процеси можна описати відповідними функціями. Ці зв'язки описуються за допомогою лінійної залежності узагальнених потоків від узагальнених сил (лінійний закон):

$$I_i = \sum_{k=1}^n C_{ik} A_k, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (3.42)$$

Коефіцієнти C_{ik} називаються феноменологічними (кінетичними) коефіцієнтами. При цьому встановлюється, що при відповідному виборі потоків I_i і сил A_k матриця кінетичних коефіцієнтів є симетричною (співвідношення взаємності Онзагера):

$$C_{ik} = C_{ki} A_k, \quad (i, k = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (3.43)$$

Узагальнені потоки і узагальнені сили зв'язуються дисипативної функцією Ψ , що характеризує швидкість розсіювання енергії, що підводиться до системи при незворотному процесі. Сумарна дисипативна функція має вигляд:

$$\psi = \sum_i \psi_i = \sum_i T \frac{d_i s}{dt} = \sum_i I_i \cdot A_i, \quad (3.44)$$

де T – температура;

$\frac{d_i s}{dt}$ – виробництво ентропії i -процесу.

У першому наближенні витрати і незворотне розсіювання енергії при фретинг-корозії металів визначають чотири основні процеси, які можна охарактеризувати відповідними дисипативними функціями (ψ):

1. Пластична деформація і зміцнення металу при розмноженні і взаємодії дислокацій (ψ_d).
2. Хімічна корозія – реакція окислення (ψ_c).
3. Електрохімічний корозія (ψ_e).
4. Створення нових вільних поверхонь при корозійно-втомному руйнуванні (ψ_s).

Сумарна приведена дисипативна функція (що припадає на одиницю площі контакту) буде дорівнювати:

$$\psi = \psi_d + \psi_c + \psi_e + \psi_s = I_d \cdot A_d + I_c \cdot A_c + I_e \cdot A_e + I_s \cdot A_s, \quad (3.45)$$

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 [89],

$E_p = \frac{G \cdot b^2}{4\pi(1-\mu)} \ln\left(\frac{r_1}{r_0} - l_\pi\right) \cdot V_p \cdot \int_0^{l_p} f(l_p) dl_p$. – зміцнення металу (стор. 83);

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.

Таким чином, дисипативна функція розглянутої термодинамічної системи набуває вигляду:

$$\psi = I_d \cdot A_d + I_c \cdot A_c + I_e \cdot \eta + I_s \cdot \Delta\sigma. \quad (3.46)$$

На підставі лінійного закону (3.42) з рівняння (3.46) отримана система феноменологічних рівнянь [132]:

$$I_d = C_{11}A_d + C_{12}A_c + C_{13}\eta + C_{14}\Delta\sigma. \quad (3.47)$$

$$I_c = C_{21}A_d + C_{22}A_c + C_{23}\eta + C_{24}\Delta\sigma. \quad (3.48)$$

$$I_e = C_{31}A_d + C_{32}A_c + C_{33}\eta + C_{34}\Delta\sigma. \quad (3.49)$$

$$I_s = C_{41}A_d + C_{42}A_c + C_{43}\eta + C_{44}\Delta\sigma. \quad (3.50)$$

З огляду на співвідношення взаємності Онзагера (3.43) і вводячи відповідні нові позначення коефіцієнтів, систему рівнянь (3.47)-(3.50) перепишемо в наступному вигляді:

$$I_d = C_1A_d + C_2A_c + C_3\eta + C_4\Delta\sigma. \quad (3.51)$$

$$I_c = C_2A_d + C_5A_c + C_6\eta + C_7\Delta\sigma. \quad (3.52)$$

$$I_e = C_3A_d + C_6A_c + C_8\eta + C_9\Delta\sigma. \quad (3.53)$$

$$I_s = C_4A_d + C_7A_c + C_9\eta + C_{10}\Delta\sigma. \quad (3.54)$$

Рівняння (3.51-3.54) дають можливість характеризувати взаємний вплив узагальнених потоків процесів на різних стадіях розвитку фретинг-зношування.

Підставляючи рівняння (3.51)-(3.54) в (3.46), отримуємо остаточний вираз для приведеної дисипативної функції, що визначає швидкість розсіювання енергії:

$$\psi = C_1 A_d^2 + 2A_d(C_2 A_c + C_3 \eta + C_4 \Delta\sigma) + 2A_e(C_6 \eta + C_7 \Delta\sigma) + 2C_9 \cdot \Delta\sigma \cdot \eta + C_5 A_c^2 + C_8 \eta^2 + C_{10} \Delta\sigma^2. \quad (3.55)$$

Вище зазначалося, що на кожній з трьох основних стадій фретинг-корозії спільно розвиваються певні провідні і супутні фізико-хімічні процеси. Їх накладення і взаємовплив визначає специфіку контактних явищ на відповідній стадії фретинга.

На першій стадії фретинг-корозії провідними є деформаційні процеси і процес утворення нових вільних поверхонь при початковому адгезійному зношуванні, які взаємно впливають на інтенсивність (потік) один одного. З рівнянь (3.51) і (3.54) при $A_c, \eta = 0$ знаходимо відповідні перехресні зв'язки:

$$I_s = \left(\frac{C_1 \cdot C_{10} - C_4^2}{C_1} \right) \Delta\sigma + \frac{C_4}{C_1} I_d; \quad (3.56)$$

$$I_d = \left(\frac{C_1 \cdot C_{10} - C_4^2}{C_{10}} \right) A_d + \frac{C_4}{C_{10}} I_s, \quad (3.57)$$

де $\frac{C_4}{C_1}$ – коефіцієнт посилення потоку вільних поверхонь за рахунок зростання потоку дислокацій;

$\frac{C_4}{C_{10}}$ – коефіцієнт впливу приросту вільних поверхонь на швидкість розмноження дислокацій.

На другій стадії фретинг-корозії процес накопичення в зоні тертя оксидів з урахування виникнення нових вільних поверхонь. Перший фактор виявляється при розгляді пари рівнянь (3.51) і (3.52), а другий зв'язок перехресних явищ впливає з аналізу рівнянь (3.52) і (3.54).

З рівнянь (3.51) і (3.52) при η , $\Delta\sigma = 0$ отримуємо:

$$I_c = \left(\frac{C_1 \cdot C_5 - C_2^2}{C_1}\right) A_c + \frac{C_2}{C_1} I_d; \quad (3.58)$$

$$I_d = \left(\frac{C_1 \cdot C_5 - C_2^2}{C_5}\right) A_d + \frac{C_2}{C_5} I_s, \quad (3.59)$$

де $\frac{C_2}{C_1}$ – визначає приріст швидкості окислення, що викликається одиничним потоком дислокації;

$\frac{C_2}{C_5}$ – визначає приріст потоку дислокацій на одиницю швидкості хімічної реакції.

Рівняння (3.58) і (3.59) описують механо-хімічний і хіміко-механічний ефекти [89,133]. При виході дислокацій на поверхню зростає хімічний потенціал металу, що призводить до зростання спорідненості і швидкості хімічної реакції. Сполучений хіміко-механічний ефект обумовлений зниженням поверхневого потенційного бар'єру, що блокує вихід дислокацій, при хімічній корозії металевих поверхонь.

З рівнянь (3.52) і (3.53) при $\eta = 0$, A_d , знаходимо:

$$I_c = \left(\frac{C_5 \cdot C_{10} - C_7^2}{C_{10}}\right) A_c + \frac{C_7}{C_{10}} I_s; \quad (3.60)$$

$$I_s = \left(\frac{C_5 \cdot C_{10} - C_7^2}{C_5}\right) \Delta\sigma + \frac{C_7}{C_5} I_c, \quad (3.61)$$

де $\frac{C_7}{C_{10}}$ – характеризує збільшення швидкості окислення, що викликається одиничним потоком вільних поверхонь;

$\frac{C_7}{C_5}$ – характеризує приріст потоку вільної поверхні, що припадає на одиницю швидкості окислення.

При утворенні нових вільних поверхонь збільшується ізобарно-ізотермічний потенціал системи, що призводить до зростання хімічної активності (3.60). Одночасно можливо і зворотний вплив (3.61).

Частково для другої, а також для третьої стадії фретинг-корозії (корозійно-втомного руйнування) подібні дві пари механо-хімічних і хіміко-механічних перехресних явищ, що описують зв'язок інтенсивності електрохімічної корозії (анодного струму I_e) з деформаційними процесами (потокм дислокацій I_d) і швидкістю утворення вільних поверхонь I_s , можна отримати з наступних рівнянь (3.54) і (3.55) при $A_d, \Delta\sigma = 0$ отримуємо:

$$I_e = \left(\frac{C_1 \cdot C_8 - C_3^2}{C_1}\right)\eta + \frac{C_3}{C_1} I_d; \quad (3.62)$$

$$I_d = \left(\frac{C_1 \cdot C_8 - C_3^2}{C_8}\right)A_d + \frac{C_3}{C_8} I_e, \quad (3.63)$$

де $\frac{C_3}{C_1}$ – коефіцієнт приросту швидкості електрохімічної корозії (I_e) за рахунок зростання потоку дислокацій (I_d);

$\frac{C_3}{C_8}$ – коефіцієнт посилення потоку дислокацій (I_d) при зростанні швидкості електрохімічної корозії (I_e).

З (3.53) і (3.54) при $A_d, A_c = 0$ знаходимо:

$$I_e = \left(\frac{C_{10} \cdot C_8 - C_9^2}{C_{10}}\right)\eta + \frac{C_9}{C_{10}} I_s; \quad (3.64)$$

$$I_s = \left(\frac{C_{10} \cdot C_8 - C_9^2}{C_8}\right)\Delta\sigma + \frac{C_9}{C_8} I_e, \quad (3.65)$$

де $\frac{C_9}{C_{10}}$ – коефіцієнт активізації електрохімічної корозії (I_e) за рахунок збільшення нових вільних поверхонь (I_s);

$\frac{C_9}{C_8}$ – коефіцієнт приросту вільних поверхонь (I_s) при активізації електрохімічної корозії (I_e).

3.6. Висновки до розділу 3

1. Аналіз деформаційних процесів при фретингу показав, що густина енергії пластичної деформації на початковій стадії малоамплітудного фретингу співрозмірна з енергією, яка необхідна для зародження тріщин та залежить від параметра пластичності n , характеристик матеріалу і числа циклів навантаження.

2. В результаті виникнення ділянок нових фаз вільна енергія системи змінюється в результаті перебігу двох взаємно протилежних процесів: переходу частини атомів з однієї фази з більшою енергією в іншу фазу з меншою енергією та виникненням міжфазної поверхні розділу та затратою на це певної енергії. Теоретично фретинг сприяє процесам, пов'язаним із фазовими перетвореннями.

3. Отримано аналітичну залежність для визначення енергії, яка витрачається на збільшення густини дислокацій в одиничному об'ємі при фретинг процесі в порівнянні з граничною величиною енергії деформації в локальному об'ємі для даного металу при утворенні мікротріщин.

4. Запропоновано аналітичну залежність опису кінетики проходження другої фази трибохімічної реакції, яка ініціює фретинг-корозію, а також визначено закономірність зміни активності поверхні контактуючих тіл другої фази проходження трибохімічної реакції для сталі 45.

5. Дослідження фретинг-корозії в різних газових середовищах показали загальну тенденцію до зниження коефіцієнта тертя при одночасному збільшенні зношування, що пов'язано з корозійною активністю матеріалів та їх схильністю до адгезії.

6. Встановлено, що при вібраційному впливу на зовнішнє агресивне

середовище (воду) спостерігається різка зміна її фізико-хімічних і хімічних властивостей, а саме утворення радикальних частинок H^+ , OH^- , які мають підвищену окиснювальну здатність.

7. Гідратація високодисперсних окислів (карбонатів) з одночасним їх насиченням адсорбованим киснем з одного боку, сприяє зниженню коефіцієнта тертя, а з іншого – створює умови для руйнування спряжень по механізмам хімічної, так і електрохімічної корозії.

8. На основі принципів нерівноважної термодинаміки (незворотних процесів) запропоновані теоретичні представлення фізико-хімічної механіки фрикційного контакту, що стосуються природи і взаємовпливу процесів, які визивають фретинг-корозію металу.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ФРЕТИНГ-ЗНОШУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА НОВИЙ МЕТОД ЗАХИСТУ

4.1. Окислювальні та адсорбційно-електрохімічні процеси при фретинг-корозії

Фретинг-корозія розвивається при одночасному впливі на фрикційний контакт вібраційних сил тертя і корозійного середовища. По механізму фретинг-корозія може бути хімічною та електрохімічною, а за умовами протікання може супроводжуватися процесами, спорідненими корозії під напругою, корозійної втоми, а також контактної і щілинної корозії.

Кореляція між характеристиками макроскопічної міцності металів зі схильністю до фретинг-корозії, як правило, відсутня. Здатність металів протистояти руйнуванню при фретинг-корозії залежить від комплексу їх вязко-пружних властивостей, а також їх хімічної активності з урахуванням складу і властивостей зовнішнього середовища [3-18]. Так, якщо надлишок кисню в газовому середовищі може зменшити знос при звичайному терті ковзання, то в умовах фретингу кисень посилює пошкодження фрикційного контакту, що свідчить про специфіку корозійних процесів які розвиваються.

Експериментальні дані щодо впливу вологості атмосфери на інтенсивність фретинг-корозії суперечливі. У різних випадках вологість зменшувала фретинг-зношування, а в інших – з ростом вологості в певних межах втрата у вазі зростала [134].

Мабуть, при підвищенні вологості атмосфери, слід враховувати два конкуруючих фактора. З одного боку, корозійні процеси сприяють руйнуванню фрикційного контакту, а з іншого – водяна пара, адсорбуючись (або конденсуючись) на сполучених поверхнях і продуктах фретингу, фізично змінює фрикційні характеристики (діючи як мастило), сприяючи видаленню окислів із зони контакту і, тим самим, зменшуючи інтенсивність зносу. Багато

що залежить від амплітудно-навантажувального режиму, тривалості та схеми контактної взаємодії, а також від природи контактуючих матеріалів і стадії фретинг-корозії [3].

Було визначено вплив ролі двох останніх чинників на механізми корозії в умовах фретинга. Досліджувалася фретинг-корозія ряду сталей і сплавів, що мають різні механічні та фізико-хімічні властивості, придбані в наслідок термообробки за стандартними для кожного матеріалу режимам (табл.4.1).

Таблиця 4.1

Матеріал	Електрохімічні і механічні властивості				
	φ , В	HV, кГ/мм ²	σ_y кГ/мм ²	σ_{-1} кГ/мм ²	$\sigma_{0,2}$ кГ/мм ²
Сталь 45	-0,44	600	170	38	145
40ХНМА	-0,30	500	109	49	97
ЭИ268	-0,15	450	ПО	50	77
ЖС6-К	+0,05	490	95	27	84
ЭИ481	+0,10	312	94	43	60
ЭИ703	+0,15	190	55	14	20

Крім того досліджувалася фретингостійкість ряду електролітичних покриттів на сталь 45 (Zn, Cd, Sn, Pb). Фретинг-корозія створювалася в кільцевому контакті при коливальному русі навколо власної осі торця втулки (рухливий зразок) щодо торця нерухомо закріпленого циліндра.

У всіх випадках рухомим контртілом слугувала втулка зі сталі 45 загартованої і відпущеної до HV 600 одиниць, при цьому оцінювався знос як рухомого, так і нерухомого зразків. Для всіх досліджених матеріалів (нерухомі зразки) вимірювалися стандартні електродні потенціали в 3 % розчині NaCl (φ , В) по відношенню до стандартного водневого електроду (рис. 4.1, рис. 4.2).

Отримані експериментальні дані (рис. 4.1, рис. 4.2) свідчать про наступне.

1. Чим більше позитивний електродний потенціал сплаву по відношенню до сталі 45, тим менше величина її фретинг-зношування (рис. 4.1 крива 1).

Навіть при відносно низькій міцності висока корозійна стійкість матеріалу забезпечує зростання опірності фретинг-зношування (наприклад, сталь ЭИ703). Одночасно з ростом ступеня благородства сплаву, зростає фретинг-зношування контртіла – сталі 45 (рис. 4.1, крива 2).

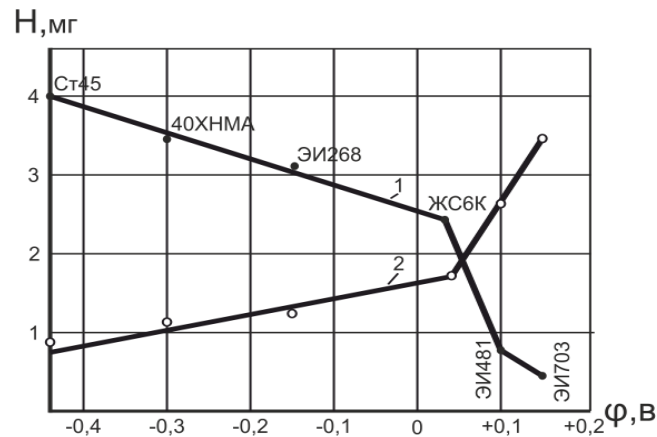


Рис. 4.1. Залежність фретинг-зношування сталей та сплавів від їх стандартного електродного потенціалу в контакті із сталлю 45: 1 – значення стандартного електродного потенціалу; 2 – відповідні значення зношування сталей при $P = 10\text{МПа}$; $A = 50\text{ мкм}$; $N = 5 \cdot 10^5$ циклів; $f = 30\text{ Гц}$

2. Аналогічні закономірності встановлені при дослідженні фретинг-корозії електролітичних покриттів і їх впливу на зношування контртіла – сталі 45. На рис. 4.2 зазначені покриття розташовані у електрохімічний ряд в міру зростання їх стандартного електродного потенціалу.

Чим більше благородний матеріал покриття знаходився в контакті зі сталлю 45, тим менше цей матеріал зношувався і, в свою чергу, тим більше піддавалася фретинг-зношуванню сама сталь.

Зазначені закономірності, маючи всі ознаки контактної корозії [3], свідчать про те, що при накопиченні в зоні тертя оксидів в високодисперсному стані, здатних активно адсорбувати на своїй поверхні вологу і кисень повітря, на процеси хімічної корозії (окислення) починає накладатися електрохімічна корозія.

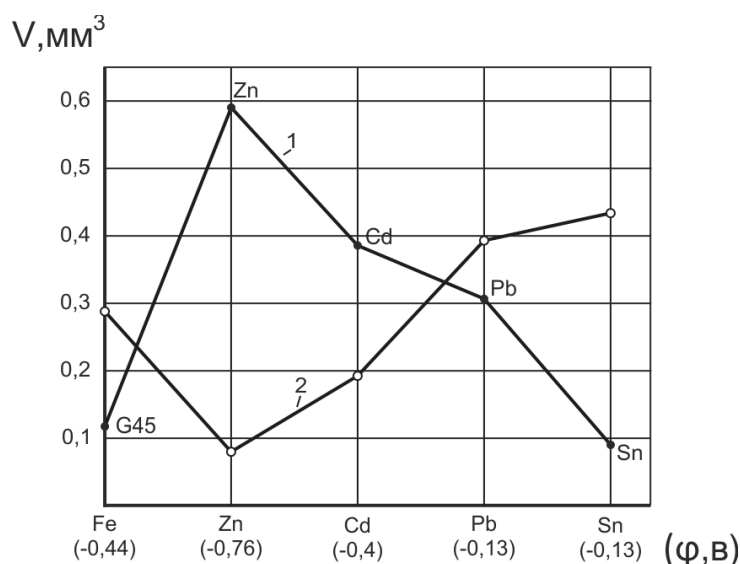


Рис. 4.2. Об'ємне фретинг-зношування електролітичних покриттів, побудованих у електрохімічний ряд за значеннями стандартного електродного потенціалу (крива 1) відповідні значення зношування контртіла – сталі 45 (крива 2): $P = 10 \text{ МПа}$; $A = 50 \text{ мкм}$; $N = 5 \cdot 10^5$ циклів; $f = 30 \text{ Гц}$

При хімічній корозії окислювально-відновна реакція протікає в одному акті, а при корозії електрохімічній окислювальна і відновна реакції відбуваються окремо. Коли в наших експериментах контакт здійснювався між різними матеріалами, формувалися макрогальванічні пари, в яких розвивалася контактна корозія [3]. В однойменних парах тертя (Ст 45-Ст 45) електрохімічна корозія викликається мікрогальванічними парами (неоднорідність структури за складом, різна орієнтація кристалів, структурні недосконалості і т.п.). Наприклад, наявність в сталі цементиту, що є додатковою катодною домішкою, в нейтральному середовищі має посилювати швидкість електрохімічної корозії з кисневою деполаризацією переважно при катодному контролі [3].

Відомо [2], що в першому наближенні можна виділити три стадії розвитку фретинг-корозії:

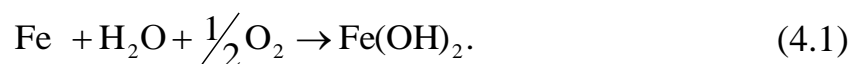
- 1) руйнування природних окисних плівок, захоплення ювенільних поверхонь, утворення вільних металевих частинок високої дисперсності;
- 2) окислення металевих частинок, формування проміжної прошарку окислів (інкубаційний період);

3) відшарування втомнорозукріплених зон фрикційного контакту (корозійно-втомне руйнування).

Корозійно-активне середовище, що сприяє електрохімічним процесам, формується в основному у другому (інкубаційному) періоді фретингу. При цьому кількість адсорбційноактивних оксидів в зоні вібраційного контакту досягає рівноважного значення, коли вихід частинок із зони тертя врівноважується їх виникненням.

Враховуючи, що обсяг окислів, як правило, значно більше (для оксидів заліза майже у два рази) обсягу металу, з якого вони утворюються, в зоні тертя створюються великі локальні знакомінні напруження. При формуванні середовища, що сприяє електрохімічній корозії, розвивається корозійно-втомне руйнування зони тертя (третя стадія фретинг-корозії).

При рентгенографічних дослідженнях продуктів фретинг-корозії сталі 45 встановлено наявність, поряд з оксидами γ - Fe₂O₃ (Fe₃O₄) і α -Fe₂O₃, гідроксили типу γ -Fe₂O₃·H₂O (або γ -FeOOH). В умовах електрохімічної корозії сумарну окислювально-відновну реакцію можна представити у вигляді:



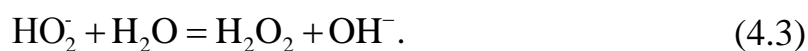
Тонко подрібнені продукти фретинг-корозії металів – оксиди є, як правило, напівпровідниками, здатними надати корозійним контактним явищам автокаталітичний характер [135]. Каталітична дія оксидів проявляється в прискоренні процесів хемосорбції кисню і вологи, причому – в реакційно здатних радикальних і іон-радикальних формах. Згідно електронної теорії, адсорбції і каталізу на напівпровідниках [18,135] адсорбовані молекули зазнають значне ослаблення внутрішньо-молекулярних зв'язків, а також втягують хемосорбційний зв'язок вільні носії зарядів (електрони і дірки) напівпровідника. Перехід вільних носіїв на адсорбовану частку надає їй зарядовий стан (O₂⁻, O⁻, H₂O⁺ і т.п.), тобто переводить в радикальну або іон-

радикальну форму, що має високу реакційну здатність. Крім того, хемосорбція молекули може супроводжуватися дисоціацією. Так, в хемосорбованих молекулах води можливе послаблення зв'язків О-Н, втрата протона і перетворення в ОН-групи. Така про протонізація води підвищує її кислотність.

Відомо [136], що хімічні реакції окислення за участю радикальних форм адсорбції в присутності каталізатора протікають через проміжну стадію утворення перекісних продуктів. Так, заряджений іон-радикал O_2^- з адсорбованою молекулою води H_2O^+ утворює H_2O -радикал по реакції:



Радикал HO_2 окисляє метал і переходить в іон HO_2^- , який, реагуючи з водою, утворює перекис водню:



Молекули води і кисню при адсорбції заряджають поверхню оксидів, внаслідок чого збільшується електропровідність окисною прошарку. Хемосорбовані молекули кисню, будучи акцепторами, локалізують вільні електрони, заряджаючи поверхню оксидів негативно, а молекули води донори заряджають оксиди позитивно.

Таким чином, каталітична дія оксидів в процесі виникнення на них реакційно здатних радикальних і іон-радикальних (заряджених) форм хемосорбції кисню і вологи обумовлює формування в зоні тертя реакційно-активного електролітичного середовища, в якому електрохімічні процеси мають характер каталітичної корозії [18].

Виникнення поля, що прискорює адсорбцію кисню в іон-радикальній формі (O_2^-, O^-). зменшує перенапруження іонізації металу, полегшуючи

анодний процес. З іншого боку, радикальні форми адсорбованої вологи (H_2O^+ , HO_2^-) прискорюють катодний процес.

З підвищенням ступеня гідратації оксидів їх адсорбційна активність зростає [18] і при досягненні певної критичної концентрації вологи і адсорбованого (розчиненого) кисню швидкість фретинг-корозії сталі повинна знижуватися внаслідок розвитку процесів пасивації. Дійсно, експериментально встановлено [134] що при підвищенні вологості середовища до 30 - 40 %, відбувалося збільшення інтенсивності фретинг-зношування сталі, а при подальшому зростанні вологості пошкоджуваність фрикційного контакту зменшувалася. Спостерігалось [137] підвищення інтенсивності фретинг-корозії при знижених температурах, з точки зору адсорбційно-електрохімічного механізму, також можна пов'язувати зі збільшенням адсорбційної активності оксидів.

Таким чином, методи, що попереджають розвиток електрохімічних процесів, можуть бути ефективними в мінімізації фретинг-пошкоджень. Наприклад, значна опірність фретинг-зношуванню сталей типу ЭІ481 і ЭІ703 (див. рис. 4.1) обумовлена високим вмістом хрому (12-25 %) і нікелю (10-35 %), які знижують критичну щільність струму анодної поляризації до малих величин і сплав при корозії швидко пасивується.

4.2. Механіка контактної взаємодії та особливості фретинг-пошкоджень

В умовах мікроамплітудного навантаження швидкість мікропроковзування є дуже малою навіть при великих частотах коливань. Саме амплітуда у 5-20 мкм практично не дає візуально видимих ознак поперед руйнівного стану з'єднання: відсутні смуги, розхитування, вібрації [34].

Так при гармонічному законі коливань двох поверхонь з частотою 100 Гц й амплітуді відносних мікропереміщень 10 мкм максимальна швидкість проковзування дорівнює 3,14 мм/с. А для імпульсних коливань у формі

трикутника швидкість з такою ж амплітудою буде 2 мм/с. Такі малі відносні швидкості разом з малими мікропереміщеннями мають принципові особливості, які впливають на загальну картину фретінг-процесів у номінально-нерухомому контакті.

Для розуміння природи фретінгу, умов його ініціювання та подальшої еволюції контакту необхідно врахувати наступні ключові моменти:

- залежність тертя від відносної швидкості;
- ефект пам'яті при терті або часове запізнення критичної амплітуди проковзування;
- невизначеність або багатозначність сил тертя при нульовій відносній швидкості;
- час перебування контакту в умовах статичного тертя;
- попереднє зміщення контактних поверхонь.

Класичні моделі тертя, описані в роботах [96, 138, 139], складаються із функціональних залежностей різних параметрів, кожен з яких описує відповідні аспекти сили тертя. Головні тези полягають в тому, що будь-якому руху опирається сила тертя, її значення не залежить від швидкості і площі контакту. Це можна описати простим виразом $Q = Q_C \text{sign}(\dot{\vartheta})$, де сила тертя Q пропорційна нормальному навантаженню P : $Q_C = \mu \cdot P$. На рис.4.3 наведено основні моделі статичного тертя.

У випадку відсутності відносного руху ($\dot{\vartheta} = \dot{x} = 0$) сила тертя може приймати будь-які значення, які за модулем менше статичного тертя (рис. 4.3, а). Якою б малою не була сила, що прикладається до тіла, перед переходом до чистого ковзання будуть відбуватися мікрозміщення окремих ділянок номінальної площини контакту. В такому разі виникає черговий формальний парадокс: перебування контактних поверхонь у стані квазістатичного тертя, а значить у відсутності відносної швидкості, не є достатньою умовою зміщення поверхонь одна відносно іншої.

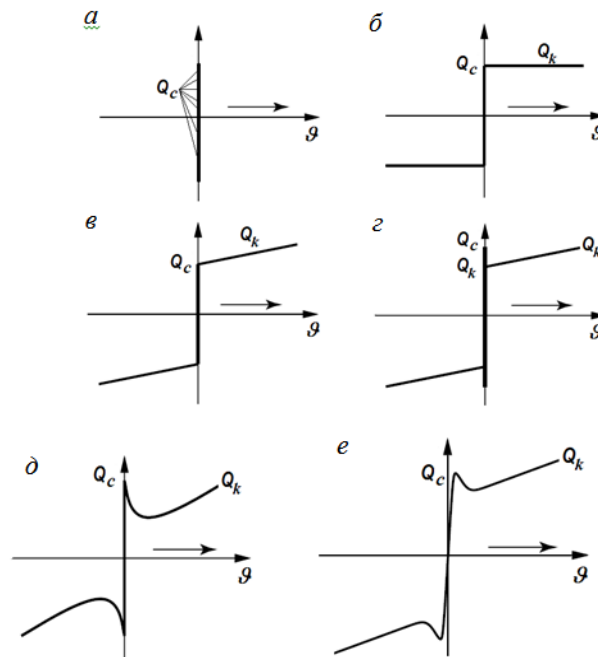


Рис. 4.3. Основні закони статичного тертя [96] (характеристики тертя $Q = f(\vartheta)$): *a* – багатозначність статичного тертя при $\vartheta = 0$; *б* – закон Кулона; *в* – закон Кулона + в’язке тертя; *г* – стрибок сили тертя в момент зрушення + Кулонове тертя в’язке тертя; *д* – гладкий закон переходу від статичного тертя до кінематичного (Штрибек ефект); *е* – неперервна модель тертя

Стан поверхонь та зовнішні фактори навантаження дають нам той чи інший закон тертя [96]. Наприклад в момент повного щеплення сила тертя може приймати будь якого значення не більше сили статичного тертя (рис. 4.3, *a*), а при переході до ковзання сила тертя може збільшуватись (рис. 4.3, *в*, *г*), або з початку зменшуватись, а потім збільшуватись. У цілому в залежності від перебігу сили тертя відбувається відповідна силова взаємодія двох поверхонь.

Важливим для розуміння стану малоамплітудного фретингу є встановлення початкового стану системи в момент пуску (перших десятків циклів), а саме позиціювання поверхонь, визначення напружено-деформованого стану, початкової пластичної деформації, характеристики множини мікроконтактів у границях номінальної площини. Все це визначає стаціонарну амплітуду відносного зміщення поверхонь та силу тертя на

певному проміжку часу, які значно відрізняється від амплітудно-силових параметрів у початковий момент часу.

Розглядаючи фретинг-процес, як еволюційний, важливо чітко визначити, в першу чергу експериментально, критерії відносного рівня упорядкованості процесу тертя. Без таких критеріїв важко буде відрізнити процес деградації від процесу самоорганізації. При цьому виникає проблема вибору керуючих параметрів. Для циклічних фрикційних мікропереміщень це може бути амплітуда (у бік збільшення), нормальна сила (у бік зменшення), сила тертя (у бік зменшення), параметри Штрибек-ефекту, температура, частота, реакційна здатність до окиснення, адсорбції та інших чинників. У мультистійких станах вибір одного із стаціонарних станів може бути визначений вибором початкових умов. Генеральним управляючим параметром динамічної системи є поняття повільного часу, що відповідає відомому явищу періодичності стадій фретингу. Для довготривалого прогнозування якості номінально-нерухомого з'єднання необхідно чітко визначити стан спряження за яким можливе його руйнування за механізмом фретинг- втоми чи фретинг-зношування.

Фетинг-процеси визначаються складним комплексом механічних, природних і хімічних процесів, які відбуваються в зоні контакту двох поверхонь [18]. Можна констатувати, що даний стан контакту характерний в більшості випадків для експлуатації номінально-фіксованих з'єднань, коли відсутні видимі відносні переміщення [140]. Труднощі полягають у тому, що для певного стану напружень та деформації поверхні амплітудно-частотна характеристика коливань двох тіл практично однакова, що виключає відносне зміщення поверхонь [141]. Проте, після дослідження вигляду поверхні зразків, виявлено пошкодження характерні для фретинга (рис. 4.4).

Складне поєднання адгезії, пружності контактного шару та динамічних явищ у систему «контакт – підповерхневий шар – тіло в цілому», не дають точного значення амплітуди ковзання за звичайним методом вимірювання. Для дослідження тертя запропоновано три основні принципи: закон тертя з низькими швидкостями, контактна динаміка в цілому та визначення латентних

особливостей еволюції поверхневого контакту при циклічних та тангенціальних коливаннях.



Рис. 4.4. Фотографія зміни ушкоджень зони контакту зразка при коливаннях за схемою металевої кульки (Ø 12,7 мм)

Схема установки для дослідження параметрів фрикційного контакту в умовах фретинга представлена у другому розділі та у [141, 142].

Розглянемо результати вейвлет-аналізу (WA) еволюції сил тертя, представлених на рис. 4.5 [141].

Об'єкт, що досліджується, нестационарний або неоднорідний для механічної системи з коливальним тертям. Вібродіагностика робочого стану номінально-фіксованих з'єднань базується на аналізі вібрації для фретинг-процесів, а головним показником робочого стану обладнання є інтенсивність і характер цих процесів. Ключовим моментом є те, що основне перетворення Фур'є висвітлює спектр функції, сигналу, зображення тощо, але це розбиття частоти глобальне, а не локалізоване; в той час як перетворення вейвлет забезпечує локалізоване розкладання частоти. Воно надає інформацію не тільки про те, які компоненти частоти присутні в сигналі, а також про те, коли і де вони відбуваються. Застосування WA показує, що в режимі повного попереднього переміщення спостерігаються коливання сили тертя. Це пояснюється невизначеною силою статичного тертя. У мить, яка передує початковому ковзанню, сила тертя стає нестабільною завдяки силам пружності та інерції (рис. 4.5).

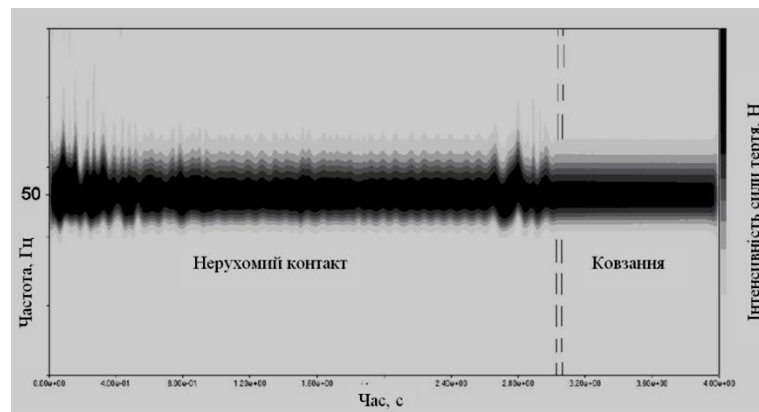


Рис. 4.5. Вейвлет-перетворення часової серії для сили тертя при її поступовому зменшенні і переході контакту від прилипання до ковзання до всієї площини контакту. Частота збудження $f = 50$ Гц

WA для частот, менших за частоту вимушених коливань, показує еволюцію квазістатичного тертя в межах номінального прилипання. Більшість віброактивності спостерігається у початковому моменті коливань і при переході від прилипання до ковзання (рис. 4.6).

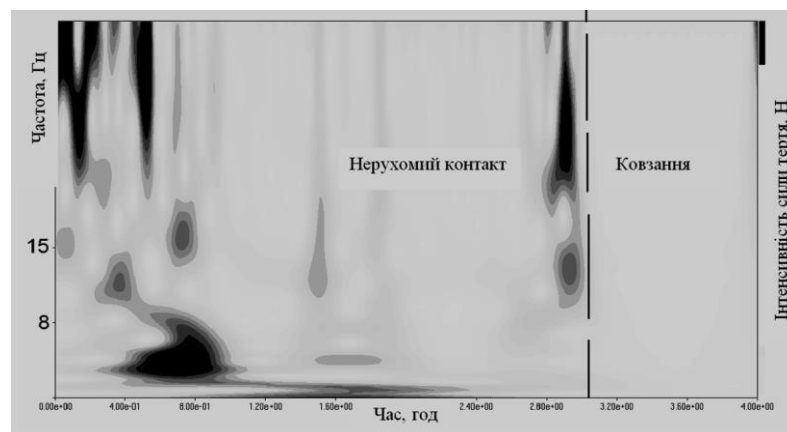


Рис. 4.6. Інтенсивність амплітудно-частотної характеристики на великих масштабах вейвлет-перетворення

Аналіз в області малих частот показує масштабні зміни в процесі або тенденції при амплітудно-частотній характеристиці сигналу для фіксованого часу еволюції. Сканування вейвлет-діаграми для малих частот визначає

кількісну картину віброактивності сили тертя на стадії номінального прилипання і при переході до ковзання (рис. 4.7).

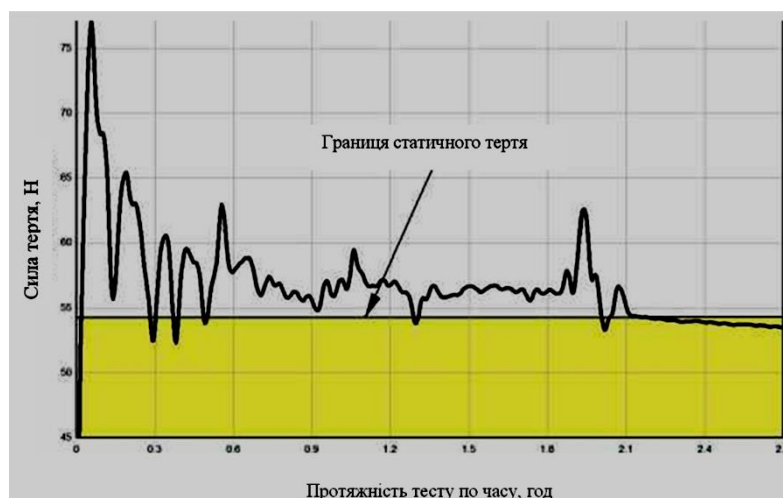


Рис. 4.7. Еволюція статичного тертя за часом

Використаний метод вейвлет-перетворення для трибологічного аналізу нестационарних вібросигналів від елементів контактної пари при їх тангенціальному циклічному навантаженні дозволив виділити особливості фрикційної взаємодії для різних станів контакту, ідентифікувати стадії ФП [141-143].

Амплітудно-частотний аналіз та проведений комплекс фізичних, комп'ютерних експериментів дали підстави виділити такий стан фрикційного контактування, який встановлюється на границі переходу від статичного тертя до кінематичного [142, 143]. Такий перебіг ФП характеризується як режим динамічного зчеплення-проковзування (РДЗП). Нижня границя РДЗП є такою, при якій проковзування поверхонь є співрозмірною з пружно-пластичною деформацією контакту в стані повного попереднього зміщення. Верхньою границею вважається така амплітуда коливань, при якій проковзування відбувається у границях плями контакту. Залежно від нормального тиску встановлено [141, 142], що РДЗП відбувається на фактичних або контурних

плямах контакту з амплітудами відносних мікропереміщень від 1...3 мкм до 20...30 мкм.

З практичної точки зору встановлено, що об'єкт досліджень, під час експлуатації, переходить від стану абсолютного (пружного) зчеплення до повного проковзування з амплітудами, які значно перевищують повне попереднє зміщення.

Вейвлет-трансформація дає можливість визначення тих, ледь помітних, змін характеру відносного руху поверхонь, які діагностують номінально-фіксовані з'єднання з метою його подальшого перебування в стані прилипання [141, 142]. Важливим є те, що аналіз часових рядів може бути здійснений у різних масштабах часу, щоб з'ясувати тенденції в довготривалій еволюції на малих частотах і функціонувати в більш дрібній шкалі на великих частотах.

Основним механізмом руйнування поверхневих шарів металів на всіх стадіях фретинг-процесу (адгезійна взаємодія, приробка, знос, що встановився) є малоциклова втома поверхневих мікрооб'ємів [2, 144-147]. Однак існує обмежена кількість повідомлень про експериментальне підтвердження вищеприписаної втомної моделі фретинг-корозії металів. Значна концентрація нормальних і дотичних напружень викликає інтенсивне зростання і рух дислокацій, які накопичуються в активних смугах ковзання перед різними перешкодами (схрещення дислокацій, траєкторії руху яких перетинаються між собою під деяким кутом; смуги деформування; кордони зерен; поверхневі плівки і т.п.). Це призводить до злиття декількох дислокацій в зародок тріщини. Далі зародкові тріщини ростуть і зливаються в мікротріщини. У загальному випадку, вищеприписані процеси, протікають до створення регулярної сітки втомних мікротріщин по всій площі номінального контакту поверхонь тертя [147].

Фретинг-корозія металевих поверхонь на основі заліза приводить до утворення продукту зношування, який складається з окислів: FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3 [18]. Слабке зношування характеризується тим, що поверхні залишаються захищені окисними плівками. Але для фретинга на ранніх стадіях цей процес

більш подібний на сильне зношування: відбувається збільшення шорсткості поверхні, електричний опір в зоні контакту досить малий, ріст сили тертя свідчить про виникнення значної макроскопічної адгезії, виникають тріщини і поверхня поступово руйнується. В найпростішому вигляді механізм фретинг-корозії включає взаємодію метала з металом, із поступовим стиранням шорсткості і неперервним утворенням та видаленням окислів металу. По різному можна оцінити вплив хімічних і механічних факторів.

Фретинг-процес можна розділити на ряд стадій, які протікають одночасно в межах номінальної площини контакту. На початковій стадії контакту виникають адгезійні явища [18]. Між нерівностями створюються локально високі напруження. В результаті відносного руху в сильно напружених місцях виникає надлишок енергії, який призводить до появи пластичної деформації.

Процес стирання викликає утворення окремих частинок метала та окислу, які накопичуються між контактуючими поверхнями. Отже з перших десятків циклів фретинга має місце швидке окиснення поверхні. Під дією тангенційних зміщень продукти руйнування поверхні діють як абразив у процесі зношування.

Друга стадія фретинг-зношування проходить в підповерхневому шарі. Верхній тонкий шар складається з спресованого порошку окислів, а більш низький товстий шар має високу дисперсність і не окислені частинки металу (рис. 4.8., 4.9.).



Рис. 4.8. Фотографія окисного шару, утвореного при фретингу сталі 45:

$A = 30$ мкм; $P = 30$ МПа

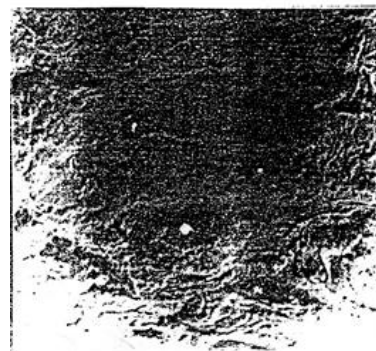


Рис. 4.9. Фотографія верхнього шару доріжки тертя, після очищення окислу (видно не окислені частки металу)

Границею даного шару є пластично недеформований метал. При цьому на границі шарів утворюються та розповсюджуються тріщини, відсікаючи деформований шар. З часом відбувається руйнування деформованого шару.

Після видалення мікрочастинок з основи металу утворюється поглиблення, в якому накопичуються окисли, які ініціюють подальше руйнування поверхні (рис. 4.10).

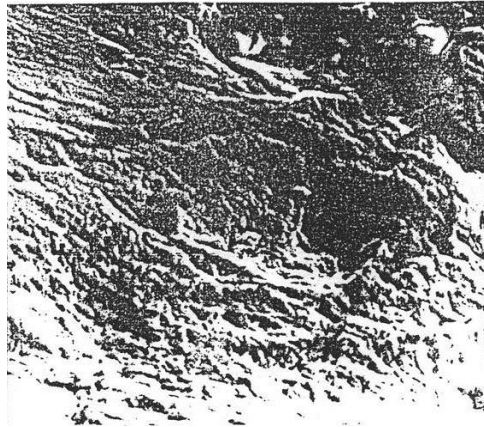


Рис. 4.10. Фотографія ділянки поверхні тертя сталі 45 після видалення частинок металу з матриці і відокремлення окислів

Отже зношування конструкційних сталей має в наявності всі критерії, характерні для фретинг-зношування: груба топографія поверхні тертя, велика сила тертя, підповерхневі явища втоми та крупне фрагментування поверхні. Змінити умови перебігу фретинга та пасивувати вищенаведені процеси можливо при застосуванні легкоплавких сплавів на основі Bi-Sn-Pb-Cd [123, 148, 199].

4.3. Застосування захисного покриття від фретинг-корозії

Перспективним напрямом досліджень уповільнення фретинг-корозії у номінально-нерухомих з'єднаннях деталей машин є застосування м'яких покриттів на основі Bi-Sn-Pb-Cd, які мають низький опір текучості і здатні

змінювати коефіцієнт тертя на контактуючих поверхнях, а також можуть поглинати певну частину енергії вібрації [143, 150-151].

Сплави на основі Bi-Sn-Pb-Cd мають досить низькі температури плавлення. Запропоновано наступний легкоплавкий сплав, який виготовляються у вигляді порошку та пасти-пропою: Bi – 50,1%, Sn – 14,2%, Pb – 24,9%, Cd – 10,8% з температурою плавлення 65,5°C.

Завдяки низької температури плавлення має більшу здатність розташовуватися у порах металу на початкових стадіях фретинг-процесу.

Картину розташування порошкового легкоплавкого сплаву при динамічному процесі між контактуючими поверхнями та утворення окисних плівок і продуктів зношування контактуючих поверхонь можна представити наступними схемами: рис. 4.11- рис. 4.13 [152].

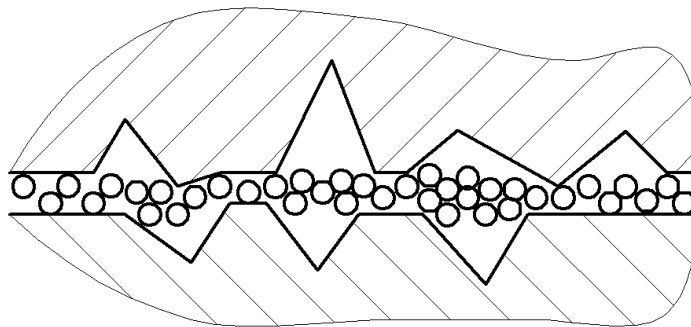


Рис. 4.11. Схема розташування легкоплавкого сплаву на початку відносного переміщення поверхонь

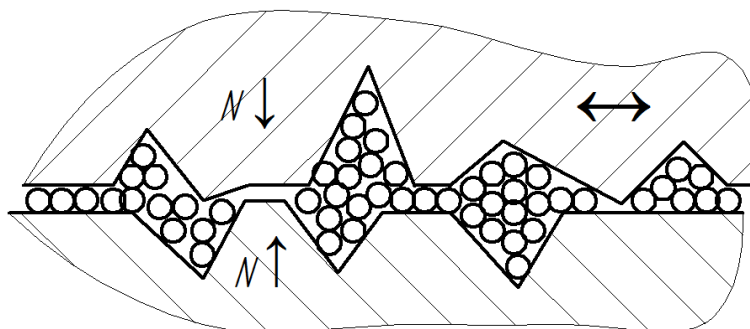


Рис. 4.12. Схема адгезійного заповнення пор легкоплавким сплавом контактуючих поверхонь при фретингу

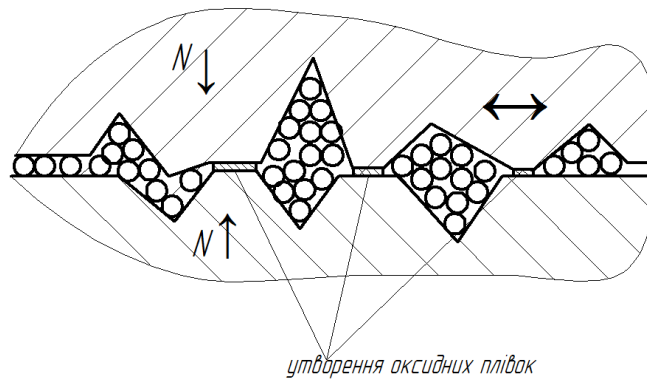


Рис. 4.13. Схема утворення окисних плівок на контактуючих поверхнях

Нанесення легкоплавкого сплаву між контактуючими поверхнями призводить до їх розділення. При дії тангенціальних мікропереміщень проходить процес заповнення мікропор контактуючих поверхонь, що призводить до створення ефекту екранування поверхні твердого тіла від дії оточуючого середовища, перш за все дифузії радикалів газів: кисню, водню і вуглекислого газу; зменшення адгезії контактуючих поверхонь тіл; створення умов для виникнення рідинного тертя в окремих точках; пониження еквівалентних напружень у поверхневому шарі; утворення третього тіла з продуктів окиснення.

Домішки у вигляді Bi-Sn-Pb-Cd змінюють умови дифузії і призводять до зміни швидкості реакції окиснення у тому випадку, коли іони домішок входять в склад продукту взаємодії. Введення іонів домішок інертних елементів у вакансії кристалічної решітки призводить до зниження концентрації іонів матриці в міжвузлах, а в результаті і до зменшення швидкості окиснення матриці.

Так як швидкість реакції залежить від процесу дифузії в твердому тілі, домішки змінюють умови дифузії, а це в свою чергу приводить до зміни швидкості реакції окиснення. Якщо до основного металу додати домішку Bi-Sn-Pb-Cd це приведе до зниження концентрації іонів металу у міжвузлах і дірках, а це у свою чергу до зменшення швидкості окиснення металу.

Якщо ж утворюється плівка товщиною менше 1000 Å, то її ріст підкоряється іншим закономірностям. В цьому випадку спостерігається наступні види залежності швидкості росту товщини плівки від часу t :

$$w \approx t^{\frac{1}{3}}; \quad w \approx \ln t; \quad w = \frac{1}{A - B \ln t}. \quad (4.4)$$

При цьому шар просторового заряду в поверхневих областях плівки, яким можна знехтувати при вивченні товстих плівок, зараз займає значну долю товщини плівки. Це необхідно враховувати при розрахунку розподілу потенціалу та його вплив на дифузію дефектів через плівку. Крім того, зміна кінетичних закономірностей внаслідок зміни глибини шару просторового заряду може відбуватися при досягненні критичної товщини плівки.

Необхідно приймати до уваги можливість обмеження швидкості росту плівки процесами переносу по поверхні плівки, а не переносом через плівку. Процеси переносу по поверхні в свою чергу залежать від розподілу потенціалу в плівці поблизу поверхні.

Крім процесу окиснення в результаті фретингу значну роль відіграють процеси термічного розкладу. Термодинамічний розклад можна описати таким рівнянням:



Розклад може протікати повільно або досить швидко (в деяких випадках миттєво – вибух).

Початковий період характеризується поступовим прискоренням процесу, в ході якого відбувається утворення і ріст зародків продукту реакції. Досягнувши певного розміру, ядра починають перекриватися, що призводить до зменшення поверхні розділу між початковою речовиною та продуктом реакції. Це веде до зменшення швидкості процесу.

При розкладі деяких вибухонебезпечних речовин (азиди свинцю) індукційний період відсутній, тому процес починається з максимальної швидкості. При фретингу індукційний період суттєво зменшується, так як внаслідок даного процесу відбувається збільшення дислокацій і утворення ювенільних поверхонь, що в свою чергу призводить до полегшення утворення зародків. Утворення зародків нової фази потребує збільшення вільної енергії, яке зумовлене протіканням хімічних реакцій, утворенням нової поверхні, а також деформацією кристалічної ґратки. Флуктуації зародків вище критичного значення приводить до утворення стійких зародків, які можуть рости, так як послідуєчий їхній ріст супроводжується зменшенням вільної енергії.

Якщо активний зародок виникає в результаті розкладу однієї молекули, то швидкість утворення зародків описується рівнянням:

$$\frac{dN}{dt} = k(N_0 - N), \quad (4.6)$$

де N – число зародків, які утворилися за час t ;

N_0 – число потенційних місць.

Внаслідок фретингу протікають процеси термічного розкладу, які ініціюють процес окислення на поверхні твердого тіла. Звичайно при введенні в зону взаємодії сплаву Bi-Sn-Pb-Cd крім взаємодії між твердою і газоподібною 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. Масопереніс 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.

Термодинамічною характеристикою адгезії є зменшення вільної енергії на 1 см^2 поверхні адгезійного шва в ізотермічно зворотному процесі. Визначити адгезію у твердих тілах досить важко із-за невизначеності: істинної площі контакту між ними, неможливістю вимірювання поверхневого натягу, протіканням різного роду незворотних процесів, наявністю непружних деформацій та утворенням подвійного електричного шару.

Фотографічні дослідження зразків проводились на металографічному мікроскопі МИМ-10. З аналізу поверхні зразків встановлено, що взаємодія між легкоплавким сплавом Bi-Sn-Pb-Cd і поверхнею матриці іде по адгезійному механізму. На фотографіях видно схоплювання (адгезію) сплаву (темний фон) з поверхнею матриці (світлий фон) та утворення металевих спайок (рис. 4.14) [150].

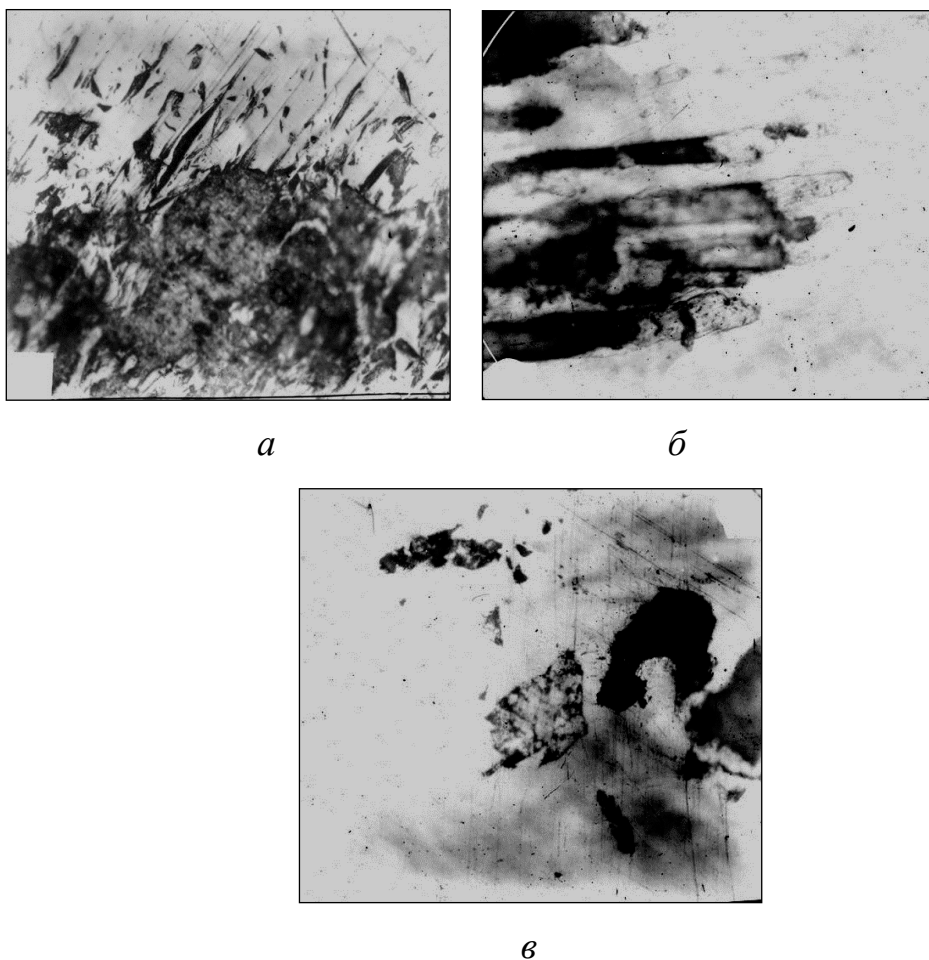


Рис. 4.14. Фотографії окремих поверхонь зразка зі сталі 45 після процесу зношування *а, б, в* з адгезією легкоплавкого композиту Bi-Sn-Pb-Cd (темний колір) із збільшенням 250:1

Трибохімічні реакції, викликані дією фретингу в малоамплітудній області відносних мікропереміщень, ініціюють викидання електронів з металу, тобто їх емісією, яку можна розділити на два класи: емісію частинок та емісію енергії. Схема трибоемісії із факторами зовнішнього впливу наведена на рис. 4.15. Ініціювання трибо-хімічних реакцій викликається тим, що в процесі тертя внаслідок пластичної деформації тонких шарів металу відбувається зростання ентропії системи, проходить значний розігрів поверхні та утворення ювенільних поверхонь разом із збільшенням каталітичної активності. Все це призводить до інтенсифікації протікання трибохімічних реакцій.

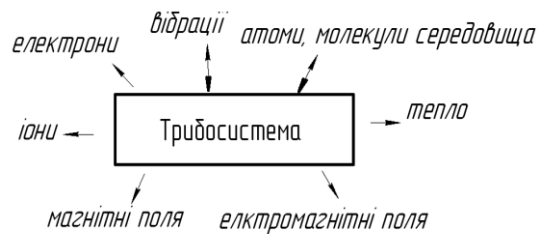


Рис. 4.15. Схема трибоемісії

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано динамічну модель вібраційного фрикційного контакту з урахуванням зовнішнього рідинного середовища [116, 121], яка представлена на рис. 4.16 та системою диференціальних рівнянь (4.7).

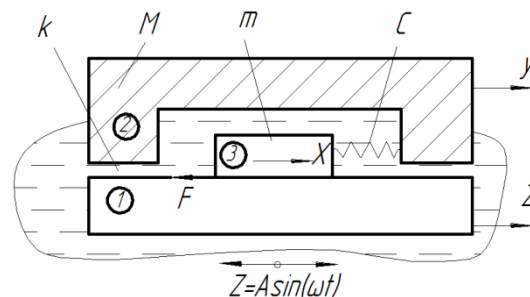


Рис. 4.16. Динамічна модель з трьох тіл занурених у рідину:

1 – робить коливальний рух по специфічному закону; 2 – контртіло; 3 – рідина з масою m , як опис тангенціальної жорсткості зовнішнього шару

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} = c(x - y) + F \\ M \cdot \ddot{y} = c(x - y) + k\dot{y}' \end{cases} \quad (4.7)$$

де m – маса еластичного елемента, як опис тангенціальної жорсткості зовнішнього шару і третього тіла ($M \geq m$) ;

c – пружність еластичного елемента;

F – сила тертя;

M – маса другого тіла;

k – коефіцієнт демпфірування рідинного середовища;

x, y – переміщення тіл;

\dot{y} – швидкість переміщення тіла;

\ddot{x}, \ddot{y} – прискорення переміщень тіл.

Розв'язання системи рівнянь (4.7) відносно сили тертя дає можливість отримати залежність її від частоти та амплітуди переміщень та визначити діючу механічну енергію за залежністю (3.33).

4.4. Висновки до розділу 4

1. Експериментально підтверджена адсорбційно-електрохімічна концепція розвитку фретинг-корозії в інкубаційний (латентний) період, коли виникають умови для формування електрохімічного середовища, яке сприяє корозійно-втомному руйнуванню спряжених поверхонь.

2. Показана можливість використання традиційних методів попередження електрохімічної корозії і підбору пари тертя для зниження інтенсивності зношування фрикційного контакту в умовах фретинга.

3. Результати вейвлет-аналізу часового перебігу фретинг-процесу показали, що об'єкт досліджень, під час експлуатації, переходить від стану

абсолютного (пружного) зчеплення до повного проковзування з амплітудами, які значно перевищують повне попереднє зміщення (повзучість).

4. У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано динамічну модель фретинг-процесу з урахуванням зовнішнього агресивного середовища.

5. Запропоновано метод підвищення фретінгостійкості номінально-нерухомих з'єднань нанесенням покриття на основі легкоплавкого сплаву Ві-Sn-Pb-Cd та встановлено, що взаємодія між легкоплавким сплавом і поверхнею матриці іде по адгезійному механізму, що забезпечує:

- створення ефекту екранування поверхні твердого тіла від дії оточуючого середовища, перш за все дифузії у контактуючі поверхні радикалів газів: кисню, водню і вуглекислого газу та водних сумішей;

- зменшення адгезії контактуючих поверхонь тіл завдяки розташуванню між ними часток легкоплавкого сплаву.

РОЗДІЛ 5

ФРЕТИНГОСТІЙКІСТЬ КОНТАКТНИХ ПАР В УМОВАХ РОЗМЕЖУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ЛЕГКОПЛАВКИМИ СПЛАВАМИ НА ОСНОВІ Bi-Sn-Pb-Cd

5.1. Умови перебігу трибохімічних реакцій

Дослідження проводились на обладнанні, описаному у розділі 2 (рис. 2.1), параметри режимів якого при фретинг-процесі можуть змінюватись в межах: амплітуда A від 10 до 100 мкм; частота коливань f від 20 до 70 Гц; максимальний тиск P до 30 МПа. Між поверхнями тертя безпосередньо вводився легкоплавкий сплав 0,2 гр. на основі Bi-Sn-Pb-Cd в порошкоподібному стані.

Взаємодія поверхні твердого тіла із зовнішнім середовищем визначається тим чи можливий перебіг реакцій між металом та середовищем та чи протікають ці процеси в значному об'ємі металу. Дія середовища на метал залежить від: хімічного складу металу, пластичної і пружної деформації, стану поверхні через яку середовище діє на метал, розвиток дефектів через які проходить дифузія окисного середовища на поверхню твердого тіла [18]. Як активність метала в реакціях, так і дифузійні процеси залежать від енергії окремих ділянок металу. Досліджувались матриці із загартованої сталі 45 при номінальному тиску 30 МПа, амплітуді вібрацій 30 мкм, контртіло – загартована сталь 45, база іспитів – 1×10^6 циклів. Перша серія досліджень проводилась у звичайних умовах – на повітрі без сплаву. Також у другій серії досліджень в зону фретинга на поверхню зразка наносився легкоплавкий сплав та вивчалась інтенсивність зношування досліджуваних матеріалів [151].

На рис. 5.1 показано фотографії пошкодження поверхні твердого тіла з сталі 45 внаслідок фретинга на повітрі після $0,7 \times 10^6$ циклів без нанесення легкоплавкого сплаву між поверхнями тертя. На поверхні зразка спостерігаються зони окиснення (жовтий колір).

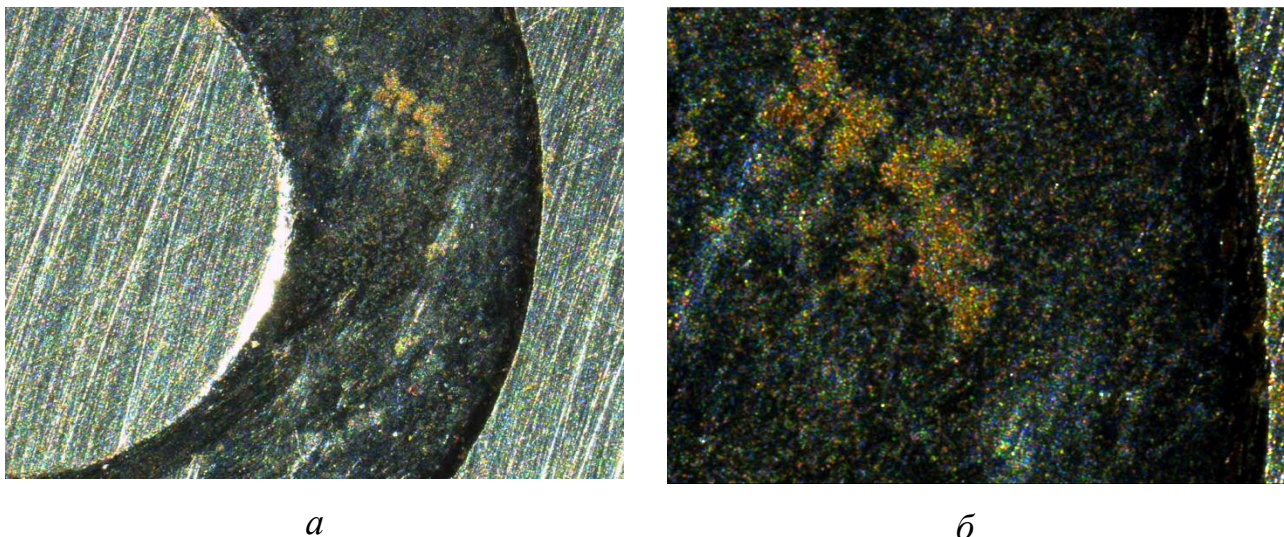


Рис. 5.1. Фотографії пошкодження поверхні твердого тіла зі сталі 45 внаслідок фретинга на повітрі після $0,7 \times 10^6$ циклів: *a* – збільшено у 20 разів; *б* – збільшено у 60 разів;

Значно впливає на електрохімічні і корозійні процеси структурний стан поверхні твердого тіла. Чим більша нестабільність фаз, з яких складається метал, тим вища його здатність до корозії [18].

Оксидна плівка на поверхні твердого тіла утворюється внаслідок дифузії активних частинок газу. При розгляді дифузії в твердих тілах було виявлено, що домішки суттєво впливають на швидкість хімічної реакції. Домішки у вигляді Bi-Sn-Pb-Cd змінюють умови дифузії і призводять до зміни швидкості реакції окислення у тому випадку, коли іони домішок входять в склад продукту взаємодії. Введення іонів домішок Bi-Sn-Pb-Cd у вакансії кристалічної решітки призводить до зниження концентрації іонів матриці в міжвузлах, а в результаті і до зменшення швидкості окиснення матриці.

Енергетичний стан системи матриця-іонні домішки Bi-Sn-Pb-Cd складається з величезної кількості елементарних частинок та характеризується певною величиною вільної енергії. Тому всі процеси, які відбуваються внаслідок фретинг-корозії супроводжуються зменшенням вільної енергії. При введенні в зону фретингу легкоплавкого сплаву створюються умови для

утворення нових фаз, які внаслідок властивостей високореакційної сполуки Ві-Sn-Pb-Cd потребують значно меншої енергії утворення [153].

В основу виразів, які дозволяють визначити концентрацію дефектів у кристалі в умовах рівноваги покладено закон діючих мас. Швидкість окиснення матриці залежить від концентрації іонів домішки і константи рівноваги по Френкелю.

При окисненні металевої поверхні відбувається реакція між іонами металу та іонами кисню, які утворюються в результаті взаємодії атомів кисню і вільних електронів в металі. Для того щоб реакція проходила, іони та електрони мають дифундувати під дією різниці потенціалів, яка існує між внутрішньою областю металу та активним середовищем.

За допомогою хімічних потенціалів легко виразити умови самовільного протікання реакції:

$$\sum v_i \mu_i > \sum v_j \mu_j, \quad (5.1)$$

де μ_i, μ_j – хімічні потенціали;

v_i, v_j – стехіометричні коефіцієнти.

Швидкість реакції у даний момент визначається зміною концентрації вихідної речовини dx за нескінченно малий проміжок часу dt :

$$\mathcal{G} = -\frac{dx}{dt}. \quad (5.2)$$

Залежність концентрації реагуючих речовин і швидкості хімічної реакції окислення визначається законом діючих мас:

$$\mathcal{G} = K[\text{Me}]^n[\text{O}]^m. \quad (5.3)$$

Тоді співвідношення швидкості окислення поверхні металу без домішок і з домішками можна виразити наступною залежністю [153]:

$$\frac{g}{g_D} = 1 - 2K_f^{1/2}[D], \quad (5.4)$$

де $[D]$ – концентрація домішок (в нашому випадку Bi-Sn-Pb-Cd);

K_f – константа рівноваги для дефектів по Френкелю.

З аналізу залежності (5.4) видно, що градієнт швидкості окислення поверхні металу з домішками залежить від концентрація домішок легкоплавкого сплаву.

Внаслідок фретинга прискорюються процеси окиснення металевої поверхні, але введення домішок у вигляді легкоплавкого сплаву уповільнюють даний процес екрануючи матрицю від окислення.

На рис. 5.2 видно частинки легкоплавкого композиту, які провзаємодіяли з поверхнею твердого тіла [150].

Завдяки адгезійної здатності легкоплавких сплавів на поверхні зразків спостерігаються зони взаємодії з поверхнею твердого тіла після $0,3 \times 10^6$ циклів, що уповільнює даний процес фретинг-корозії.

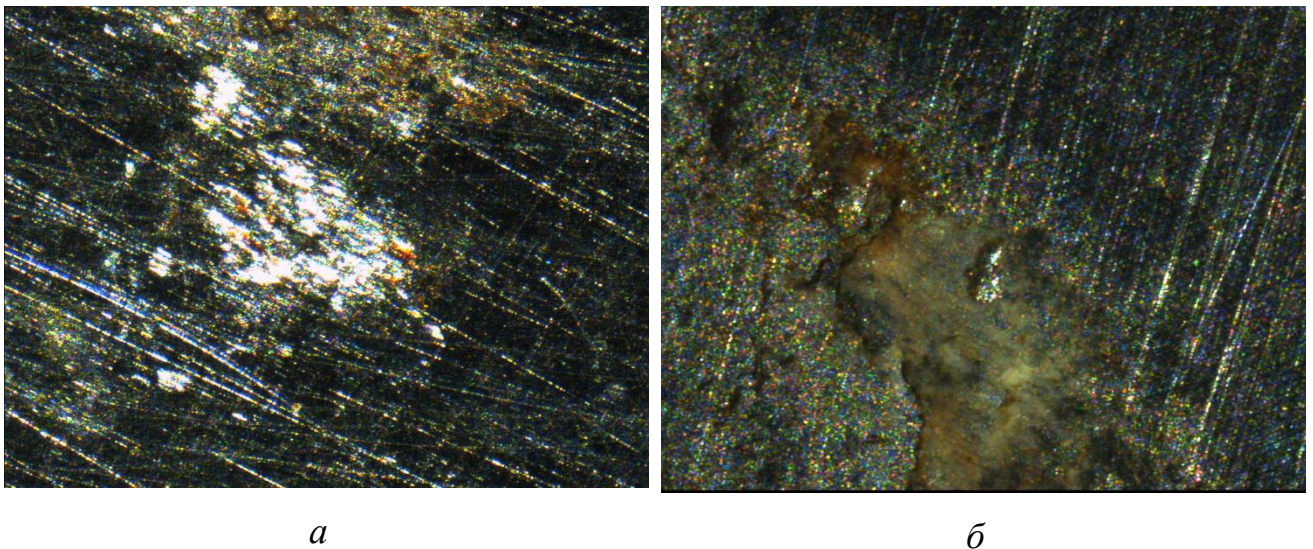


Рис. 5.2. Фотографії частинок легкоплавкого сплаву, які провзаємодіяли з поверхнею сталі 45 на повітрі після $0,3 \times 10^6$ циклів, збільшення у 60 разів:

а, б – окремі елементи поверхні

Атоми в кристалічній ґратці коливаються з високою частотою (порядку 10^{13} коливань в секунду). Крім цього в кристалі існує ще один вид теплового руху пов'язаний з міграцією атомів, тобто зміна місця в кристалічній ґратці. Атом може перебувати певний час в одному вузлі, але внаслідок отримання певної енергії попадає в інший вузол чи міжвузел. Для того щоб атом зміг перейти з одного вузла кристалічної ґратки в інший йому необхідно подолати певний енергетичний бар'єр, який залежить від енергії зв'язку у кристалі. Внаслідок фретингу змінюється енергетичний розподіл в кристалічній ґратці. На деяких ділянках кристала є не окремі дислоковані атоми і вакантні вузли, а їх накопичення. Це веде до розрихлення кристалічної ґратки та подальшого руйнування поверхні твердого тіла [35, 154].

Внаслідок взаємодії одноптипних металів при фретингу адгезія переходить в когезію, що і призводить до руйнування матеріалу. В такому випадку розрив відбувається не по адгезійному шву, а когезійно – всередині матеріалу з утворенням зародків тріщин. Висока адгезійна здатність легкоплавких сплавів уповільнює даний процес.

5.2. Дослідження трибологічних параметрів при фретинг-зношуванні поверхонь зразків розділених сплавами на основі Bi-Sn-Pb-Cd

Трибо-хімічні реакції відносяться до гетерогенних, тобто до таких, що протікають на границі розділу фаз, у даному випадку на поверхні тертя.

Тому стан матеріалу поверхні його реакційна здатність буде визначати для певного середовища не тільки інтенсивність, а і саму можливість протікання трибо-хімічної взаємодії. Для проходження реакції необхідно спочатку розірвати чи послабити міжатомні зв'язки вихідних сполук. Таким чином для ініціації хімічної взаємодії реагентом необхідне накопичення надлишкової енергії. Накопичувачем надлишкової енергії для трибохімічних реакцій є поверхня тертя, а джерелом механічна енергія, що підводиться. Для

термохімічної реакції окислення заліза енергія активації складає 51...63 кДж/моль, а трибохімічної – 0,7 кДж/моль.

При терті нерівностей які виступають з'являються дільниці хімічно чистого та хімічно активного металу на які може адсорбуватися кисень. Адсорбція кисню є спонтанним процесом, має незначний потенційний енергетичний бар'єр та регулюється швидкістю підводу газу до поверхні. При подальшому терті до нерівностей буде підводитися енергія достатня для перетворення кисню у дисоційовані атоми які будуть хімічно зв'язані з металом. Адгезія залежить від розмірів зони контакту та є функцією властивостей матеріалу, таких як межа текучості, швидкості наклепу, шорсткості поверхні і мікроструктури, а також параметрів фретінг-навантаження і амплітуди. Значний коефіцієнт тертя (крива 1, рис. 5.3) вказує на значну степінь адгезії, а деяка його стабілізація на певному рівні говорить, що при адгезійному зношуванні утворюється третє тіло [148].

Наявність легкоплавкого сплаву значно зменшує механічну дію при фретинг-зношуванні, про що засвідчує крива 2 (рис. 5.3). Це забезпечує невелику але постійну величину коефіцієнта тертя f , який встановлюється після припрацювання (рис. 5.3).

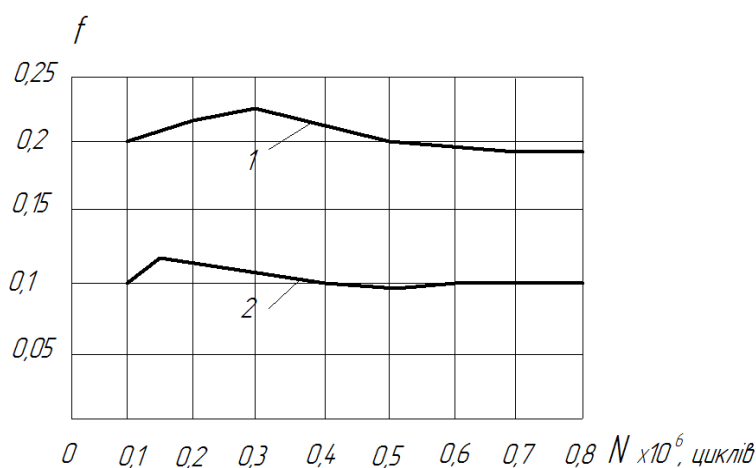


Рис. 5.3. Зміна коефіцієнту тертя при фретингу для сталі 45 на повітрі при $P = 30$ МПа, $A = 30$ мкм, $f = 30$ Гц: 1 – без легкоплавкого сплаву; 2 – з легкоплавким сплавом

На рис. 5.4. показана порівняльна характеристика інтенсивності зношування сталі 45 при різних умовах [150].

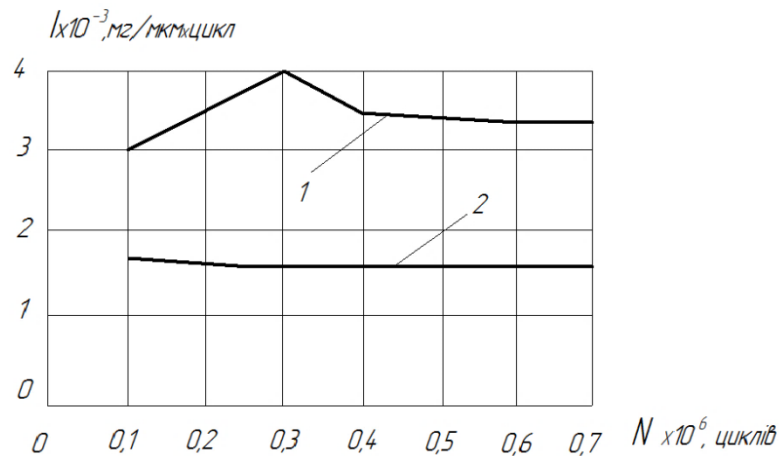


Рис. 5.4. Інтенсивність зношування сталі 45 на повітрі при $P = 30$ МПа, $A = 30$ мкм, $f = 30$ Гц: 1 – без легкоплавкого сплаву; 2 – з легкоплавким сплавом

При введенні легкоплавкого сплаву в зону фретингу можна досягнути значного зменшення дифундації кисню та його радикалів в поверхню твердого тіла. Окислюється і поверхня металу і сам легкоплавкий сплав. Тоді співвідношення розподілу кисню між металом і легкоплавким сплавом можна записати наступним чином:

$$K_o = \frac{a_{(BiSnPbCdO)}}{a_{[MeO]}}, \quad (5.5)$$

де K_o – коефіцієнт розподілу кисню між легкоплавким сплавом і металом;

$a_{(BiSnPbCdO)}$ – активність і концентрація кисню в легкоплавкому сплаві;

$a_{[MeO]}$ – активність і концентрація кисню в металі.

Компоненти легкоплавкого сплаву більш активно взаємодіють з киснем. Внаслідок цього кисень не так активно взаємодіє з поверхнею металу, що у свою чергу запобігає фретинг-корозії.

Таким чином при введенні легкоплавкого сплаву в зону фретингу спостерігається значний опір адгезійному і окислювальному зношуванню.

Проведені дослідження зміни коефіцієнта тертя поверхневих шарів на повітрі та при введенні легкоплавкого сплаву в зону фретинга, показали, що відбувається його зменшення у 2 - 2,5 рази при введенні легкоплавкого сплаву в зону фретинга [123]. Це в свою чергу значно збільшує фретингостійкість конструкційних матеріалів. Встановлено, що при невеликих амплітудах та незначному тиску утворюється захисний шар на основі легкоплавкого сплаву, який пригнічує фретинг-корозію.

Швидкість формування окислів на поверхнях твердих тіл є функцією властивостей даних матеріалів. Різниця в процесі тертя частково зумовлена тим, що в залежності від властивостей метали утворюють різні оксиди, які по різному себе ведуть в процесі фретинг-окислення.

5.3. Зміни відносного елементного складу поверхонь твердих тіл покритих Bi-Pb-Sn-Cd та відносного складу продуктів зношування на різних стадіях фретинга

Проведено дослідження [151] з визначення зміни відносного елементного складу поверхні досліджуваного зразка до фретинга та після фретинга, а також відносного складу продуктів зношування, які утворюються внаслідок руйнування поверхні твердого тіла при фретингу. Для цього був використаний метод рентгенівського флуоресцентного аналізу (РФА). Спектри знімалися на спектрометрі "ElvaX". За допомогою методу РФА досліджувалися залежності зміни мікрокомпонентного складу твердих тіл на різних стадіях фретингу. На рис. 5.5 показано світлини поверхні твердого тіла із сталі 45 внаслідок фретинга на повітрі з легкоплавким сплавом після $0,7 \times 10^6$ циклів.

Встановлено (рис. 5.6, рис. 5.9, рис. 5.12), що на початковій стадії фретинга від $0,1 \times 10^6$ *N* до $0,3 \times 10^6$ *N* циклів відбувається насичення контактуючих поверхонь конструкційних матеріалів (сталь 45, сплав АЛ 4,

сплав Л 63) компонентами легкоплавкого композиту яке іде по адгезійному механізму.

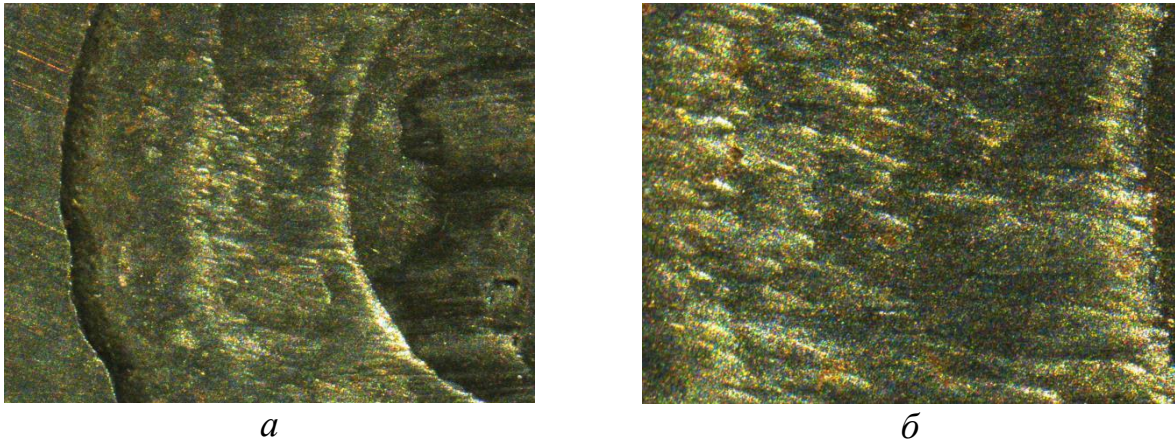


Рис. 5.5. Фотографії поверхні зразка з сталі 45 при фретингу на повітрі з легкоплавким сплавом після $0,7 \times 10^6$ циклів: *a* – збільшено у 20 разів; *б* – збільшено у 60 разів

Елементний склад сталі 45 до фретинга: Fe – 98,23 %; C – 0,45%; Mn – 1,39 %; Si – 0,29 %; Cr – 0,09 %.

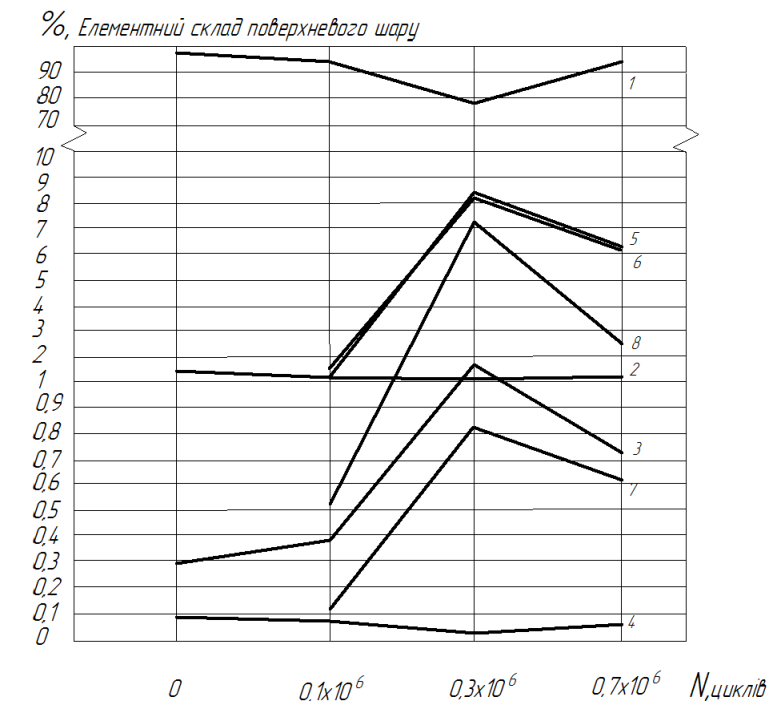


Рис. 5.6. Графік відносної зміни елементного складу поверхневого шару сталі 45 при фретингу на повітрі з покриттям із легкоплавкого сплаву при $P = 30$ МПа, $A = 30$ мкм, $f = 30$ Гц: 1 – Fe; 2 – Mn; 3 – Si; 4 – Cr; 5 – Bi; 6 – Pb; 7 – Sn; 8 – Cd

Елементний склад продукту фретингу: Fe – 1.38 %; Mn – 0.09 %; Si – 0.11 %;
Cr – 0%; Bi – 33.51 %; Pb – 33.19%; Sn – 10.55%; Cd – 21.17%

Відносне збільшення компонентів Bi-Pb-Sn-Cd на поверхні зразка проходить до моменту глобального розвитку фретинга (після $0,3 \times 10^6 N$ циклів), (рис. 5.7, рис. 5.9, рис. 5.12), внаслідок суттєвих змін в тонкій кристалічній структурі.

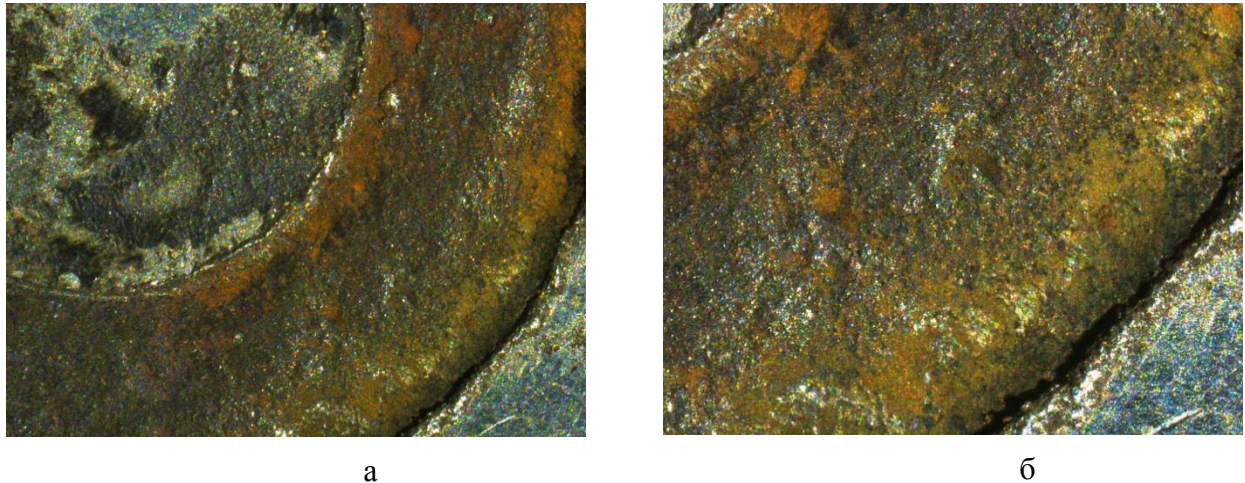


Рис. 5.7. Фотографія пошкоджень поверхні твердого тіла з сплаву АЛ 4 внаслідок фретинга на повітрі після $0,7 \times 10^6$ циклів: *a* – збільшено у 20 разів;
б – збільшено у 40 разів

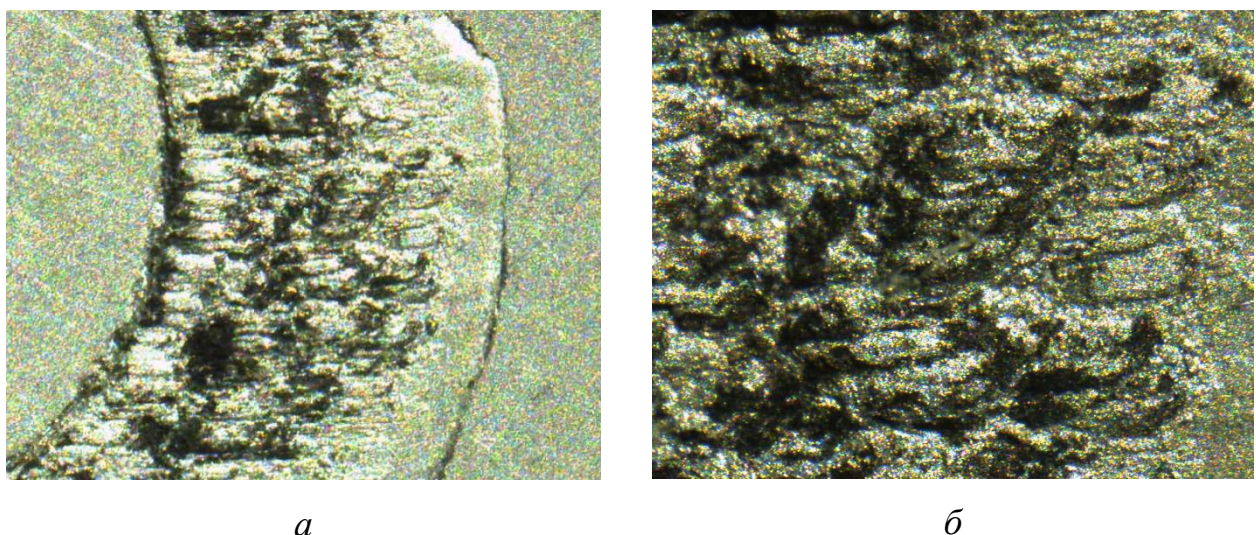


Рис. 5.8. Фотографія поверхні зразка з сплаву АЛ4 при фретингу на повітрі з легкоплавким сплавом після $0,7 \times 10^6$ циклів: *a* – збільшено у 20 разів; *б* – збільшено у 60 разів

При проведенні дослідження відносної зміни елементного складу поверхневого шару та продуктів зношування сплавів на основі алюмінію та латуні були отримані наступні результати [151].

Елементний склад сплаву АЛ4 на основі алюмінію до фретинга: Al – 94,43%; Cu – 4,77%; Fe – 0,28%; Mn – 0,33%; Zn – 0,19%.

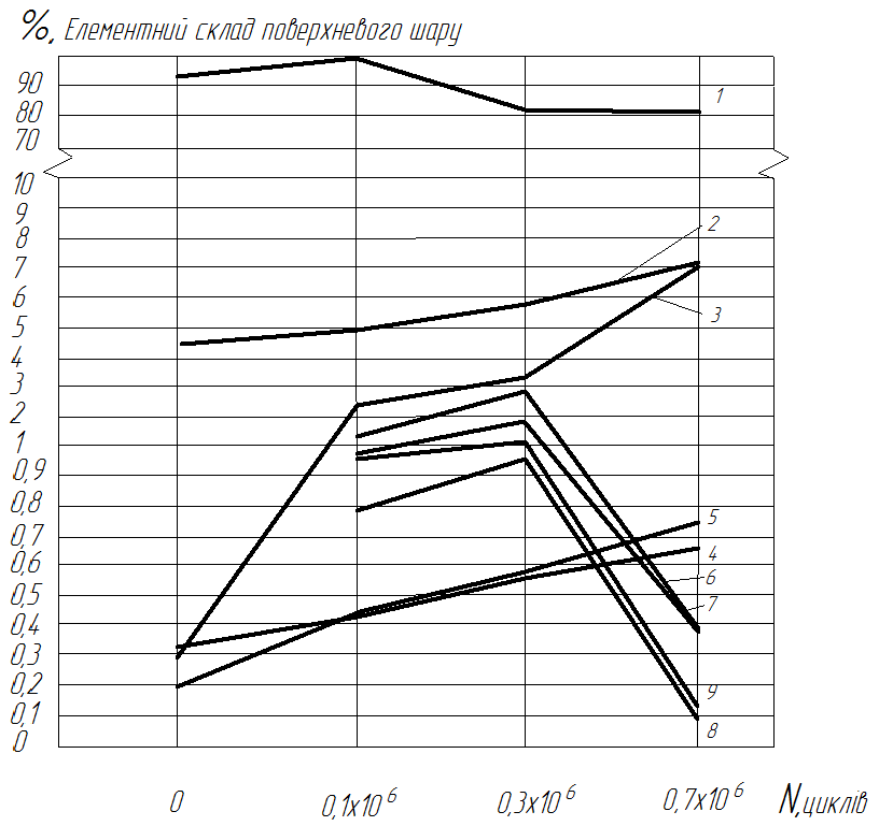


Рис. 5.9. Графік відносної зміни елементного складу поверхневого шару сплаву АЛ4 при фретингу на повітрі з покриттям із легкоплавкого сплаву при $P = 30$ МПа, $A = 30$ мкм, $f = 30$ Гц: 1 – Al; 2 – Cu; 3 – Fe; 4 – Mn; 5 – Zn; 6 – Bi; 7 – Pb; 8 – Sn; 9 – Cd

Елементний склад продукту фретинга: Al – 2,27 %; Cu – 0,43 %;
Fe – 16,85 %; Cr – 0,09%; Zn – 0,03%; Bi – 29,33 %; Pb – 28,67%;
Sn – 7,34%; Cd – 15,1% .

Фретинг призводить до утворення великої кількості дефектів в кристалічній ґратці та розвитку процесів розупорядкування та розукріплення приповерхнеших шарів твердого тіла. Це зумовлює виникнення великої кількості дислокацій поверхні елементів контактних пар з неупорядкованою

мікродисперсною структурою. При цьому збільшується ізобарно-ізотермічний потенціал та формується дислокаційна структура приповерхневого шару, а в подальшому проходить поступове відшарування сильно збуджених поверхневих шарів. Видалення металевих частинок з поверхні твердого тіла в тонкоподрібненій формі поступово наростає та призводить до утворення абразивного матеріалу та переходу фретинга в наступну стадію (після $0,3 \times 10^6 N$ циклів), (рис. 5.6, рис. 5.9, рис. 5.12).

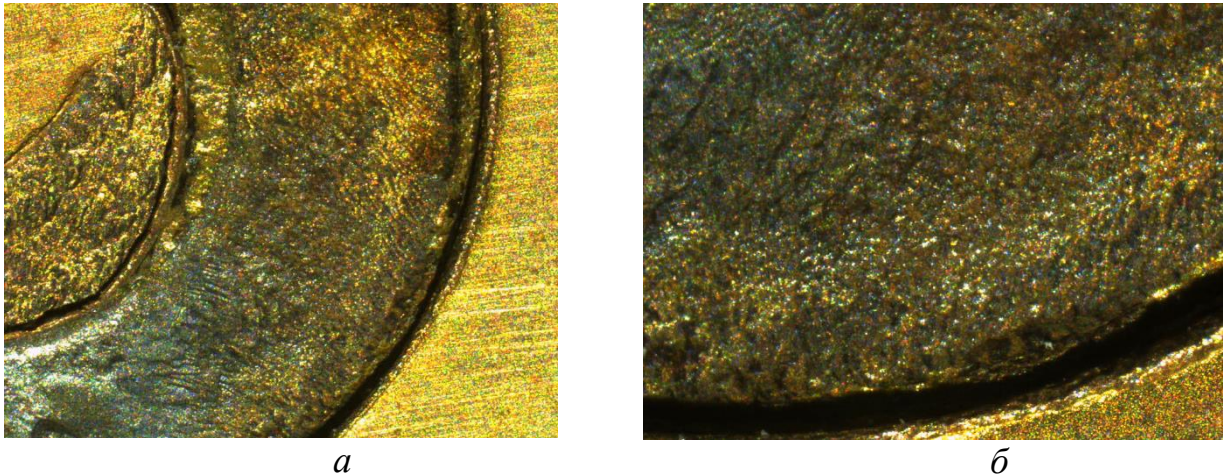


Рис. 5.10. Фотографія пошкоджень поверхні твердого тіла з сплаву Л 63 внаслідок фретинга на повітрі після $0,7 \times 10^6$ циклів: *a* – збільшено у 20 разів;
б – збільшено у 40 разів

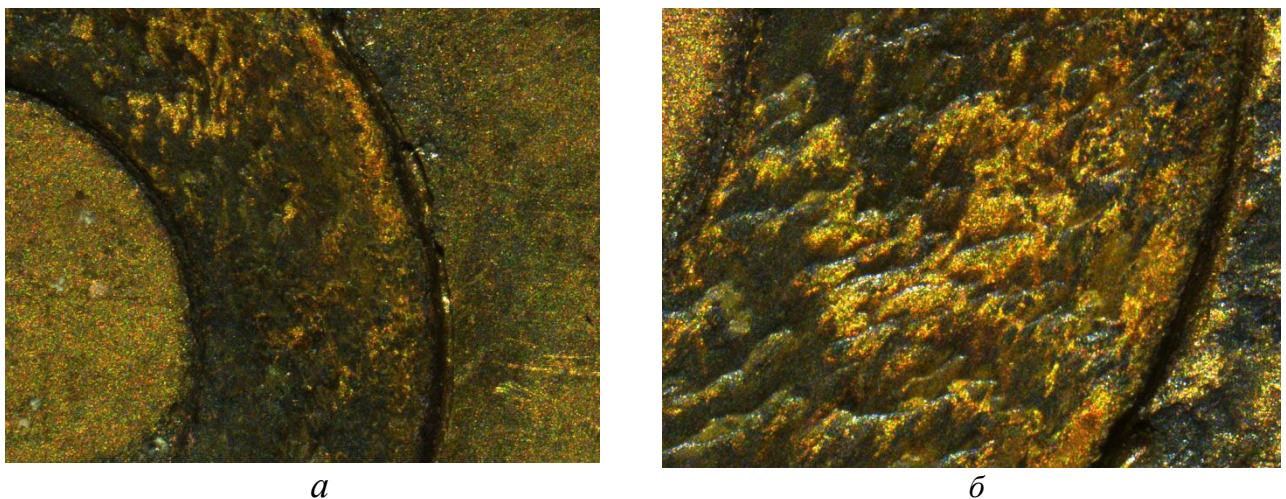


Рис. 5.11. Фотографія поверхні зразка з сплаву Л 63 при фретингу на повітрі з легкоплавким сплавом після $0,7 \times 10^6$ циклів: *a* – збільшено у 20 разів;
б – збільшено у 40 разів

Елементний склад сплаву латуні Л63 до фретинга: Cu – 60,07%;
Zn – 36,45%; Si – 0,22%; Fe – 0,12%; Co – 0,09%; Ni – 0,05%.

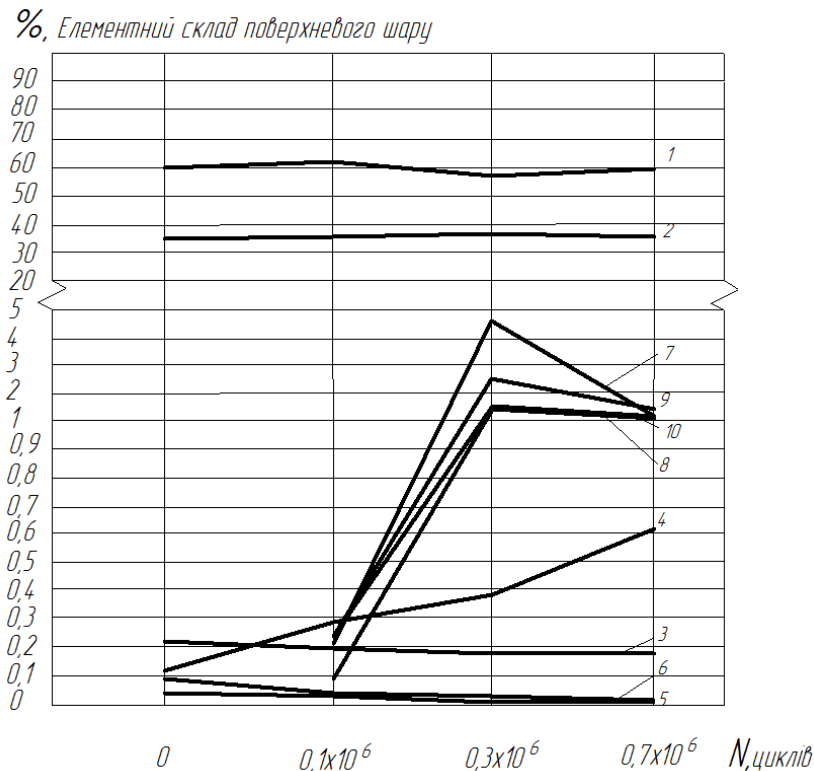


Рис. 5.12. Графік відносної зміни елементного складу поверхневого шару сплаву Л 63 при фретингу на повітрі з покриттям із легкоплавкого сплаву при $P = 30$ МПа, $A = 30$ мкм, $f = 30$ Гц: 1 – Cu; 2 – Zn; 3 – Si; 4 – Fe; 5 – Co; 6 – Ni; 7 – Bi; 8 – Pb; 9 – Sn; 10 – Cd

Елементний склад продукту фретинга: Cu – 47,84 %; Zn – 24,55 %;
Si – 0,36 %; Fe – 7,06% ; Co – 0%; Ni – 0% ; Bi – 8,5 %; Pb – 2,11%;
Sn – 8,22%; Cd – 1,35% .

Виходячи з досліджень методом РФА виявлено, що до складу продуктів фретинга входять хімічні елементи самого матеріалу (Fe, Al, Cu), а також вісмут, свинець, олово, кадмій. При розмежуванні пар тертя легкоплавким сплавом до складу продуктів фретингу на початковій стадії до $0,3 \times 10^6 N$ циклів атоми кисню в основному не взаємодіють з поверхнею зразка, а окислюють елементи легкоплавкого сплаву. Це підтверджує, висунуті нами в попередніх дослідженнях припущення, про пригнічення окисної стадії фретингу при застосуванні легкоплавкого сплаву. Легкоплавкі сплави екранують окисний

механізм руйнування при фретингу на початкових стадіях взаємодії елементів контактних пар.

Подальше утворення продуктів руйнування поверхневих шарів (після $0,3 \times 10^6 N$ циклів) викликає збільшення в продуктах фретинга відносного процентного вмісту елементів пар тертя і зниження відносного елементного складу легкоплавкого сплаву (Bi-Pb-Sn-Cd) (рис. 5.7, рис. 5.10, рис. 5.13). Збільшення кількості абразивного матеріалу в зоні контакту поглиблює процеси фретингу.

Абразивна дія продуктів фретингу руйнує приповерхневі шари внаслідок механічного шліфування та утворення точок зварювання в місцях контакту, що в свою чергу поглиблює процеси руйнування кристалічної ґратки (рис. 5.6, рис. 5.9, рис. 5.12).

Таким чином, застосування методу РФА дозволило встановити, що внаслідок фретинга змінюється відносний елементний склад взаємодіючих поверхонь. На початковій фазі (до $0,3 \times 10^6 N$) проходить адгезійний процес, внаслідок якого поверхня твердого тіла покривається елементами Bi-Pb-Sn-Cd. Внаслідок адгезійної взаємодії відносний процентний вміст елементів Bi-Pb-Sn-Cd на поверхні твердого тіла збільшується (рис. 5.6, рис. 5.9, рис. 5.12), екранується процес окиснення поверхні зразка, але проходить процес окиснення елементів легкоплавкого сплаву.

Друга фаза (при $0,3 \times 10^6 N$) – це утворення абразивного порошку внаслідок фретинга. Як видно із даних методу (РФА) порошок, який утворився внаслідок фретинга містить елементи легкоплавкого сплаву і його окисли. Дія абразивного матеріалу призводить до деформаційного розпрорядкування, векторного перерозподілу міжатомних сил в кристалічному тілі. Подальша взаємодія контактуючих поверхонь (після $0,3 \times 10^6 N$) збільшує ізобарно-ізотермічний потенціал системи, ініціює утворення ювенільних поверхонь та дефектів кристалічної решітки, збільшення хімічного потенціалу, утворення нестійких електронних станів з високою енергією взаємодії, а отже і до зменшення відносного вмісту Bi-Pb-Sn-Cd в поверхневому шарі зразка, який

перебуває у стані адгезії у певному співвідношенні, виникнення деформаційних поверхонь та руйнування поверхні твердого тіла.

Комплексний аналіз кінетики структурного пошкодження при фретинг-корозії, а також дослідження продуктів руйнування в зоні контакту дозволили встановити механізм пригнічення руйнування металічних поверхонь на трьох основних періодах розвитку цього процесу [151].

На першій стадії фретинга (від $0,1 \times 10^6 N$ до $0,3 \times 10^6 N$) внаслідок присутності високореакційної сполуки Bi-Sn-Pb-Cd утворюється відносно міцний адгезійний шар, який запобігає контакту взаємодіючих поверхонь. Шари металу, які мають контактувати, захищаються плівкою з легкоплавкого сплаву. Досить м'який адгезійний шар з Bi-Sn-Pb-Cd менше руйнується при фретингу завдяки специфіці своєї будови: слабкими зв'язками всередині кристалічної ґратки та низькою температурою плавлення. М'яке покриття з слабкими зв'язками поглинає частину вібрації, а також в такому покритті легше проходить зсув поверхневих шарів ніж викидання частинок металу внаслідок схвачування.

Отже перша стадія фретинга рис. 5.6, рис. 5.9. рис. 5.12 ($0,3 \times 10^6$ циклів) при наявності легкоплавкого сплаву між зразком і матрицею характеризується тим, що проходить формування захисного шару на його основі.

Покриття з легкоплавкого сплаву запобігає процесу окислення металевої матриці, що в свою чергу зменшує фретинг-корозію. Але через певний час рис. 5.6, рис. 5.9. рис. 5.12 ($0,4 \times 10^6$ циклів) з'являються первинні продукти руйнування, які складаються з окислів легкоплавкого сплаву та металічних частинок самого сплаву. Далі формується корозійно-активне середовище внаслідок адсорбції на поверхні кисню і вологи. Зношування на цій стадії рис. 5.2 ($0,5 \times 10^6$ - $0,7 \times 10^6$ циклів) практично не відбувається в результаті утворення структури легкоплавкого сплаву, яка відіграє захисну роль. Продукти фретинг-корозії, які виділяються з зони тертя мають досить складний хімічний склад, так як в зоні контакту знаходиться значна кількість металів. При контакті сталічних поверхонь утворюються окисли $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3(\text{Fe}_3\text{O}_4)$, корозійні

продукти $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, частинки сталі і легкоплавкого сплаву, а також окисли Bi_2O_5 , SnO_2 , PbO_2 , CdO .

Об'єм продуктів зношування досить значний, що створює великий локальний тиск і веде до руйнування поверхні. Подальша дія фретингу призводить до того, що поверхневі шари металу, які протягом значного проміжку часу піддавалися циклічній деформації повністю розупорядковуються, утворюється велика кількість дефектів та починається прогресуюче відділення частинок поверхні металу. Лише повне руйнування захисного шару на основі легкоплавкого композиту призводить до початку руйнування основної поверхні твердого тіла.

Створюються структурні передумови для прогресуючого розвитку процесу руйнування поверхні. Процес руйнування може модифікуватися можливістю розхитування міжкристалічних зв'язків та кристалічної ґратки зворотно-поступальним рухом та дією частинок абразиву, що супроводжується інтенсивним утворенням вакансій, коалесценція яких призводить до утворення пор.

Внаслідок дії циклічних контактних напружень елементи кристалічної ґратки в поверхневому шарі накопичують значну енергію, що змінює перерозподіл енергії на енергетичних рівнях і викликає утворення великої кількості активних центрів з високою хімічною активністю. Все це сприяє утворенню приповерхневого шару з високою активністю, в якому протікають трібохімічні реакції, які неможливі в звичайних умовах (окиснення благородних металів і т.п.). Крім того утворення великої кількості дефектів кристалічної ґратки створює умови для неперервної дифузії кисню в зону розупорядження поверхні та покриття. Неперервний перенос молекул кисню всередину кристалу сприяє фретинг-корозії. Атоми кисню створюють напруження стиску, внаслідок чого вони намагаються розміститися на тій стороні дислокації, де діють розтягуючі напруження, що викликає перехід атомів кисню з однієї сторони сковзання на іншу. При цьому атоми кисню

можуть дифундувати на значну глибину всередину кристалу. Все це створює умови для виникнення мікротріщин та руйнує поверхневі шари металу [107].

В результаті проведених досліджень встановлено, що загалом формується активне корозійне середовище внаслідок адсорбції на окислах кисню та вологи при цьому утворюється змішана структура з металу та окислів. Швидкість зношування незначна та пов'язана із руйнуванням на поверхні тертя оксидних плівок, притому кількість продуктів зносу в зоні тертя досягає рівноважного значення.

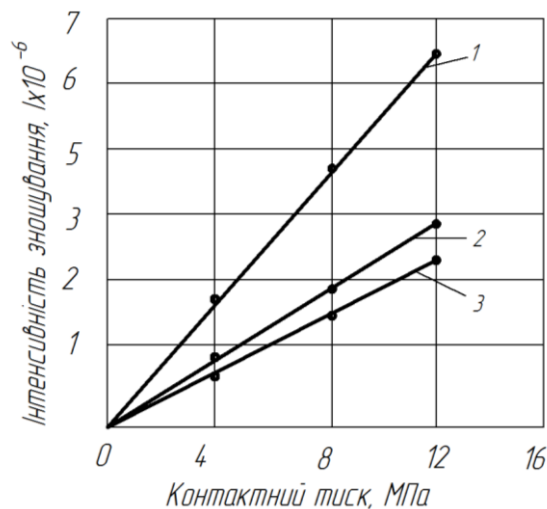


Рис. 5.13. Залежність інтенсивності зношування зразка із сталі 45 від контактної тиску при $N = 0,7 \times 10^6$: 1 – фретинг у середовищі повітря без покриття; 2 – фретинг з покриттям у водному середовищі водної суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів; 3 – фретинг у середовищі повітря з покриттям

Перехід поверхні металу внаслідок фретинга в проміжний нестійкий стан прискорює перебіг хімічних реакцій. В металі відбувається перерозподіл енергії на атомно-молекулярних рівнях внаслідок чого утворюється велика кількість частинок з вільними валентностями. Збільшення вільної поверхневої енергії разом із деформацією кристалічної ґратки та виникненням значної кількості дефектів стимулюють перебіг фретинг процесів на поверхні твердих тіл. Введення легкоплавких сплавів на основі Bi-Sn-Pb-Cd запобігає руйнуванню поверхні металів внаслідок екранування корозійної активності

поверхні твердого тіла і зменшення активуючого фактора агресивного оточуючого середовища у 2 - 3 рази (див. рис. 5.13). Зменшення швидкості трибохімічних реакцій полягає у зменшенні ізобарно-ізотермічного потенціалу системи внаслідок введення легкоплавкого композиту, що призводить до зменшення хімічної активності матриці.

Домішки у вигляді Bi-Sn-Pb-Cd змінюють умови дифузії активних газів та радикалів і веде до зміни швидкості реакції окиснення у тому випадку, коли іони домішок входять в склад продукту взаємодії. Введення іонів домішок інертних елементів у вакансії кристалічної ґратки призводить до зниження концентрації іонів матриці в міжвузлах, а в результаті і до зменшення швидкості окиснення матриці.

5.4. Вплив на фретинг-процес середовища водяної суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів

Зовнішнє тертя ініціює у різних рідких середовищах: водних розчинах електролітів, вуглеводневих рідинах однотипні хімічні взаємодії матеріалу сполучених пар з активними компонентами, серед яких найпоширенішими є кисень і вода в різних станах, які приводять до їхнього витрачання й виділення водню, метану, оксиду і діоксиду вуглецю [5].

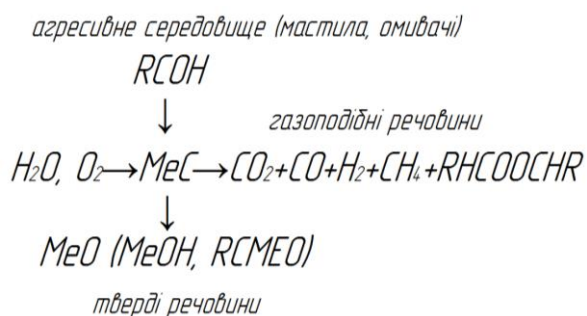


Рис. 5.14. Схема механовзаємодії зовнішнього агресивного середовища в умовах експлуатації транспортних засобів

Аналогічні процеси спостерігаються також і при циклічному вигині зразків, тобто є характерними для механічного впливу на метал. Енергетичні витрати на реалізацію механохімічних процесів сприяють дисипації підведеної при терті енергії. Схематично хімізм механовзаємодії зовнішнього агресивного середовища в умовах експлуатації транспортних засобів можна представити згідно [5], як показано на рис. 5.14.

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 зневуглецюванням контактуючих поверхонь. Продуктами трибо-хімічних реакцій є газоподібні речовини, а також тверді плівки оксидів (гідроксидів) металів, інтенсивність утворення яких у ході фретинга впливає на зношування взаємодіючих поверхонь. У свою чергу далі проходить процес зношування плівок оксидів.

При дослідженні процесу фретинг-корозії конструкційних матеріалів транспортних засобів було застосовано водну суміш алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів, як модельний розчин, що може бути присутній у вузлах транспортних засобів при експлуатації.

Проведені дослідження впливу агресивного середовища на фретинг-корозію зразків з сталі 45 [154-156]. Оцінка мікрокомпонентного складу у водяної суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів проводилася методом газової хроматографії, на хроматографі «Кристал-2000М» (розділ 2), колонка «HPFFAP 50m*0,32mm*0,52µm», режим: детектор – ПІД (полуменево-іонізуючий), час аналізу – 18 хв., температура детектора – $200^{\circ}C$, температура випаровувача –

180°C, температура колонки – 50°C (нагрів 10 хв), яка з часом підвищувалась до 130°C зі швидкістю 15°C/хв, газ-носій – нітроген. Відбирався 1 мкл рідини та вводився в колонку для дослідження. Калібрування проводилось за допомогою градуювальних водно-етанольних розчинів.

Удосконалення установки (рис. 2.1) для дослідження фретинг-процесів додатковою ємкістю 16 дало змогу проводити фретинг у водяній суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів. Якщо порівняти (рис. 5.15) ураження поверхні зразків із сталі 45 внаслідок фретинга в присутності водяної суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів та в середовищі повітря то виявлено, що оксидний шар найменший в середовищі повітря (рис. 5.15, *а*), а найбільший у водяній суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів (див. рис. 5.15,*б*).

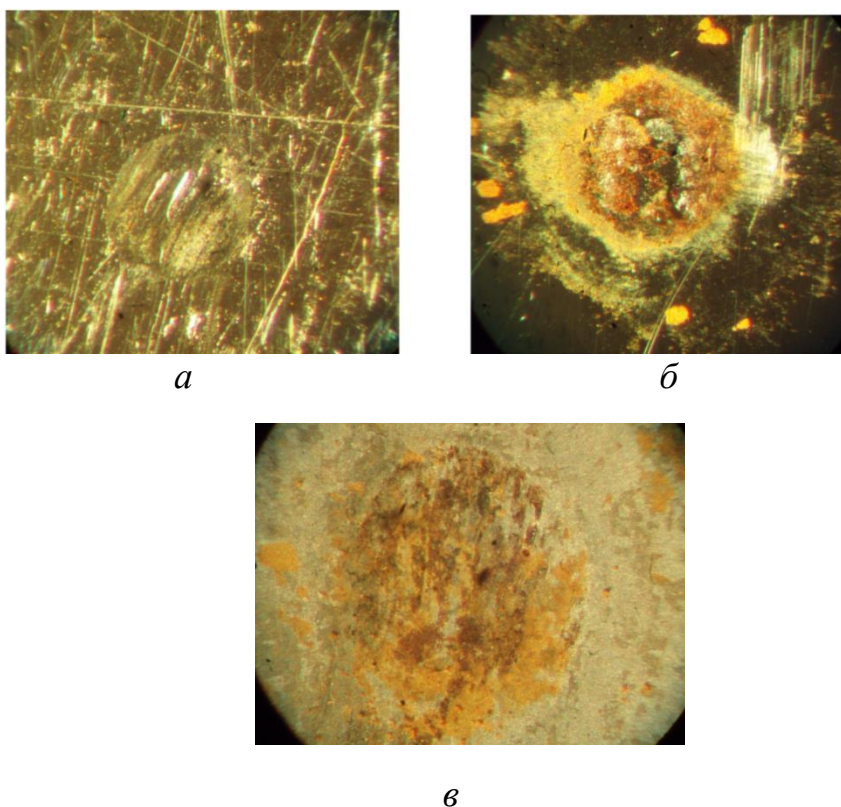


Рис. 5.15. Фотографії поверхонь зразків: *а* – фретинг у середовищі повітря; *б* – фретинг у водяній суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів; *в* – фретинг у суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів

Це пояснюється присутністю у воді радикальних частинок H^+ , OH^- , які мають підвищену окиснювальну здатність, що прискорюють фретинг-процеси та сприяють руйнуванню поверхні металу.

Використання газової хроматографії дало змогу встановити зміни в якісному та кількісному складі мікрокомпонентів у водяній суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів та одноатомних та багатоатомних спиртів внаслідок фретинг-процесів. Якщо проаналізувати хроматографу зразка суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів до та після перебігу фретингу, то можна зауважити наступні відмінності: проходить утворення естерів внаслідок взаємодії спиртів та ацетальдегіду, а також інші кількісні зміни. Для прикладу на рис. 5.16 показано хроматограму де виявлено збільшення кількості естеру-ізоамілацетату.

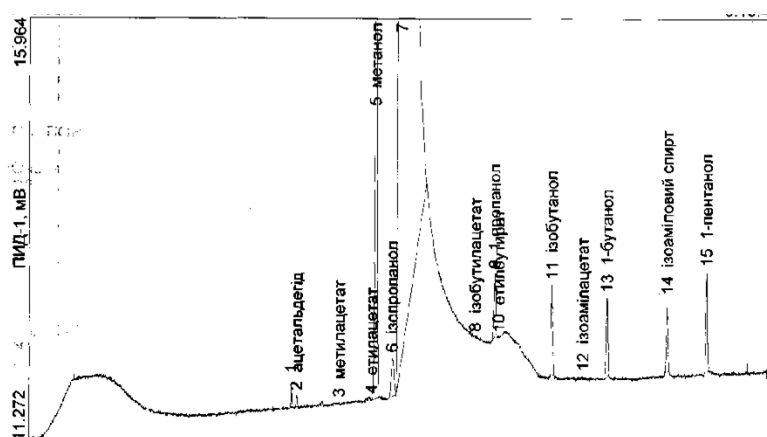


Рис. 5.16. Хроматографічний пік ізоамілацетату

Малоамплітудні циклічні коливання ініціюють перебіг складних трибохімічних реакцій в результаті яких з більш простих за своєю будовою сполук (ацетальдегід, спирти) утворюються більш складні (естери). Перебіг трибо-хімічних перетворень проходить за наступною схемою:



Трибохімічні реакції, викликані дією фретингу в малоамплітудній області відносних мікропереміщень, ініціюють викидання електронів з металу, тобто їх емісією, яку можна розділити на два класи: емісію частинок та емісію енергії. В умовах мікроамплітудного навантаження швидкість мікропроковзування є дуже малою, але поряд з малими мікропереміщеннями є принципові особливості, які впливають на загальну картину фретінг-процесів у номінально-нерухомому контакті.

Розглядаючи фретинг-процеси як еволюційні [141-143], важливо чітко визначити, параметри зміни критеріїв упорядкованості структури твердого тіла та його трибологічних чинників. Встановлено [105, 141], що умови фретинг-процесу, його ініціювання та подальша еволюція контакту тісно пов'язано зі змінами в розподілі вільних електронів по енергіях, а природа фретинга пов'язана з врахування наступних ключових моментів:

- залежності тертя від структури твердого тіла;
- ефекту трибоемісії електронів;
- розрив металічних зв'язків та утворення сильнозбуджених частинок-радикалів у поверхневому шарі;
- механічній деструкції з розхитуванням кристалічних комірок та утворенням дефектів структури;
- поступовому руйнуванні поверхні твердого тіла.

Час руйнування твердого тіла можна розрахувати за допомогою рівняння [157] Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma) / RT], \quad (5.7)$$

де τ – час до руйнування;

U_0 – енергія розриву хімічного зв'язку;

γ – активаційний об'єм;

τ_0 – частота теплових коливань атомів;

σ – діючі постійні напруження;

R – універсальна газова константа;

T – абсолютна температура.

Водяні суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів досліджувались на вміст заліза при $0,1 \times 10^6$, $0,3 \times 10^6$ та $0,7 \times 10^6$ циклах фретинга. Вимірювання оптичної густини проводилось полум'янево-іонізаційним методом (використано полум'я ацетилен-повітря, довжина хвилі поглинання 248,3 нм). Виміряна оптична густина випробувального розчину складала від $A_{випр} = 0,005$; $0,007$; $0,012$. Концентрація заліза C у розчині за калібрувальним графіком розраховували за формулою:

$$C = A_{випр} - A_{хол} / B, \quad (5.8)$$

де $A_{випр}$ – оптична густина поглинання випробувального розчину;

$A_{хол}$ – оптична густина поглинання холостого розчину;

B – коефіцієнт перерахунку за градувальним графіком.

Було встановлено, що концентрація домішок заліза у водяній суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів змінюється пропорційно від часу перебігу фретингу ($0,1 \times 10^6$, $0,3 \times 10^6$ та $0,7 \times 10^6$ циклів) їх результати представлені на графіку рис. 5.17.

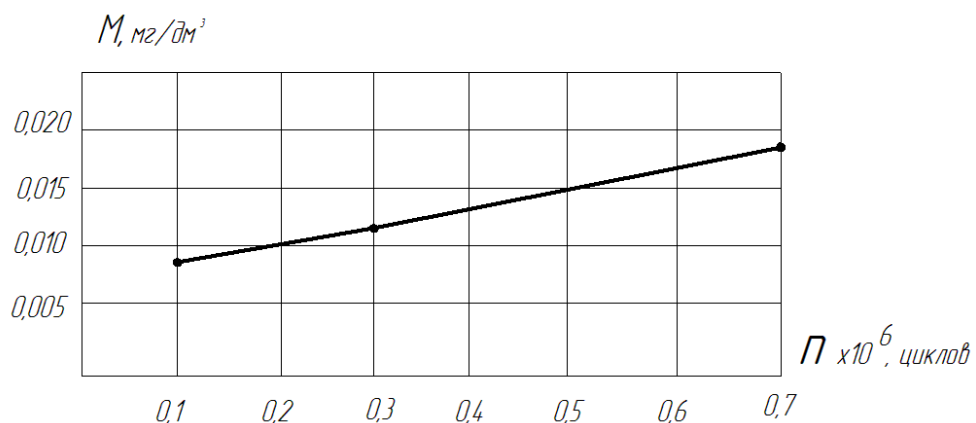


Рис. 5.17. Концентрація заліза у водяній суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів, як продукт зношування при фретингу: $P = 30$ МПа, $A = 30$ мкм, $f = 30$ Гц

Проведені дослідження дозволили виявити, що у водяній суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів

умови перебігу трибохімічних реакцій дещо інші ніж при контакті з повітрям. Найбільш інтенсивно фретинг проходить за умови присутності води, внаслідок чого середовище насичується частинками оксиду заліза та стає світло-бурого кольору. Як видно із зразків (див. рис. 5.16), які піддавались фретингу [154, 155], руйнування поверхні металу у суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів дещо менші ніж при взаємодії з атмосферним середовищем. Частково це пояснюється тим, що для перебігу окисних процесів в суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів необхідна більша енергія активації атомів кисню ніж в середовищі води та на повітрі. Також, як видно з досліджень [154, 155] (див. рис. 5.16) змінюється склад суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів, крім процесів розкладу проходять реакції утворення більш складних хімічних сполук. Трибохімічні реакції проходять в трибо-системі, тобто як і в самому металі так і в розчині. Емісія електронів з металу ініціює утворення вільних радикалів в розчині (RCO^- , H^+ , O^-), які в подальшому утворюють більш складні органічні сполуки. Виривання електронів з поверхні металу в середовище веде до збільшення їх концентрації в середовищі та ініціює протікання трибохімічних реакцій, які по своїй природі суттєво відрізняються від хімічних.

Хроматографічний та рентгенофлуоресційний аналіз дозволив вивчити кінетику трибохімічних процесів, а також надав змогу ідентифікувати компоненти, які утворюються внаслідок зміни складу середовища.

5.5. Методика та обладнання для нанесення легкоплавких сплавів Bi-Sn-Pb-Cd на контактні поверхні

Значна реакційна здатність легкоплавкого сплаву та його низька температура плавлення веде до його адгезії з металевою матрицею. Елементи Bi-Sn-Pb-Cd, які входять до складу сплаву здатні утворювати тверді розчини з

металевою матрицею, м'яке покриття адгезованого сплаву має низький опір текучості і здатне змінювати тертя на контактуючих поверхнях та поглинати певну частину енергії вібрації. Усі ці фактори сприяють сповільненню фретинг-корозії.

Крім хімічних і структурних перетворень поверхневого шару твердих тіл, які взаємодіють, вагомим фактором забезпечення фретингостійкості є створення деконцентрації контактних напружень, поверхнева локалізація і однорідність пластичної деформації. Стан фретингостійкості тісно пов'язаний з релаксаційними властивостями трибосистеми [18].

Для уповільнення виникнення процесу фретинг-корозії у стику поверхонь деталей та подальшого запобігання їх руйнування проводиться розділення контактуючих поверхонь створенням захисного покриття, яке сповільнює окиснення металу з одночасним зменшенням фізичного фактора руйнування поверхонь конструкційних матеріалів. Запропоновано застосовувати технологію та пристрій [158, 159] 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 ($T_{\text{плавл.}} = 68,5^{\circ} - 75^{\circ} \text{ C}$).

Пристрій для нанесення на різьбову поверхню легкоплавкого сплаву містить оправку, на якій послідовно з кроком різьби S розташовані: копіювальний сегмент різьбової поверхні, дозатор пасти-припою з соплом, сегмент різьбової поверхні для калібрування шару пасти-припою, лазерну головку для розплавлення пасти-припою.

Конструктивні параметри зони нанесення пасти-припою та зони калібрування розміру шару пасти-пропою незалежно від розмірів різьбової поверхні для забезпечення ефективного нанесення пасти-пропою вибирають за умови:

$$b = \frac{a}{3}, \text{ мм}, \quad (5.9)$$

де b – висота шару пасти-припою після калібрування, $a = 0,3 \text{ мм}$.

a – висота шару паста-припою яка наноситься з сопла;

Число обертів заготовки вибирають з умови:

$$n_3 = \frac{V_{л} \cdot 1000}{\pi \cdot D}, \quad (5.10)$$

де n_3 – число обертів заготовки;

$V_{л}$ – лінійна швидкість обертання заготовки, м/хв., $V_{л} = 5 \text{ м/хв}$;

D – діаметр заготовки, мм.

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

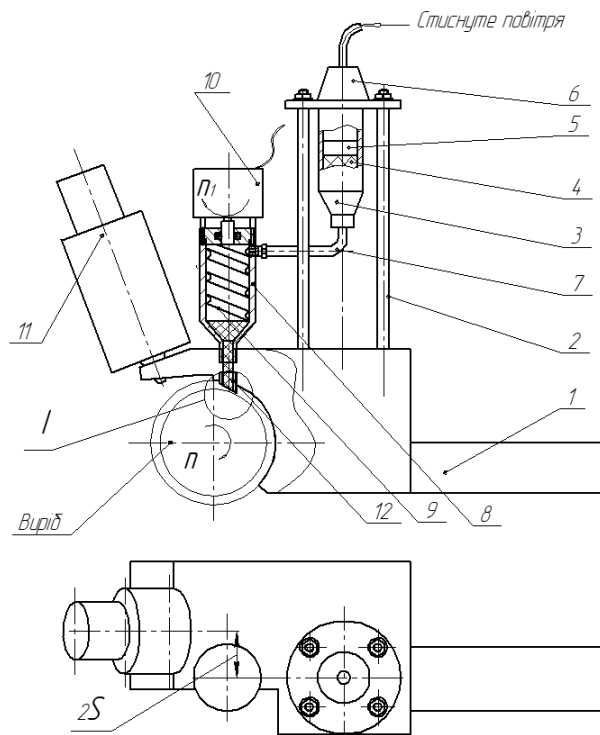


Рис. 5.18. Пристрій для нанесення на різбову поверхню легкоплавкого сплаву: 1 – оправка; 2 – стійка; 3 – система подачі; 4 – паста-припой;

5 – поршень; 6 – редуктор тиску; 7 – трубка; 8 – дозатор; 9 – шнек;

10 – редуктор; 11 – лазерна головка

Пристрій (рис. 5.18) містить оправку 1, на якій на стойках 2 розташовано систему подачі пасти-припою 4 за допомогою поршня 5 та редуктора тиску 6 яка з'єднана трубкою 7 з дозатором 8, що містить шнек 9 з'єднаний з мотор-редуктором 10. На оправку 1 також встановлено під кутом лазерну головку 11, сопло подачі пасти-припою 12, різьбовий сегмент 13 для калібрування шару пасти-припою, копіювальний різьбовий сегмент 14 (рис. 5.19).

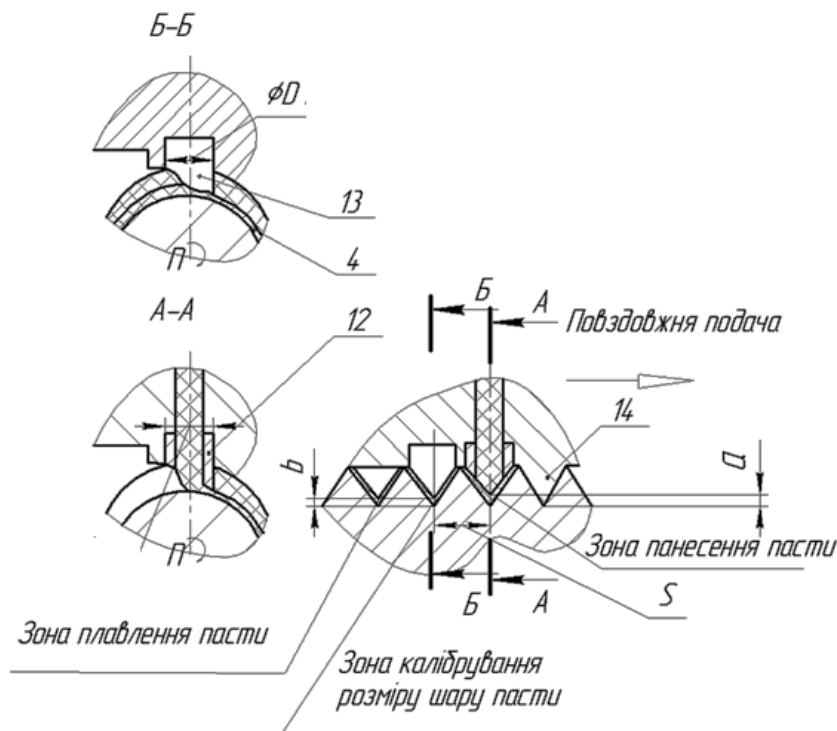


Рис. 5.19. Схема нанесення на різьбову поверхню легкоплавкого сплаву: 12 – сопло; 13 – різьбовий елемент; 14 – копіювальний різьбовий елемент

Працює обладнання наступним чином: пристрій 3 (рис. 5.20) встановлюється на супорт токарного верстата 4 (рис. 5.20), а виріб 1 (рис. 5.20) на який наноситься паста-припой встановлюється у патрон 2 та закріплюється. Пристрій 3 підводиться до виробу 1 і за допомогою ручної повздовжньої та поперечної подач верстата копіювальний різьбовий сегмент 14 (рис. 5.19) вводиться у зачеплення з різьбовою поверхнею виробу та включається верстат який здійснює оберти виробу та необхідну повздовжню подачу від ходового валу верстату. Одночасно з обертанням виробу 1 (рис. 5.20) включається система 3 (рис. 5.18) подачі пасти-припою 4 та лазерна головка 11. Тиск

стисненого повітря діє на поршень 5 і паста-припой 4 по шлангу 7 подається у шнековий дозатор 8. При обертанні шнеку 9 від мотор-редуктора 10 паста-припой 4 безперервно подається у сопло 12 та утворюється попередній шар пасти-припою 4 у зоні її нанесення (рис. 5.19, розріз *A-A*). При подальшому обертанні виробу 1 (рис. 5.20) паста-припой 4 отримує необхідну висоту у зоні калібрування (рис. 5.19, розріз *Б-Б*). При подальшому обертанні виробу 1 (рис. 5.20) калібрований шар пасти-припою 4 (рис. 5.19, зона плавлення пасти) розплавляється лазерним променем від лазерної головки 11 при температурі плавлення 70°C . Таким чином отримується тонкий шар $0,1\text{ мм}$ сплаву Bi-Sn-Pb-Cd на поверхні деталі.

Після нанесення шару сплаву пристрій 3 для нанесення на різьбову поверхню металевих деталей легкоплавкого сплаву (рис. 5.20) відводиться за допомогою поперечної подачі супорта токарного верстата 4 та проводиться заміна виробу 1.

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

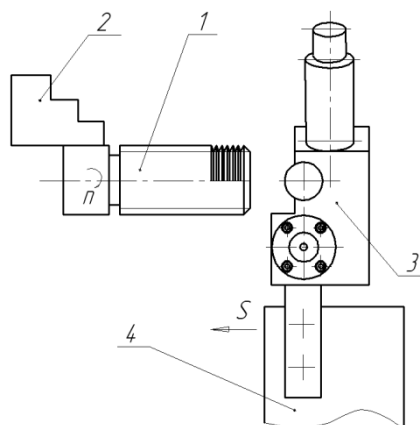


Рис. 5.20. Схема розташування пристрою для нанесення на різьбову поверхню легкоплавкого сплаву на токарному верстаті: 1 – виріб; 2 – патрон; 3 – система подачі пасти; 4 – супорт токарного верстата

5.6. Висновки до розділу 5

1. Результати експериментальних досліджень поверхонь зразків, виходячи з умов перебігу трибохімічних реакцій, показали, що взаємодія контактуючих поверхонь розділених покриттям з легкоплавкого сплаву складом Bi-Sn-Pb-Cd іде по адгезійному механізму.

2. Отримано аналітичну залежність співвідношення швидкості окислення поверхні металу без домішок і з домішками.

3. Експериментально встановлено, що значне зношування матриці, при введенні в зону контакту легкоплавкого сплаву, починається після від $0,15 \times 10^6 N$ до $0,3 \times 10^6 N$ циклів, а далі зношування носить монотонний характер і менше у 2 - 3 рази чим без сплаву.

4. Експериментально встановлено, що внаслідок фретинга змінюється відносний елементний склад взаємодіючих поверхонь. В першій фазі фретинга ($0,1 \times 10^6 N$ - $0,3 \times 10^6 N$ циклів) проходить адгезійний процес, внаслідок якого поверхня твердого тіла насичується елементами Bi-Pb-Sn-Cd і проходить до моменту інтенсивного розвитку фретинга, внаслідок суттєвих змін в тонкій кристалічній структурі. При взаємодії відносний процентний вміст елементів Bi-Pb-Sn-Cd на поверхні твердого тіла збільшується, екрануються процеси окиснення.

5. Присутність у зовнішньому агресивному середовищі (води) радикальних частинок H^+ , OH^- , які мають підвищену окиснювальну здатність, прискорюють фретинг-процеси та сприяють інтенсивному руйнуванню поверхні металу.

6. Продукти фретинг-корозії, які виділяються з зони тертя мають досить складний хімічний склад, так як в зоні контакту знаходиться велика кількість металів. При контакті сталених поверхонь утворюються окисли $\alpha-Fe_2O_3$, $\gamma-Fe_2O_3$ (Fe_3O_4), корозійні продукти $\gamma-Fe_2O_3 \cdot xH_2O$, частинки сталі і легкоплавкого сплаву, а також окисли Bi_2O_5 , SnO_2 , PbO_2 , CdO .

7. Експериментально встановлено, що концентрація заліза в оточуючому середовищі (водяній суміші алканів, ароматичних вуглеводнів, ефірів, одноатомних та багатоатомних спиртів) при фретингу змінюється пропорційно від часу перебігу фретинга.

8. Запропонована технологія та пристрій для нанесення на різьбову поверхню легкоплавкого сплаву, що забезпечує можливість отримання стабільного за розмірами захисного покриття контактуючих поверхонь і уповільнити процес фретинг-корозії у стику різьбових поверхонь деталей, що зазнають циклічні навантаження та контактують з оточуючим середовищем.

ЗАГАЛЬНІ 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 здатні, 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 дифузних 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 Bi_2O_5 , SnO_2 , PbO_2 , 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 стику різьбових поверхонь деталей, що зазнають циклічні навантаження та мають контакт з агресивним оточуючим середовищем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия. Пер. с англ. И. А. Степанов. Л. : Машиностроение, 1976. 272 с.
2. Голего Н. Л., Алябьев А. Я., Шевеля В. В. Фреттинг-коррозия металлов. К. : Техніка, 1974. 272 с.
3. Шевеля В. В., Калда Г. С. Фреттинг-усталость металлов. Хмельницкий: Поділля, 1998. 299 с.
4. Ковалевский В. В. Малоамплитудный фреттинг-износ и фреттинг-усталость металлов и сплавов: автореф. дис. на соиск. учен. степени д-ра техн. 05.02.04. Брянск, 1985. С. 34.
5. Олександренко В. П. Механохімія і реологія зносостійкості механічних трибосистем: автореф. дис. на здоб. наук. ступеня д-ра техн. наук 05.02.04. Хмельницький: ХНУ. 2006. 35 с.
6. Олександренко В. П. Аналіз утворення вуглецьмістких газів при терті металів. *Вісн. Хмельниц. нац. ун-ту. Техн. науки.* 2009. № 2. С. 55-57.
7. Олександренко В. П. Трибохімія зносостійкості металів у обводнених мастилах. *Вісн. Хмельниц. нац. ун-ту. Техн. науки.* 2009. № 1. С. 7-10.
8. Костогриз С. Г., Шалапко Ю. І. Постійне тертя у номінально-нерухомих фрикційних з'єднаннях та встановлення його режимів. *Вісн. Хмельниц. нац. ун-ту. Техн. науки.* 2006. № 6. С. 150-154.
9. Мисліборський В. В., Костогриз С. Г. Повзучість у номінально-нерухомому фрикційному контакті при деформації зсуву. *Проблеми трибології.* 2015. № 1. С. 99-105.
10. Поверхностная прочность материалов при трении. / Костецкий Б. И. и др. Киев: Техника, 1976. 293 с.
11. Костецкий Б. И. Фундаментальные закономерности трения и износа. К. : Знание, 1981. 29 с.
12. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. К : Техніка, 1980. 395 с.

13. Крагельский И. В. Трение и износ в машинах. М. : Машгиз, 1962. 384 с.
14. Крагельский И. В. Трение и износ. М. : Машиностроение, 1968. 480 с.
15. Износостойкость инструментальных материалов в среде газообразного водорода / Я. Н. Гладкий и др. *Проблемы трибологии*. 2000. № 3. С. 61-66.
16. Гладкий Я. М. Про можливість прогнозування впливу корозійно-технологічних середовищ на зносостійкість та циклічну тріщиностійкість металів та сплавів. *Проблемы трибологии*. 1998. № 3. С. 36-43.
17. Алябьев А. Я., Шевеля В. В., Отблеск Б. Я. Изучение фреттинг-коррозии металлов в связи с их способностью к рассеиванию механической энергии. *ФХММ*. 1971. № 1. С. 69-73.
18. Шевеля В. В. Олександренко В. П., Трибохимия и реология износостойкости : монография. Хмельницкий, ХНУ, 2006. 278 с.
19. Голего Н. Л., Алябьев А. Я., Шевеля В. В. Фреттинг-коррозия металлов. Киев: Техника, 1974. С. 222-244.
20. Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. М. : Металлургия, 1975. 456 с.
21. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. М. : Машиностроение, 1986. 360 с.
22. Ковалевский В. В., Козаков В. А., Токарский Д. С. Количественный анализ повреждаемости авиационной техники фреттинг-коррозией. *Сб. "Наука и техника гражданской авиации"* ГОСНИИГА, Москва, 1975. № 9. С. 1-3.
23. Queruel M. Usure et frottement l'Insa etude lespeetits debattements. *Galvano-Organo-Trait, surfase*. 1988. № 582. p. 68-74.
24. Bleuzen C. Evalution de la susceptibilite au «freting» d'endommagement. *Qualite, Rev. prat. contr. ind.* 1989. № 155. p. 20-32.
25. Износ и усталостная прочность болтовых соединений / Осипов В. О. и др. *Болтовые и специальные монтажные соединения в станках и*

строительных конструкциях. Международный. коллоквиум. Москва. 1989. С. 44-49.

26. Brevet P. Trottements enpetits debattements fatigue et usure induites parse phenomene. *Bull lias lab ponts et chaussées*. 1990. № 165. p. 45-50.

27. Heinz R. Schwingusverschleib - Erscheinungs formen, Prufmethoden und Abhilfemabnahmen. *Mat.-wiss*. 1989. 20, №1. p. 14-20.

28. Uhlig, Durch. Tribokorrosion verursachte Bauteillaus - stall. *Shmiernds technic*. 1989. 20. № 6 p. 162, 181-182.

29. Eckert J., Richter H. Peibkorrosion an einem Abtriebsflansch. Fretting corrosion on an Ou an output Shaft Flang. *Prakt. Mettalog*. 1984. 21, № 3. p. 140-143.

30. Comissaris C. P. L., de Gee A.W.J. Fretting corrosion. *Proc. Inst. Mech. Engrs*. Vol.181. pt 30.1986. № 7. p. 41.

31. Яценко Н. Н., Прутчиков О. К. Плавность хода автомобилей М. : Машиностроение, 1968. 217 с.

32. Буше Н. А. Совместимость трущихся пар / Н. А. Буше, В. В. Копытко. М. : Наука, 1981. 128 с.

33. Урьев Н. Б. О влиянии вибраций и поверхностно-активных веществ на процесс разрушения коагуляционно-кристаллизационных структур в начальной стадии структурообразования. *ДАН СССР*. № 5. 1968. С. 243-256.

34. Шевеля В. В., Кирилков В. А., Федына В. П. Развитие фреттинг-коррозии в условиях граничного трения. *Проблеми трибології*. № 2. 2007. С. 102-108.

35. Новиков И. И., Розин К. М. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки: учебник для вузов. М. : Metallurgia, 1990. 336 с.

36. Мисліборський В. В., Ганзюк А. Л., Костогриз С. Г. Методика і особливості визначення початкової тангенційної жорсткості номінально нерухомого фрикційного контакту. *Вісн. Хмельниц. нац. ун-ту. Техн. науки*. 2008. № 2. С. 193-196.

37. Гришалин К. И. Повышение долговечности деталей подверженных фреттинг-коррозии. *«Тр. Ростов на Дону ин-т инж. ж-д. трансп.»*, 1983, № 170. С. 68-70.

38. Masaya I., Hitochi T. Shimanochi Y., Tonegawa E. Effect of oil supply on fretting. *Wear*. 110. 1986. № 3-4. С. 217-225.

39. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация / Ю. К. Машков и др. М. : Машиностроение. 2005. 240 с.

40. Антифрикционные нанокompозиты на основе химически модифицированного СВМПЭ. Часть 2. Влияние нанонаполнителей на механические и триботехнические свойства химически модифицированного СВМПЭ / Панин С. В. И др. *Трение и износ*. 2011. Т. 32, № 4. С. 355-361.

41. Прочностные свойства, структура износостойкость композитов ПТФЭ - технический углерод / В. И. Адери́ха и др. *Трение и износ*. 2008. Т. 29, № 2. С. 160-168.

42. Некоторые принципы разработки фреттингостойкости смазки / Пахшурский В. И. и др. *ФХММ*, 1985. т. 21. № 6. С. 85–86.

43. Шевеля В. В. Микротекучесть идеформационное упрочнение металлов при циклическом нагружении. *Физико-химическая механика материалов*. 1979. № 3. С. 69-74.

44. Трибологические свойства тонкодисперсных покрытий при электроискровом легировании материалами системы Ti Al N / И. А. Подчерняева и др. *Порошковая металлургия*. 2002. № 11-12. С. 49-60.

45. Абразивная стойкость электроискровых и комбинированных лазерно-электроискровых покрытий на легких сплавах / А. И. Духота и др. *Проблеми тертя та зношування* : наук.-техн. зб. Вип. 48. К. : НАУ, 2007. С. 185-195.

46. Марчук В. Е. Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів в умовах фреттинг-зношування. *Проблеми тертя та зношування*: наук.-техн. зб. Вип. 56. К. : НАУ, 2011. С. 84-93.

47. Особенности формирования и трибологического поведения износостойких Zr - содержащих электроискровых и лазерно-электроискровых покрытий на титановом сплаве. / И. А. Подчерняева и др. *Проблемы трибології*. 2012. № 4. С. 53-57.

48. Коротаев Д. Н., Иванова Е. В. Субструктурное поверхностное упрочнение деталей трибосистем методом электроискрового легирования. *Перспективные материалы*. 2011. № 2. С. 98-102.

49. Коротаев Д. Н. Машков Ю. К. Оптимизация технологических режимов электроискрового легирования деталей трибосистем. *Трение и износ*. Т. 30, № 2. 2009. С. 146-151.

50. Ковалевський В. В., Мельников В. В. Использование лазерного излучения для задач трения в условиях малоамплитудного фреттинга. В кн.: Повышение ресурсов узлов трения, работающих в экстремальных условиях. Пермь. 1985. С. 46-52.

51. Повышение фреттингостойкости титановых сплавов плазменными покрытиями / Шевеля В. В. и др. *Проблемы трибологии*. 2008. № 4. С. 105-114.

52. Шулунов А. В., Ковалевський В. В. Повышение фреттинг-усталостной прочности титановых сплавов методом ионного нанесения покрытий. *«Авиационная промышленность»*. 1981. № 10. С. 65-66.

53. Elder J. E., Thamburaj R., Patnajak P. C. Optimising ion implantation conditions for improving wear, fatigue and fretting-fatigue of Ti – 6 Al – 4V. *Surface Eng.* 1989. 5. № 1. p. 55-78.

54. Hirono M., Miyake Shajiro Kato. Исследование фреттинг-износа подшипников качения, подвергнутых ионной имплантации. *J. Jap. Soc. Tribologist. J. Jap. Soc. Lubr. Eng.*, 1989. 34, № 1. p. 89-94.

55. Waterhouse R. B. The effect of surface treatment on the fatigue and fretting-fatigue of metallic materials. *Metal., Treat. Against Wear, Corros, Fretting and Fretique. Oxford ets.* № 4. 1988. p. 31-40.

56. Шалапко Ю. І. Еволюційні моделі фретинг-процесів у номінально-нерухомому фрикційному контакті: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04; Хмельниц. нац. ун-т. Хмельницький, 2009. 427 с.

57. Мельников В. В. Исследование износостойкости в условиях фреттинг-коррозии конструкционных материалов при лазерном облучении: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук. 05.02.04. Киев. 1984. 20 с.

58. Дубняков В. Н. Роль метастабильной структуры, полученной при лазерной обработке, в износостойкости контактирующих пар при виброперемещениях. *Трение и износ*. 1988. № 6. С. 1019-1026.

59. Литвинов В. Н., Михин Н. М., Козлов Г. И., Сокуренок А. Д. Влияние лазерного термоупрочнения на износостойкость металлов при граничном трении, *Трение и износ*, том IV, № 2, 1983, С. 341-343.

60. Роль термоупрочненных слоев полученных лазерной обработкой в износостойкости контактирующих пар при фреттинг-коррозии / Н. Н. Дорожкин и др. *Трение и износ*. 1990. 11. № 2. С. 264-269.

61. Исследование влияния механических факторов и фреттингостойкость сплава ВТЗ-1, упрочненных лазерным излучением / В. С. Коваленко и др. *Технология и организация производства*. Киев. 1988. № 4. С. 40-44.

62. Повышение износостойкости стальных деталей методом трибоэлектрической обработки / Ю. К. Машков и др. *Омский научный вестник*. 2002. Вып. 18. С. 101-103.

63. Упрочняющая фрикционно-электрическая обработка стальных поверхностей трения / М. Ю. Байбарацкая и др. *Трение и износ*. 2004. Т. 25, № 4. С. 434-439.

64. Машков Ю. К., Эдигаров В. Р. Исследование влияния поверхностного модифицирования стальных образцов дисперсными модификаторами на их свойства. *Новые материалы и технологии в машиностроении*: Сб. науч. тр. Брянск : БГИТА, 2005. Вып.4. С. 99-102.

65. Комбинированное фрикционно-электрическое модифицирование стальных поверхностей трения / Ю. К. Машков и др. *Трение и износ*. 2006. Т. 27, № 1. С. 89-94.

66. Технологічні аспекти забезпечення працездатності циклічно-навантажених деталей вузлів тертя з газотермічними покриттями / О. І. Духота та ін. *Проблеми трибології*. 2009. № 1 (51). С. 81-84.

67. Фретингостійкість дискретних поверхонь в умовах граничного тертя / В. Є. Марчук та ін. *Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка*. Вип. 100. Харків : Вид-во Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. С. 147-152.

68. Духота О. І., Тісов О. В. Дослідження зносостійкості композиційних сплавів на основі кобальту в умовах високотемпературного фретингу. *Проблеми тертя та зношування* : наук.-техн. зб. Вип. 53. К. : НАУ, 2010. С. 195-200.

69. Захист поверхонь тертя дискретними поверхнями / В. Є. Марчук та ін. *Проблеми тертя та зношування*. 2013. № 2 (61). С. 80-87.

70. Зносостійкість матеріалів трибомеханічних систем при динамічному контактному навантаженні / О. І. Духота та ін. *Проблеми тертя та зношування*. Вип. 59. 2013. С. 30-35.

71. Комплексний підхід до вибору матеріалів пар тертя, що піддаються фретинг-корозійному зношуванню / О. І. Духота та ін. *Проблеми тертя та зношування*. 2014. № 4 (65). С. 19-28.

72. Духота О. І. Еволюційна модель трибосистеми та загальні принципи забезпечення зносостійкості матеріалів в умовах високотемпературного фретингу. *Проблеми тертя та зношування*. 2015. № 4 (69). С. 10-20.

73. Духота О. І. Концептуальний підхід до створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної зносостійкості. *Проблеми тертя та зношування*. 2017. № 1 (74). С. 97-103.

74. Триботехнічні дослідження високотемпературних зносостійких матрично-наповнених сплавів / О. І. Духота та ін. *Проблеми тертя та зношування*. 2017. №3 (76). С. 60-66.

75. Духота О. І. Науково-технічні основи підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем за умов їх фретинг-контактної взаємодії. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.02.04. Київ, 2019. 402 с.

76. Чернець М., Пашечко М., Невчаз А. Дослідження та розрахунок трибосистем ковзання, методи підвищення довговічності і зносостійкості. Т. 1. Методи прогнозування та підвищення зносостійкості триботехнічних систем ковзання: в 3 т. Дрогобич : Коло, 2001. 492 с.

77. Контактное взаимодействие сопряженных деталей ГТД / Богуслаев В. А., Ивченко Л. Й., Качан А. Я., Мозговой В.Ф. Запорожье : Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2009. 328 с.

78. Пат. на корисну модель № 38036 України. МПК G01M3/00. Установка для дослідження процесу «напруга – 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.

79. Шалапко Ю. І., Курской В. С. Моделювання динамічного руху в інтерфейсі контактних поверхонь при мікропереміщеннях. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2008. № 1. С. 26-31.

80. Шалапко Ю. І., Гончар В. В., Горященко С. Л. Контроль параметрів протікання фретинг процесів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2003. № 1. С. 153-156.

81. Беккерт М., Клемм. М. Способы металлографического травления. М. : Metallurgiya, 1988. 400 с.

82. Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента. Минск : БГУ, 1982. 302 с.

83. Адлер Ю. П., Маркова Г. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 280 с.

84. Шевеля В. В., Олександренко В. П. Вплив дисипативних явищ хімічної природи на зносостійкість спряжених поверхонь в умовах тертя без мащення. *Проблеми трибології*. 2009. № 3. С. 53-59.

85. Ганзюк А., Костогриз С., Бачинський Т. Фретінгостійке покриття металевої поверхні на основі сплаву Ві–Рв–Sn–Cd. *Львівські хімічні читання – 99* : зб. матеріалів наук.-практ. конф. Львів, 1999. С.118.

86. Мисліборський В., Ганзюк А Трибохімія фретингпроцесів та механізм їх розвитку з позиції фізичної хімії та хімії твердого тіла. *Проблеми трибології*. 2002. № 2. С. 95-99.

87. Barney E., Klameski P. An entropy-based model of plastic deformation energy dissipation in sliding. *Wear*, 96, 1984, p. 319-329.

88. Barney E., Klameski P. Energy dissipation in sliding. *Wear*, 77, 1982, p. 115-128.

89. Гутман Э. М. Термодинамика механохимического эффекта. *ФХММ*, 1967, № 5. С. 48-54.

90. Шевеля В., Щербина Л. Энергетика усталостного разрушения. *Надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей*. 1971. № 2. С. 61-68.

91. Буше Н. А. Трение, износ и усталость в машинах. Транспортная техника. М. : Транспорт, 1987. 223 с.

92. Гершман И. С., Буше Н. А. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах. *Трение и износ*, 1995, т. 16, № 1. С. 61-70.

93. Климонтович Ю. Л. Проблемы статистической теории открытых систем. Критерии относительной степени упорядоченности состояний в процессах. *Успехи физических наук*. Т. 158 Б, вып. 1, 1989. С. 59-91.

94. Михин Н. М. Трение в условиях пластического контакта. М. : Наука, 1968. 103 с.

95. Николис Г. Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядочению через флуктуации. М. : Мир, 1979. 273 с.
96. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. Хебды М., Чичинадзе А. Т. 1. Теоретические основы. М. : Машиностроение, Варшава, 1989. 400 с.
97. Хакен Г. Синергетика. М. : Мир, 1980. 400 с.
98. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М. : Мир, 1979. 279 с.
99. Дубинин А. Д. Моделювання тертя. Київ. Товариство «Знання», 1968. 48 с.
100. Иванова В. С. Разрушение металлов. М. : Metallurgy, 1979. 166 с.
101. Ковалевский В., Сергутина Т. Использование энергетической теории трибоконтакта в условиях фреттинг-процесса. В сб. "Материаловедение и производство" Под ред. Сильмана И. Брянск: Изд. БГИТА, 2001. С. 104-110.
102. Аналіз кінетики руйнування поверхневих шарів пар тертя на основі енергетичної моделі / В. М. Крамар та ін. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2013. Т. 14. № 4. С. 69-71.
103. Щербина Л. И. Исследование структурно–энергетических особенностей изнашивания металлов при фреттинг-коррозии: автореф. дис. на соискание учен. степ. канд. техн. 05.02.04. Киев, 1975. 24 с.
104. Влияние поверхностной энергии и энергии связи контактирующих материалов на фреттинг-усталость и долговечность соединений деталей машин / В. И. Похмурский та ін. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 1984. Вып. 20, № 4. С. 55-57.
105. Ковалевский В. Адгезионная модель износа при малоамплитудном фреттинг-процессе. *Трение и износ*. Т. 7, № 4. 1986. С. 647-653.
106. Ковалевский В. В. Малоамплитудный фреттинг-износ и фреттинг-усталость металлов и сплавов : автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук. 05.02.04. Брянск, БИТМ, 1985. 34 с.
107. Хайнике Г. Трибохимия. Мир, 1987. 584 с.

108. Ковалевский В. Прогнозирование усталостного разрушения с учетом влияния фреттинга на поверхностную прочность металлов. *Физика прочности и пластичности*. Куйбышев. 1983. № 10. С. 57-64.

109. Ковалевский В., Сергутина Т. Совершенствование моделей малоамплитудного фреттинг-процесса. В сб. *“Материаловедение и производство”*. Брянск : Изд. БГИТА, 2000. С. 91-101.

110. Устройство для измерения малых усилий и деформаций при трении. / В. Ковалевский та ін. *Проблемы трения и изнашивания*, вып. 20, «Техника», Киев, 1981. С. 18-22.

111. Костокрыз С. Г. Механика вибрационного трения в номинально неподвижном фрикционном контакте : автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук. 05.02.04. Хмельницкий, 1995. 39 с.

112. Браун О. М. Нанотрибология: механизмы трения на атомном уровне. *Актуальные проблемы современного материаловедения*. К., 2008. Т. 2. С. 253-268.

113. Федотов В. В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Ташкент, ФАН Уз. ССР. 1979. 168 с.

114. Фляйшер Г. Об энергетическом уровне фрикционных пар. *Трение и износ*. Т. 8. № 1. 1987. С. 25-38.

115. Сорокин Г. М., Сафонов Б. П. Влияние механических характеристик сталей на их сопротивление абразивному изнашиванию. *Трение и износ*. Т. 5. 1984. № 5. С. 797-805.

116. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П. Розвиток основ еволюційної моделі фретинг-корозії з позицій фізичної хімії та хімії твердого тіла із урахуванням факторів зовнішнього впливу. *Вісн. Хмельниц. нац. ун-ту. Техн. науки*. 2018. № 2. С. 20-28.

117. Синергетика и фракталы в материаловедении / Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. М. : Наука, 1994. 383 с.

118. Кайзер Д. Статистическая термодинамика неравновесных процессов. М. : Мир, 1990. 608 с.

119. Рыбакова Л. М., Куксенова Л. И. Структура поверхностных слоев металла при трении. *Поверхность*. № 8. 1983. С. 145-153.
120. Заковоротный В. Л. Динамика трибосистем. Самоорганизация, эволюция. Ростов на Дону : ДГТУ, 2003. 501 с.
121. Ганзюк А. Л., Мисліборський В. В. Деформаційна модель трибохімічних процесів при використанні легкоплавкого композиту на основі Ві–Рв–Sn–Cd для боротьби з фретинг-корозією. *Вісник технологічного унів. Поділля*. 2002. № 4. ч. 1. С. 138-140.
122. Ганзюк А. Л. Аналітична оцінка зміни активності поверхні контактуючих тіл при проходженні трибохімічної реакції для сталі 45. *Materialy XV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Europejska nauka XXI powieką –2019»*. – Techniczne nauki. V. 9. Przemysł. Nauka i studia. 2019. С.44-47.
123. Костогриз С. Г., Шалапко Ю. І., Ганзюк А. Л. Теоретичні аспекти використання легкоплавких сплавів для пригнічення фретинг-корозії. *Вісник технологічного унів. Поділля*. 1998. № 4. ч. 2. Спец. випуск. С. 80-82.
124. Криштопа С. І. Розвиток наукових основ підвищення знософрикційних властивостей гальм нафтогазового обладнання та технологічного транспорту : дис. на соискание учен. степени докт. техн. наук. Івано-Франківськ, 2016. 366 с.
125. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М. : Металлургия, 1976, 472 с.
126. Кисильов В. Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках. М. : Наука, 1970. 399 с.
127. Реми Г. Курс неорганической химии. М. : Мир, т. 1, 2. 1963.
128. Федоткин И. М., Гулый С. И. Кавитация. Кавитационные энергетические аппараты и установки. К. : Арктур-А, 1998. 130 с.
129. Маргулис М. А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях) : Учеб. Пособие для хим. и хим.-технол. спец. вузов. М. : Высш. шк., 1984. 272 с.

130. Інноваційні нанотехнології активації і знезаражування води та вібраційне обладнання: монографія / Сілін Р. І. та ін. Хмельницький : ХмЦНП, 2013. 252 с., іл.

131. Пат. на корисну модель № 128630 України. МПК G01N 21/79. 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. № у 201804393 ; заяв. 20.04.2018; опубл. 25.09.2018, Бюл. № 18.

132. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов. М. : Мир, 1967. 544 с.

133. Гутман Э. М. Взаимосвязь коррозионных процессов с механическим воздействием на металл. *ФХММ*. № 5, 1967. С. 56-71.

134. Soda N., Aoki A. On fretting corrosions. Part 1. Nature of fretting corrosions. *Trans. Japan. Soc. Mech. Eng.*, 25, 158, 1959.

135. Волькенштейн Ф. Ф. Электронная теория катализа на полупроводниках. М. : Физматгиз, 1960, 187 с.

136. Парравано Г. Роль электронных и ионных дефектов в окислительном катализе. В сб. *Электронные явления в адсорбции и катализе на полупроводниках*, М. : Мир, 1969, С. 175-191.

137. Улиг Г. Коррозия металлов. М. : Металлургия, 1968. 342 с.

138. Шалапко Ю. І., Курской В. С. Активація фретинг-процесів в області дії мікропереміщень контактних поверхонь. *Вісник ХНУ*. 2008. № 2. С. 168-173.

139. Шалапко Ю. І., Ганзюк А. Л., Разуваєва М. А. Прихованість фретинг-процесів у з'єднаннях автомобільної техніки та їх вплив на безпеку експлуатації. *Вісн. Хмельниц. нац. ун-ту. Техн. науки*. 2010. № 5. С. 165-169.

140. Шалапко Ю. І., Гончар В. В., Горященко К. Л. Контроль параметрів протікання фретинг-процесів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2003. № 1. С. 153-156.

141. Shalapko Y., Hanzjuk A., Kurskoy W. Wavelet-analysis for control of contact vibration with friction and fretting-process. *Proceedings 9th Conf. Active*

noise and vibration control methods. Krakow-Zakopane, Poland, 2009. P. 305-310 (зб. матеріалів. конф.).

142. Shalapko Y. Hanzyuk A., Kurskoy W. Wavelet-analysis for control of contact vibration with friction and fretting-process. *9th Conf. Active noise and vibration control methods*. Krakow-Zakopane, Poland, 2009. P. 98-99 (зб. тез допов. конф.).

143. 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.

144. Безъязычный В. Ф., Любимов Р. В., Тимофеев М. В. Экспериментальное изучение процессов разрушения поверхностных слоев металлов при установившемся процессе фреттинг-изнашивания. Механика и физика фрикционного контакта. *Межвузовский сборник научных трудов Издательство Тверского государственного технического университета*. Выпуск № 7. Тверь 2000. С. 52-63.

145. Mordyuk V. M. and Mikosyanchuk O. O., Influence of Shear Component of Load Under the Friction on a Structure-Phase State and Wear of Surface Layer of Steel 1045, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 39, № 6. 2017. p. 795-813.

146. Петухов А. Н. Фреттинг-коррозия и фреттинг-усталость в малоподвижных соединениях / *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва*. №2-1. 2006. С. 84-90.

147. Duguet D. T. The role of cyclic wear (fretting) in fatigue crack nucleation in steels. *Strength Met. and Alloys. Proc. 5th Int. Conf. Aachen*. V.1. Toronto, 1980, p. 213-218.

148. Шалапко Ю., Ганзюк А., Радек Н. Фізико-хімічні основи застосування низькоплавких хімічних систем в процесах, які обумовлюють фреттинг-корозію. *IV Українсько-Польські наукові діалоги*: зб. Матеріалів допуючасн. міжнар. наук. конф., 11-14 жовт. 2011 р., м. Яремче :

Хмельницький : ХНУ, 2011. С. 161-162.

149. Мисліборський В., Ганзюк А., Костогриз С. Шляхи боротьби з фретингом з позиції хімії твердого тіла. *Механіка та інформатика: Зб. матеріалів III українсько-польської наук. конф. молодих вчених, 28-30 квіт. 2005 р.* – Хмельницький : ХНУ, 2005. С. 150-153.

150. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П. Дослідження трибологічних параметрів при зношуванні поверхонь зразків розділених сплавами на основі Bi–Pb–Sn–Cd. *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.

151. Зміни елементного складу при використанні легкоплавкого композиту на основі Bi–Pb–Sn–Cd для протидії фретинг-корозії. / С. Костогриз, В. Камбург, А. Ганзюк та ін. *Проблеми трибології.* 2007. № 3. С.49-54.

152. Ганзюк А. Л. Механізм захисту контактуючих номінально-нерухомих пар покриттям на основі легкоплавкого сплаву при фретинг-корозії. *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.

153. Ганзюк А. Л. Фізико-хімічні основи застосування низькоплавких хімічних систем в процесах, які обумовлюють фретинг-корозію. *Вісник технологічного університету Поділля.* 1998. № 4. ч. 1. С. 111-113.

154. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П., Нездоровін В. П. Зміна складу органічних та водно-органічних середовищ під впливом фретинг-процесів. *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.

155. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П., Нездоровін В. П. Вплив фретинг-процесів на склад водно-спиртових сумішей. *Проблеми трибології.* 2017. № 1. С. 12-18.

156. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П. Вплив вібраційного навантаження на номінально-нерухомі з'єднання та еволюційна модель фретинг-корозії із впливом зовнішнього середовища. *Вібрації в техніці та технологіях* : Збірник тез доповідей XVI Міжнародної наук.-техн. конф. Вінниця. ВНТУ, 2017. С.29-31.

157. Журков С. Н., Назрулаев Б. Н. Временная зависимость прочности твердых тел. *Журнал технической физики*. 1983. Т. 23. № 10. С. 1677.

158. Пат. на корисну модель 119407 України, МПК В23К 25/00. Пристрій для нанесення на різьбову поверхню металевих деталей легкоплавкого сплаву / А. Л. Ганзюк, В. П. Олександренко, А. І. Гордєєв; и 2016 03190 ; заяв. 03.04.2017; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18.

159. Пристрій для нанесення на різьбову поверхню металевих деталей легкоплавкого сплаву з метою запобігання фретинг-корозії. / А. Л. Ганзюк та ін. Матеріали XIII Міжнар. наук.-практичної конференції «Новината за напреднали наука - 2017». V. 10. Технічні науки. Софія. «БялГРАД-БГ». 2017. С. 10-13.

Додаток А**Пошкодження та поломки вузлів транспортних засобів при фретингу**

На перехресті проспекту Миру та Старокостянтинівського шосе у м. Хмельницькому в напівпричепі «МАЗ 9530-010» автомобіля «МАЗ 642208» відламалася частина осі, що спричинило від'єднання переднього правого колеса причепа.

В ході дослідження технічного стану та структурного аналізу зламу вісі передніх правих коліс напівпричепа «МАЗ 9530-010» встановлено, що руйнування вісі відбулось внаслідок дії значного динамічних циклічних навантажень експлуатаційного характеру у місці перерізу, яке було ослаблене розвитком втомленої тріщини металу при фретінг-процесі (Рис. А.1 - А.5).



Рис. А.1. Фотографія зламу вісі правих передніх коліс напівпричепа «МАЗ 9530-010»



Рис. А.2. Фотографія зламу вісі правих передніх коліс напівпричепа «МАЗ 9530-010»



Рис. А 3. Фотографія вигляду зламу вісі правих передніх коліс напівпричепа «МАЗ 9530-010» та розвитку втомленої тріщини (вид на гальмівний щит)

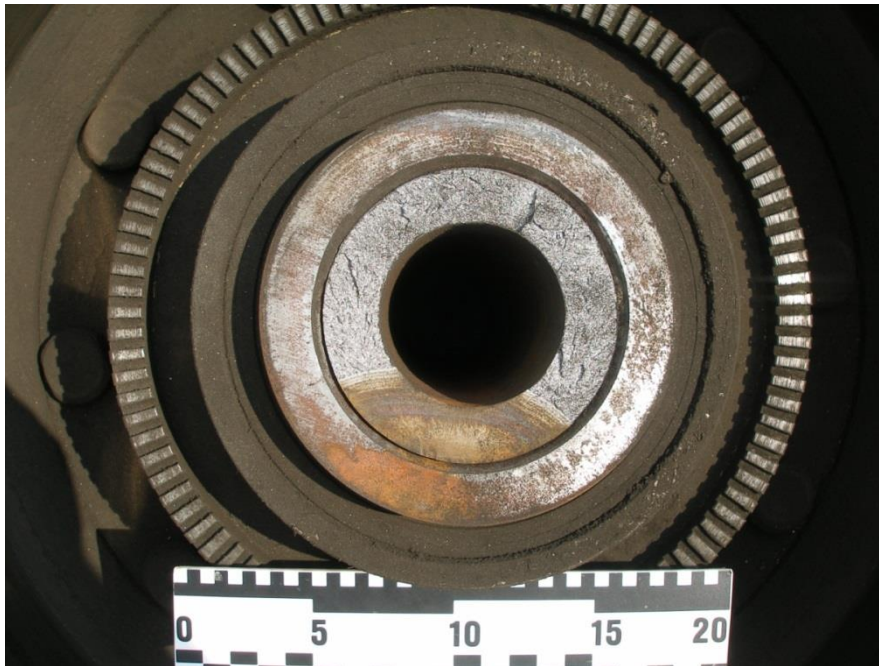


Рис. А.4. Фотографія вигляду зламу вісі правих передніх коліс напівпричепи «МАЗ 9530-010» та розвитку втомленої тріщини (вид на гальмівний барабан)

На автодорозі «Житомир-Чернівці», біля с. Мотрунки Красилівського району сталась дорожньо-транспортна, під час якої автобус «Iveco Mago», рухаючись в напрямку м. Старокостянтинів, виїхав на смугу зустрічного руху, де допустив зіткнення з автомобілем «Skoda Octavia A5», який рухався в напрямку м. Хмельницького.

В ході проведення експертного дослідження технічного стану автобуса «Iveco Mago» встановлено, що виїзду автобуса на смугу зустрічного руху передувала відмова його робочої гальмівної системи, яка виникла через розрив під дією внутрішнього тиску одного із трубопроводів робочої гальмівної системи під час гальмування автобуса внаслідок зменшення несучої спроможності (зменшення товщини стінки після силового та корозійного впливу) трубки трубопроводу гідроприводу гальмівного механізму задніх правих коліс (Рисунок А.5 - А.7).



Рис. А.5. Фотографія трубопроводу гідроприводу гальмівного механізму задніх правих коліс



Рис. А.6. Фотографія поверхні металевого трубопроводу гальмівного механізму задніх правих коліс після силового та корозійного впливу



Рис. А.7. Фотографія потоншення та розриву поверхні металевого трубопроводу гальмівного механізму задніх правих коліс після силового та корозійного впливу

Патенти на корисну модель



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 38036

УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ "НАПРУГА-
ДЕФОРМАЦІЯ" У МЕХАНІЧНОМУ КОНТАКТІ З ВИЩОЮ
ПАРОЮ ДЛЯ МАТЕРІАЛІВ ТА ПОКРИТТІВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи
і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні
моделі **25.12.2008.**

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності

М.В. Паладій





УКРАЇНА

(19) UA (11) 38036 (13) U
 (51) МПК (2006)
 G01M 3/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
 І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ

**ОПИС
 ДО ПАТЕНТУ
 НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

видається під
 відповідальність
 власника
 патенту

(54) УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ "НАПРУГА-ДЕФОРМАЦІЯ" У МЕХАНІЧНОМУ КОНТАКТІ З ВИЩОЮ ПАРОЮ ДЛЯ МАТЕРІАЛІВ ТА ПОКРИТТІВ

1

(21) u200806157
 (22) 12.05.2008
 (24) 25.12.2008
 (46) 25.12.2008, Бюл.№ 24, 2008 р.
 (72) КОСТОГРИЗ СЕРГІЙ ГРИГОРОВИЧ, UA, МИСЛІБОРСЬКИЙ ВОЛОДИМИР ВІТАЛІЙОВИЧ, UA, ГАНЗЮК АНДРІЙ ЛЕОНІДОВИЧ, UA
 (73) ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, UA
 (57) 1. Установа для дослідження процесу "напруга-деформація" у механічному контакті з вищою парою для матеріалів та покриттів, яка складається із станини, механізму закріплення зразка, індикаторів переміщення, вузла навантаження зразка,

2

балансуєних пристроїв, вимірювального комплексу, яка відрізняється тим, що установка додатково оснащена вузлом контактування з вищою парою, який складається із зразка і чотирьох циліндричних контрзразків, розміщених у верхній та нижній обоймах, що розташовані на станині.
 2. Установка для дослідження процесу "напруга-деформація" у механічному контакті з вищою парою для матеріалів та покриттів за п. 1, яка відрізняється тим, що оснащена безконтактним індуктивним датчиком, який закріплено на станині, та електромагнітом, який розташовано на кронштейні, жорстко зв'язаним із станиною.

Корисна модель відноситься до дослідницької техніки і може бути використана для визначення як пружних, так і дисипативних характеристик номінально нерухомого механічного контакту з вищою парою.

Відома установка [1] для дослідження попереднього зміщення, яка дає можливість проводити дослідження процесу "напруга-деформація" в статичних умовах різними по величині і напрямку силами. На нижній зразок, який кріпиться до плити, ставиться верхній зразок з кільцем, через яке передається тангенційне знакоперемінне зусилля. Вимірювання величини прикладеного зусилля відбувається індикаторами часового типу. До нижнього зразка кріпиться вимірювач переміщення в контакті. Здавлююче нормальне зусилля прикладено до вірців через тягу та вимірюється динамометром.

До недоліків даної установки можна віднести можливість дослідження лише плоского контакту та для вимірювання переміщень необхідно застосовувати датчики переміщень з досить високою чутливістю (0,02-0,1мкм), а також необхідна значна кількість зразків для проведення однієї серії досліджень, що унеможлиблює стабільність результатів експерименту.

В основу корисної моделі покладено завдання розширення технологічних можливостей; підви-

щення точності вимірювань; значного зменшення часу на дослідження; високу роздільну здатність установки.

Поставлена задача вирішується завдяки тому, що в установці для дослідження процесу "напруга-деформація" у механічному контакті з вищою парою для матеріалів та покриттів номінально нерухомий контакт здійснюється циліндричним зразком і чотирма циліндричними контрзразками того ж самого діаметру.

На Фіг.1 зображено зовнішній вигляд установки для дослідження процесу "напруга-деформація" у механічному контакті з вищою парою для матеріалів і покриттів та можливі варіанти кріплення зразка і контрзразків; на Фіг.2 показано ескізи зразка та контрзразка; на Фіг.3 зображена кінематична схема установки для дослідження процесу "напруга-деформація" у механічному контакті з вищою парою.

Установа для дослідження процесу "напруга-деформація" у механічному контакті з вищою парою складається з зразка 1, чотирьох циліндричних контрзразків 2, нижньої 3 та верхньої 4 обойми 4, пробки 5, станини 6, направляючих 7, стопорних гвинтів 8, мідних прокладок 9, навантажувального важеля 10, осі 11, планки 12, гвинтів 13, вісі 14, кронштейна 15, вантажу 16, планки прямокутного перетину 17, гвинтів 18, вимірювального крон-

(19) UA (11) 38036 (13) U



(11) **119407**(19) **UA**(51) МПК (2017.01)
B23K 26/00

- | | |
|--|---|
| <p>(21) Номер заявки: u 2017 03190</p> <p>(22) Дата подання заявки: 03.04.2017</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.09.2017</p> <p>(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: 25.09.2017, Бюл. № 18</p> | <p>(72) Винахідники:
Ганзюк Андрій Леонідович, UA,
Олександренко Віктор Петрович, UA,
Гордєєв Анатолій Іванович, UA</p> <p>(73) Власники:
Ганзюк Андрій Леонідович,
вул. Озерна, 10/1-б, кв. 18, м. Хмельницький, 29015, UA,
Олександренко Віктор Петрович,
вул. Інститутська, 3, кв. 70, м. Хмельницький, 29013, UA,
Гордєєв Анатолій Іванович,
вул. Водопровідна, 44/1, кв. 4, м. Хмельницький, 29000, UA</p> |
|--|---|

(54) Назва корисної моделі:

ПРИСТРІЙ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ НА РІЗЬБОВУ ПОВЕРХНЮ МЕТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ ЛЕГКОПЛАВКОГО СПЛАВУ

(57) Формула корисної моделі:

Пристрій для нанесення на різьбову поверхню металевих деталей легкоплавкого сплаву, що містить засіб переміщення виробу, засіб подачі матеріалу, лазерну головку, який відрізняється тим, що на оправці послідовно з кроком різьби S розташовані: копіювальний сегмент різьбової поверхні, дозатор пасти-припою з соплом, сегмент різьбової поверхні для калібрування шару пасти, при цьому конструктивні параметри сегментів різьбової поверхні нанесення пасти-припою та калібрування розміру шару пасти-припою незалежно від розмірів різьбової поверхні вибирають з умови:

$$b = \frac{a}{3}, \text{ мм,}$$

де b - висота шару пасти-припою, яка наноситься з сопла;
 a - висота шару пасти-припою після калібрування, $a=0,3$ мм,
 a число обертів заготовки вибирають з умови:

$$n_3 = \frac{V_n \cdot 1000}{\pi \cdot D},$$

де n_3 - число обертів заготовки;

V_n - лінійна швидкість обертання заготовки, м/хв, $V_n=5$ м/хв;

D - діаметр заготовки, мм.





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **128630** (13) **U**
(51) МПК**G01N 21/79** (2006.01)**G01N 21/3577** (2014.01)

МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2018 04393	(72) Винахідник(и):
(22) Дата подання заявки: 20.04.2018	Ганзюк Андрій Леонідович (UA),
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.09.2018	Олександренко Віктор Петрович (UA), Гордєєв Анатолій Іванович (UA), Костюк Назар Олегович (UA)
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.09.2018, Бюл.№ 18	(73) Власник(и):
	Ганзюк Андрій Леонідович,
	вул. Озерна, 10/1-б, кв. 18, м.
	Хмельницький, 29015 (UA),
	Олександренко Віктор Петрович,
	вул. Інститутська, 3, кв. 70, м.
	Хмельницький, 29013 (UA),
	Гордєєв Анатолій Іванович,
	вул. Водопровідна, 44/1, кв. 4, м.
	Хмельницький, 29000 (UA),
	Костюк Назар Олегович,
	вул. Інститутська, 7, гуртожиток № 4, кім.
	201, м. Хмельницький, 29013 (UA)

(54) СПОСІБ КРИСТАЛООПТИЧНОГО АНАЛІЗУ СТРУКТУРНОЇ БУДОВИ ВОДИ ТА СТУПЕНЯ ЇЇ АКТИВАЦІЇ І ЗАБРУДНЕННЯ БІОЛОГІЧНИМИ РЕШТКАМИ**(57) Реферат:**

Спосіб кристалооптичного аналізу структурної будови води та ступеня її активації і забруднення біологічними рештками включає нанесення на чисте знежирене предметне скло краплі досліджуваної води. Воду висушують при кімнатній температурі та проводять мікроскопування з отриманням електронного зображення мікрофотографії за допомогою відеокамери та персонального комп'ютера з попереднім визначенням водневого показника рН об'єму води, що досліджується, і з якого отримано досліджуваний зразок.

UA 128630 U

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**У фахових виданнях:**

1. Костогриз С. Г., Шалапко Ю. І., Ганзюк А. Л. Теоретичні аспекти використання легкоплавких сплавів для пригнічення фретинг-корозії. *Вісник технологічного університету Поділля*. 1998. № 4. ч. 2. Спец. випуск. С. 80-82.
2. Ганзюк А. Л. Фізико-хімічні основи застосування низькоплавких хімічних систем в процесах, які обумовлюють фретинг-корозію. *Вісник технологічного університету Поділля*. 1998. № 4. ч. 1. С. 111-113.
3. Ганзюк А. Л., Мисліборський В. В. Деформаційна модель трибохімічних процесів при використанні легкоплавкого композиту на основі Bi-Pb-Sn-Cd для боротьби з фретинг-корозією. *Вісник технологічного університету Поділля*. 2002. № 4. ч. 1. С. 138-140.
4. Мисліборський В., Ганзюк А. Трибохімія фретингпроцесів та механізм їх розвитку з позиції фізичної хімії та хімії твердого тіла. *Проблеми трибології*. 2002. № 2. С. 95-99.
5. Костогриз С., Камбург В., Ганзюк А., Мислиборський В., Нездоровін В. Зміни елементного складу при використанні легкоплавкого композиту на основі Bi-Pb-Sn-Cd для протидії фретинг-корозії. *Проблеми трибології*. 2007. № 3. С. 49-54.
6. Мисліборський В. В., Ганзюк А. Л., Костогриз С. Г. Методика і особливості визначення початкової тангенційної жорсткості номінально нерухомого фрикційного контакту. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2008. № 2. С. 193-196.
7. Шалапко Ю. І., Ганзюк А. Л., Разуваєва М. А. Прихованість фретинг-процесів у з'єднаннях автомобільної техніки та їх вплив на безпеку експлуатації. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2010. № 5. С. 165-169.

8. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П., Нездоровін В. П. Вплив фретинг-процесів на склад водно-спиртових сумішей. *Проблеми трибології*. 2017. № 1. С. 12-18.

9. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П. Розвиток основ еволюційної моделі фретинг-корозії з позицій фізичної хімії та хімії твердого тіла із урахуванням факторів зовнішнього впливу. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 2. С. 20-28.

У іноземних періодичних виданнях:

10. Hanzjuk 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) p. 28-32.

Патенти:

11. Пат. на корисну модель № 38036 України. МПК G01M3/00. Установа для дослідження процесу «напруга – 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.

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 ; u 2017 03190 ; заяв. 03.04.2017; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18.

13. Пат. на корисну модель № 128630 України. МПК G01N 21/79. 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. № u 2018 04393 ; заяв. 20.04.2018; опубл. 25.09.2018, Бюл. № 18.

Матеріали та тези конференцій:

14. Ганзюк А., Костогриз С., Бачинський Т. Фретінгостійке покриття металевої поверхні на основі сплаву Ві-Рв-Sn-Cd. *Львівські хімічні читання - 99* : зб. Матеріалів наук.-практ. конф. Львів, 1999. С. 118.

15. Мисліборський В., Ганзюк А., Костогриз С. Шляхи боротьби з фретингом з позиції хімії твердого тіла. *Механіка та інформатика*: Зб. Матеріалів III українсько-польської наук. конф. молодих вчених, 28-30 квіт. 2005 р. Хмельницький: ХНУ, 2005. С. 150-153.

16. Shalapko Y. Hanzjuk A., Kurskoy W. Wavelet-analysis for control of contact vibration with friction and fretting-process. *9th Conf. Active noise and vibration control methods*. Krakow-Zakopane, Poland. 2009. P. 98-99 (зб.тез конф).

17. Shalapko Y., Hanzjuk A., Kurskoy W. Wavelet-analysis for control of contact vibration with friction and fretting-process. *Proceedings 9th Conf. Active noise and vibration control methods*. Krakow-Zakopane, Poland, 2009. P. 305-310 (зб. матер. конф.).

18. Шалапко Ю., Ганзюк А., Радек Н. Фізико-хімічні основи застосування низькоплавких хімічних систем в процесах, які обумовлюють фретинг-корозію. *IV Українсько-Польські наукові діалоги*: зб. Матеріалів доп. учасн. міжнар. наук. конф., 11-14 жовт. 2011 р., м. Яремче : Хмельницький: ХНУ, 2011. С. 161-162.

19. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П., Нездоровін В. П. Зміна складу органічних та водно-органічних середовищ під впливом фретинг-процесів. *Materials of the XII International scientific and practical conference Areas of scientific thought*. V.8. Technical science. Construction and architecture. Geography and geology. Sheffield. 2016/2017. С. 36-39

20. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П., Гордєєв А.І., Нездоровін В.П. Пристрій для нанесення на різьбову поверхню металевих деталей легкоплавкого сплаву з метою запобігання фретинг-корозії. Матеріали XIII Міжнар. наук.-практичної конференції «Новината за напреднали наука - 2017». V. 10. Технічні науки. Софія. «БялГРАД-БГ». 2017. С.10-13.

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

22. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П. Дослідження трибологічних параметрів при зношуванні поверхонь зразків розділених сплавами на основі Bi-Pb-Sn-Cd. *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.

23. Ганзюк А. Л. Механізм захисту контактуючих номінально-нерухомих пар покриттям на основі легкоплавкого сплаву при фретинг-корозії. *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.

24. Ганзюк А. Л. Аналітична оцінка зміни активності поверхні контактуючих тіл при проходженні трибохімічної реакції для сталі 45. *Materialy XV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Europejska nauka XXI wiekq - 2019».* - Techniczne nauki. V. 9. Przemysł. Nauka i studia. 2019. С. 44-47.

Відомості про апробацію результатів дисертації. Основні положення та практичні результати доповідались на наукових конференціях та семінарах: VII науковій конференції «Львівські хімічні читання - 99». м. Львів (27-28 травня 1999 р.), участь очна, III українсько-польської наукової конференції молодих вчених, м. Хмельницький (28-30 квітня 2005 р.), участь очна, 9-th Conf. «Active noise and vibration control methods», Krakow-Zakopane, (Poland, 24-27 травня 2009 р.) участь очна, міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми трибології», м. Київ. (19-21 травня 2010 р.), участь очна, міжнародній науковій конференції «IV Українсько-Польські наукові діалоги», м. Яремче (11-14 жовтня 2011 р.), участь очна, XIII міжнародній науково-практичній конференції «Новината за напреднали наука - 2017». София. (15-22

травня 2017 р.), участь заочна, XII International scientific and practical conference «Areas of scientific thought». Sheffield. (грудень 2016-січень 2017 р.), участь заочна, XVI міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях». м. Вінниця. (26-27 жовтня 2017 р.), участь очна, XIII International scientific and practical Conference «Trends of modern science - 2018». Sheffield. (30 травня- 7 червня 2018 р.), участь заочна, XV International scientific and practical Conference «Modern scientific potential-2019». Sheffield. (28 лютого-7 березня 2019 р.) участь заочна, XV Międzynarodowej naukowii-praktycznej konferencji «Europejska nauka XXI powieką -2019». Przemysł. (7 -15 травня 2019 р.), участь заочна.

Робота доповідалась повністю на розширеному засіданні кафедри трибології, автомобілів і матеріалознавства Хмельницького національного університету 22.03.2019 р.

Акти впровадження



АКТ
 передачі результатів кандидатської
 дисертації Ганзюка Андрія Леонідовича

Комісія у складі: голови – головного технолога заводу ВП Волочиський машинобудівний завод ПАТ «Мотор Січ» Борисюка Р.М.; членів комісії: декана факультету інженерної механіки Хмельницького національного університету д-ра техн. наук, професора Олександренко В.П., професора кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету, д-ра техн. наук Гордєєва А.І., склала цей акт про те, що результати наукових досліджень кандидатської дисертації Ганзюка А.Л. за темою «Підвищення зносостійкості трибосистем в умовах малоамплітудного фретингу із застосуванням легкоплавких сплавів» передані на ВП Волочиський машинобудівний завод ПАТ «Мотор Січ» і прийняті для використання та впровадження.

Зокрема із теоретичних та практичних результатів роботи було використано:

- рекомендації по боротьбі із фретинг-пошкодженнями у номінально-нерухомих з'єднаннях деталей машин, а саме застосування м'яких покриттів на основі свинцю, олова, кадмію, які мають низький опір текучості і здатні змінювати коефіцієнт тертя на контактуючих поверхнях, а також можуть поглинати певну частину енергії вібрації;

- технологію та оптимальну конструктивну схему і режими роботи обладнання для нанесення легкоплавкого сплаву (Bi-Sn-Pb-Cd) на поверхні різьбових з'єднань деталей машин.

Використання цих результатів підвищило на 12...14% міжремонтний ресурс різьбових вузлів кріплення силових установок на які діє періодичне знакозмінне навантаження.

Голова комісії

Р.М.Борисюк

Члени комісії:

В.П.Олександренко

А.І. Гордєєв

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор ТОВ «Агропартнер-1»
 « 20 » _____ Федченко В.О.
 2018р

АКТ

передачі результатів кандидатської
 дисертації Ганзюка Андрія Леонідовича

Комісія у складі: голови - першого заступника директора ТОВ «Агропартнер-1» Мельничука Юрія Володимировича; членів комісії: головного технолога Богуцької Наталії Сергіївни, начальника ТЕЦу Сторожука Віталія Філімоновича, начальника лабораторії КВПтаА Жучкова Валерія Матвійовича, склала цей акт про те, що результати наукових досліджень кандидатської дисертації Ганзюка А.Л. за темою «Підвищення зносостійкості трибосистем в умовах малоамплітудного фретингу із застосуванням легкоплавких сплавів» передані ТОВ «Агропартнер-1» і прийняті для використання та впровадження.

Зокрема із теоретичних та практичних результатів роботи було використано:

- пропозиції по уповільненню фретинг-процесу у номінально-нерухомих з'єднаннях деталей машин, а саме застосування м'яких покриттів на основі свинцю, олова, кадмію, які мають здатність зменшувати коефіцієнт тертя на контактуючих поверхнях різьбових вузлів кріплення обладнання для переробки сировини;
- конструктивну схему, технологію та режими роботи пристрою для нанесення легкоплавкого сплаву (Bi-Sn-Pb-Cd) на поверхні різьбових з'єднань обладнання.

Використання цих результатів дало змогу збільшити на 80% міжремонтний ресурс номінально-нерухомих з'єднань обладнання.

Голова комісії

Члени комісії:

Ю В. Мельничук

Н.С. Богуцька

В.Ф. Сторожук

В.М. Жучков

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Ректор Хмельницького національного
університету,
д.т.н., професор Скиба М.Є.

_____ 2019 р.

**про впровадження у навчальний процес в Хмельницькому національному
університеті результатів кандидатської дисертації Ганзюка А.Л. за темою
«Підвищення зносостійкості трибосистем в умовах малоамплітудного фретингу із
застосуванням легкоплавких сплавів»**

Даний акт складений про те, що в навчальному процесі на кафедрі трибології автомобілів та матеріалознавства при викладанні дисциплін «Вузли тертя машин» та «Інженерія поверхні» впроваджені і використовуються наступні результати кандидатської дисертації Ганзюка А.Л., а саме:

- експериментально встановлено, що внаслідок фретингу контактуючих поверхонь з нанесеним легкоплавким сплавом змінюється елементний склад взаємодіючих поверхонь, в першій фазі проходить процес масопереносу, внаслідок якого поверхня твердого тіла насичується елементами Bi-Pb-Sn-Cd, процентний вміст елементів Bi-Pb-Sn-Cd на поверхні твердого тіла збільшується, екрануються процеси окиснення;

- експериментально встановлено, що захисний шар на основі легкоплавких металів практично повністю виключає окиснення основного металу і призупиняє різні деформаційні явища, а утворені плівки з легкоплавкого композиту грають роль третього тіла;

- запропонована технологія та пристрій для нанесення на різьбову поверхню легкоплавкого сплаву, що забезпечує можливість отримати стабільне за розмірами захисне покриття контактуючих поверхонь і уповільнити процес фретинг-корозії у стику різьбових поверхонь деталей, що зазнають циклічні навантаження та контактують з оточуючим середовищем.

Впровадження цих результатів в навчальний процес сприяє ширшому ознайомленню студентів з проблемами роботи та захисту трибоз'єднань деталей машин і забезпечує підвищення теоретичного та практичного рівня підготовки бакалаврів та магістрів за напрямом «Інженерна механіка».

Декан факультету інженерної механіки
Хмельницького національного університету,
д-р техн. наук, професор

Олександренко В.П.

Завідувач кафедри трибології автомобілів та
матеріалознавства Хмельницького
національного університету,
д-р техн. наук, професор

Диха О.В.