

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.2(87).14732

О. І. ДУХОТА, О. В. МЕЛЬНИК, Н. О. НАУМЕНКО, І. В. КОСТЕЦЬКИЙ,  
М. А. ГЛОВІН

*Національний авіаційний університет, Київ*

*Українське Державне підприємство «Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут», Київ*

## КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ІНЖЕНЕРІЇ ФРЕТИНГОСТІЙКИХ ПОВЕРХОНЬ

*Робота присвячена проблематиці підвищення фретингостійкості трибомеханічних систем. На основі огляду літературних джерел і результатів власних досліджень проведено аналіз конструктивно-технологічних методів, спрямованих на запобігання розвитку фретинг-корозійного зношування і зниження її негативного впливу на втомну міцність деталей. Визначено, що перспективним напрямком у розвитку технології інженерії фретингостійких поверхонь є застосування комбінованих багатоопераційних методів формування зносостійких поверхонь, створення дискретних і градієнтних функціональних покриттів.*

**Ключові слова:** *номінально нерухомі трибосистеми, фретинг-корозія, зношування, зносостійкість, інженерія поверхні.*

**Вступ та постановка проблематики дослідження.** Досвід експлуатації і ремонту машин і механізмів свідчить, що найбільша кількість виникнення їх несправностей і відмов пов'язано із недостатньою зносостійкістю функціональних поверхонь деталей трибомеханічних систем. В інженерній практиці і практиці трибологічних досліджень як один із найбільш руйнівних видів зношування виділяють зношування при фретинг-корозії. Такого зношування зазнають деталі малорухомих і номінально-нерухомих вузлів і з'єднань, що контактують за умов малих відносин вібраційних переміщень. Важкопередбачуваний характер розвитку і в край негативні наслідки фретинг-корозії, поряд з прогресивним на сьогодні підходом до конструювання машин і механізмів за принципом високої живучості і рівноресурсності з мінімально безпечним запасом міцності, ставить завдання пошуку ефективних методів підвищення фретингостійкості деталей трибомеханічних систем в ряд найбільш важливих напрямків трибологічних досліджень.

**Результати дослідження та їх аналіз.** Дослідженню фретинг-корозії присвячено велика кількість праць, опублікованих у багатьох періодичних наукових виданнях, в матеріалах науково-технічних конференцій та у ряді монографій. Фретинг-корозія, як вид зношування, відрізняється різноманітністю форм прояву як за механізмом і характером руйнування поверхонь, так і за наслідками та ступенем її впливу на надійність трибомеханічних систем. Систематизація результатів досліджень, присвячених проблемі боротьби з фретинг-корозією, свідчить [1-6], що пошук ефективних заходів підвищення фретингостійкості трибосистем може проводитись у наступних напрямках:

- конструктивними методами з метою попередження відносного вібраційного переміщення контактних поверхонь, або зменшення його амплітуди до безпечної величини;
- підбиранням найбільш сприятливого поєднання матеріалів контактної пари;

- застосування ефективних мастильних матеріалів і способів мащення;
- технологічними методами шляхом зміцнення, поверхневого модифікування, нанесення захисних покриттів.

Найбільш загальними конструктивними методами боротьби з фретинг-корозією є створення надійної напруженої посадки для з'єднань з натягом, збільшення зусиль затягування різьбових з'єднань, створення щільних штифтових, шпонкових та клепааних з'єднань, вибір раціональних конструктивних схем деталей і вузлів. Перша група методів дозволяють збільшити сили тертя в спряженнях та, як результат, знизити відносні переміщення контактних поверхонь. Вибором раціональної схеми конструкції можна досягти суттєвого зниження пошкодження від фретинг-корозії за рахунок оптимізації силових і кінематичних режимів роботи деталей, забезпечення зниження контактних мікропереміщень і місцевих концентраторів напружень. Рекомендується конструювати спряження так, щоб місця концентрації напружень на деталях не співпадали з місцями можливого виникнення фретинг-пошкодження.

Необхідно сказати, що для запобігання фретинг-корозії конструктивні методи не завжди можуть бути реалізовані або мати достатню ефективність. Так, автор [6] вважає, що недоцільно йти тільки шляхом усунення відносного переміщення спряжених поверхонь так, як навіть деформації в області пружності можуть бути достатніми для виникнення фретинг-корозії. Крім того, усунення вібропереміщень деталей пов'язано із збільшенням їх жорсткості, що викличе не бажане для багатьох конструкцій збільшення їх габаритних розмірів і маси.

Суттєве зниження пошкоджуваності від фретинг-корозії і зменшення її негативного впливу на втомну міцність металів можна досягти вибором раціонального поєднання матеріалів фретинг-контактої пари [1-3;7]. Разом з тим можна констатувати, що для металевих матеріалів не існує такого поєднання матеріалів у контактній парі, яке б давало можливість повністю уникнути фретинг-корозію. До того ж, на тепер, не встановлено будь яких універсальних принципів для конструювання стійких до фретинг-корозії спряжень [3].

Як ефективний захід попередження пошкоджень від фретинг-корозії рекомендується забезпечувати відносно проковзування поверхонь при фретингу з мінімальним коефіцієнтом тертя. Це може бути досягнуто використанням різних мастильних матеріалів: рідких, пластичних, твердих [2; 8-11]. Мащення зменшує силу фрикційного навантаження поверхневих шарів, знижує корозійний вплив зовнішнього середовища, сприяє більш рівномірному розподілу на поверхнях контактних навантажень.

Р. Б. Уотерхауз в своїй праці [2] вказує, що більшість практичних досліджень з запобігання фретинг-корозії за допомогою рідких мастил було виконано на підшипниках кочення при моделюванні умов виникнення пошкоджень типу «несправжнє бренелювання». При цьому в одних дослідженнях було встановлено, що мастила з більш низькою в'язкістю забезпечували меншу ступінь пошкодження, а в інших не виявлено будь якої різниці між протифретинговою дією рідких мастил.

У випадку розвинення фретинг-корозії в умовах нормального до поверхонь вібраційного навантаження в режимі співударяння ступінь фретингового руйнування матеріалів за наявності мастильного матеріалу може бути набагато вищою ніж за повної відсутності мастила. Такий результат пов'язують з вимиванням продуктів зношування із зони контакту та, як наслідок, втратою їх захисної дії, а

також ефектом розклинюючої дії мастила при проникненні його у поверхневі мікротріщини. Останнє сприяє формуванню контактної-втомних пошкоджень і в декілька разів може знизити втомну довговічність [12].

Систематизація досліджень з використання для попередження фретинг-корозії пластичних мастильних матеріалів дозволила авторам [2; 3] зробити висновок, що їх антифретингові властивості залежать в основному від здатності мастила проникати в зону контакту, стійкості до перетирання і здатності утворювати на поверхні деталі міцні граничні мастильні шари. Відмічається також сприятливий вплив на противозношувальні властивості мастил присадок на основі хлористих, сірчаних та фосфатних сполук. Позитивну роль в цьому випадку відіграють вторинні тонкоплівочні структури, що утворюються на поверхні металу у наслідок хімічної взаємодії з присадками. Стосовно ефективності таких антифрикційних домішок, як графіт і дисульфід молібдену, однозначної відповіді не дається.

В цілому аналіз робіт присвячених використанню мастильних матеріалів як методу боротьби з фретинг-корозією свідчить, що будь-який мастильний матеріал і спосіб введення його в зону контакту за умов наявності відносних мікропереміщень не виключає процес фретинг-корозійного зношування, а лише може уповільнити його інтенсивність. Тому мащення, у тому числі із застосуванням твердих мастильних матеріалів, розглядається як спосіб відтермінування, а не як кардинальний метод боротьби з фретинг-корозією [2].

Найбільші можливості для попередження фретинг-корозії дають технологічні методи. Згідно класифікації, поданої авторами [1], до цієї групи відносяться різні способи оброблення контактних поверхонь деталей, які підвищують твердість, корозійну стійкість, попереджають металевий контакт, знижують коефіцієнт тертя, тобто методи, що гальмують розвинення провідних процесів фрикційного руйнування при фретинг-корозії – захоплення, втомно-окиснювальних, корозійно-втомних і абразивних процесів.

Технологічні методи підвищення зносостійкості і втомної довговічності деталей і з'єднань в умовах фретинг-корозії розглядались в багатьох працях. З цією метою застосовувались методи поверхневого пластичного деформування, модифікування поверхонь термодифузійним насиченням різними елементами, електроіскровим легуванням, оброблення поверхонь концентрованими джерелами енергії, нанесення гальванічних, газотермічних і інших захисних покриттів. В галузі триботехнології авіаційного спрямування, особлива увага надається методам підвищення фретингостійкості титанових сплавів і трибоспряджень деталей гарячої частини ГТД.

В роботі [13] досліджував вплив поверхневого пластичного деформування (ППД) на фретингостійкість. Результати, отримані на двофазному  $\alpha+\beta$  – титановому сплаві зміцненому віброударним способом показали, що таке оброблення не дає позитивного результату. На зміцнених зразках, як і на зразках підданих тільки шліфуванню, після 15...30 хвилин випробування з'явилися помітні пошкодження. Величина зносу у цьому дослідженні не визначалась. Тому кількісно оцінити вплив ППД на фретингостійкість не виявляється можливим.

Натомість, експериментальні дані, отримані на зразках із нормалізованої середньовуглецевої сталі показали [1; 14], що у результаті ППД такими методами, як пневмодробоструменеве нагартування і віброшліфування з наступним віброзміцненням, інтенсивність зношування поверхонь в умовах фретинг-корозії зме-

ншилась у 1,5...3 рази. Одночасно в багатьох дослідженнях, виконаних на різних конструкційних сплавах, відмічається виключно позитивний вплив зміцнення методами ППД на фретинг-утомну міцність як для сталей, так і для алюмінієвих і титанових сплавів [2; 3; 15-16].

Ефективними технологічними методами, які дозволяють підвищити опір руйнуванню конструкційних сталей фретинг-корозією при одночасному підвищенні фретинг-втомної довговічності, визнано такі методи ХТО, як алітування, борування, хромування, ванадування. З огляду на підвищення фретингостійкості ще більшу ефективність показали методи комплексного термодифузійного насичення – бороміднення, боросиліцидування, карбохромування [1; 17]. В той же час відмічається [3], що такі розповсюджені у авіабудуванні методи ХТО, як цементация, азотування, ціанування в умовах фретинг-корозії показують недостатню зносостійкість.

Для підвищення зносостійкості та запобігання схоплення деталей вузлів тертя в практиці широкого застосування набули електролітичні (гальванічні) покриття. Гальванічні хромові покриття за оптимально вибраного режиму хромування дають хороший результат з підвищення опору фретинг-корозійному зношуванню, але мають суттєвий недолік: знижують механічні властивості конструкційних сталей при тривалому статичному і циклічному навантаженні. Підвищення циклічної міцності хромованих деталей при одночасному підвищенні їх фретингостійкості може бути досягнуто поверхневим пластичним деформуванням шляхом алмазного вигладжування [18]. До того ж, необхідно враховувати, що в останній час, у зв'язку з високою токсичністю і канцерогенністю сполук хрому та проблемою їх утилізації, застосування електролітичного хромування суттєво обмежується і потребує розроблення та впровадження альтернативних, більш екологічно безпечних і трибологічно ефективних технологій поверхневого зміцнення і відновлення деталей [19-20].

З метою усунення схоплення і підвищення антифрикційності пар тертя гальванічним способом на робочій поверхні однієї із деталей пари осаджують тонкі шари м'яких металів – міді, олова, свинцю, срібла, кадмію, латуні. Позитивний ефект у запобіганні фретинг-корозії, притаманний більшості покриттів із м'яких металів, пояснюється їх високою пластичністю, малим опором зсуву, міцною адгезією з основним металом. Для підвищення триботехнічних властивостей таких покриттів рекомендується наносити їх на попередньо зміцнену, більш тверду поверхню металу. Так, застосування двошарового покриття у складі твердого підшарку із композиції Ni-Cr-B-Si і зовнішнього шару гальванічної міді дозволило практично повністю усунути фретинг-корозію фланцевих поверхонь корпусних деталей вантажних автомобілів [21]. Підшарок із молібдену дозволив значно зменшити коефіцієнт тертя при одночасному зниженні інтенсивності зношування срібного покриття [22].

Зниження коефіцієнта тертя і підвищення зносостійкості покриттів із м'яких металів може бути досягнуто також введенням до їх складу таких твердомасляних компонентів, як графіт, дисульфід молібдену, політетрафторетилен [23; 24]. В літературних джерелах [25; 26] наводяться також приклади застосування для підвищення довговічності деталей деяких комбінованих способів оброблення поверхонь за участю електролітичних покриттів із м'яких металів, зокрема, електролітичне міднення з наступною пасивацією, електролітичне міднення з наступним дифузійним легуванням алюмінієм.

Значний інтерес для захисту від захисту від фретинг-корозії можуть представляти неметалеві полімерні покриття. В літературних джерелах наводяться результати дослідження зносостійкості в умовах малих вібраційних переміщень таких полімерних покриттів, як пластмасові плівки ЛК—И, МПС-1, ПФЕ-2/10 [27], наїрітові покриття [28], покриття сформовані із композиції на основі політетрафторетілену, епоксидних і фенольних смол наповнених такими антифрикційними домішками як дисульфід молібдену, порошок свинцю, графіт [29; 30]. Автори відмічають достатньо високу ефективність таких покриттів як для попередження пошкодження фретинг-корозією металевих поверхонь, так і для підвищення фретинг-утомної довговічності елементів трибосистем. Однак захисна дія тонкоплівкових полімерних покриттів суттєво залежить від температури і амплітудно-силових параметрів фретингу, а експериментальних даних для прогнозування їх довговічності для різних умов роботи трибоспрямижень недостатньо.

Для надання робочим поверхням деталей високої твердості і зносостійкості широкого застосування набули такі методи оброблення, як модифікування поверхонь лазерним випромінюванням і електроіскровим легуванням. Лазерне термозміцнення і лазерне легування дають змогу в широких межах змінювати фізико-механічні властивості поверхонь металів і сплавів за рахунок структурних і фазових перетворень в зоні дії лазерного променя та зміни хімічного складу приповерхневих об'ємів металу. Результати експериментальних досліджень [31-34] свідчать про те, що лазерна обробка дозволяє підвищувати не тільки характеристики поверхневої міцності металів, але і такі залежні від стану поверхні властивості як тріщиностійкість, опір корозії і опір зношуванню. Так, в дослідженнях, виконаних на різного класу вуглецевих і легованих сталях, зміцнення поверхні лазерним обробленням забезпечило підвищення фретингостійкості в 1,5 ... 3 рази [34]. При цьому встановлено, що лазерне термозміцнення знижує чутливість сталі до контактного навантаження при фретинг-корозії.

При електроіскровому легуванні відбувається перенесення під дією електричного іскрового розряду матеріала з легуючого електрода (анод) на поверхню деталі, що обробляється (катод). Сформований поверхневий шар є результатом взаємодії між елементами вихідної поверхні металу, елементами легуючого електрода і речовиною навколишнього середовища, а також імпульсної дії на поверхню високих температур і тиску. Насьогодні найбільш повно досліджені закономірності формування структури і властивості поверхневих шарів металів при електроіскровому легуванні такими металами як Ni, Cr, Co, Al, сплавами на основі Fe, Ni і тугоплавкими з'єднаннями перехідних металів з вуглецем, азотом, бором, кремнієм. Результати виконаних досліджень показали, що електроіскрове легування має великі можливості для підвищення працездатності деталей в парах тертя, в тому числі при роботі в умовах високих контактних навантажень і в широкому діапазоні температур. Ефект підвищення зносостійкості істотно може підсилитись дифузійним насиченням, зокрема, азотуванням [14], лазерним оплавленням [35] попередньо сформованих електроіскровим легуванням покриттів, формуванням шляхом вибору складу легуючих елементів і схем легування дискретних глобулярних структур, багат шарових і адаптивних покриттів [36-38].

Серед технологій отримання захисних покриттів та відновлення деталей широкого застосування набули газотермічні методи такі, як електродугова металізація, газополуменеве, плазмове і детонаційне напилювання. Ці методи ґрунтуються на єдиному принципі формування покриттів із дискретних частинок матеріалу, нагрітих і прискорених високотемпературним газовим струменем.

Важливою особливістю методів газотермічного напилювання (ГТН) є можливість керування складом, структурою і властивостями покриттів шляхом вибору компонентів вихідного матеріалу, технологічних режимів напилювання, конструктивних схем нанесення покриття. Розробленню матеріалів для ГТН – покриттів, установленню зв'язку між їх структурно – фазовим складом, технологічними параметрами напилювання і властивостями присвячена велика кількість праць, в тому числі праць з дослідження зносостійкості ГТН – покриттів в умовах фреттинг – корозії [39;40]. Узагальнюючи результати таких досліджень можна констатувати, що найбільш перспективним вирішенням проблеми забезпечення високої зносостійкості поверхонь методами ГТН є застосування композиційних покриттів. Для підвищення довговічності ГТН – покриттів по критерію адгезійно - когезійної міцності і циклічної міцності системи «покриття – основа» перспективним є створення дискретних і, так названих, багатошарових градієнтних покриттів з плавним переходом фізико-механічних властивостей від зовнішньої поверхні покриття до матеріалу основи.

В останній час у розвитку технологій поверхневого зміцнення деталей найбільш прогресивним напрямом, що дозволяє різко підвищити експлуатаційні властивості поверхонь тертя, є розроблення і застосування багатоопераційних, так названих, дуплексних методів. Ці методи ґрунтуються на послідовному або одночасному використанні для створення зносостійких поверхневих шарів двох або більшої кількості технологічних методів. Серед дуплексних технологій трибологічного спрямування найбільш інтенсивно розвиваються методи електроконтактного термомеханічного зміцнення, електроіскрове легування з подальшим лазерним оплавленням чи термодифузійним насиченням, оброблення концентрованими потоками енергії нанесених на поверхню деталей термодифузійних, електролітичних та газотермічних покриттів. Застосування комбінованих методів дає можливість створювати поверхневі шари з самим різним фізико-механічними властивостями і багаторазового підвищити зносостійкість деталей [41-44].

#### Список літератури

1. Голего Н. Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н. Л. Голего, А. Я. Аляб'ев, В. В. Шевеля. – К.: Техніка, 1974. – 272 с.
2. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия / Р.Б. Уотерхауз – Л.: ашиностроение, 1974. – 272 с.
3. Шевеля В. В. Фреттинг-усталость металлов / В. В. Шевеля, Г. С. Калда. – Хмельницький: Поділля, 1998. – 299 с.
4. Филимонов Г. Н. Фреттинг в соединениях судовых деталей / Г. Н. Филимонов, Л. Т. Баладний. – Л.: Судостроение, 1973. – 296 с.
5. Ковалевский В. В. Технологические методы управления фреттинг-процессами / В. В. Ковалевский, С. Г. Костогрыз. – К.: Знание, 1989. – 18 с.
6. Phillips C. E. Fretting corrosion and fatigue failure / С. Е. Phillips // *Teknich Ukeblad.* – 1958. - Vol. 105, №13. – P. 281 – 286.
7. Комплексний підхід до вибору матеріалів пар тертя, що піддаються фреттинг-корозійному зношуванню / О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, Н. О. Науменко, Л. Р. Кіндрачук, В. В. Харченко. // *Проблеми тертя та зношування.* – 2014. - №4 (65). – С. 19 – 28.
8. Ревков Г. А. Мероприятия по устранению фреттинг-коррозии / Г. А. Ревков // *Новое в тяжелом машиностроении.* – 1957. - №1. – С. 15- 21.
9. Некоторые принципы разработки фреттингостойкой смазки / В.И. Похмурский, Ю. Л. Белонога, Я. Н. Сирак, Н. В. Герман // *Фізико-хімічна механіка матеріалів.* – 1985. – Вып. 21, №6. – С. 85 – 86.
10. Маленков М. И. Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов / М. И. Маленков, С. И. Каратушин, В. М. Тарасов. – Санкт-Петербург, Балт. гос.техн.ун-т, 2007. – 54 с.

11. Шевеля В. В. Развитие фреттинг-коррозии в условиях граничного трения / В. В. Шевеля, В. А. Кирилков, В. П. Федына // Проблемы трибологии. – 2007. - №2. – С. 102 – 108.
12. Дацишин О. П. Розрахункові моделі механіки руйнування для оцінювання довговічності твердих тіл при їх циклічній контактній взаємодії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня док. техн. наук: спец. 01.02.04. – механіка деформованого твердого тіла / О. П. Дацишин. – Львів, 2007. – 42 с.
13. Кудрявцев И.В. Влияние поверхностных обработок на возникновение и развитие трещин в титановом сплаве / И.В. Кудрявцев // Труды ЦНИИТМАШ, Кн.112.-М: Машиностроения, 1976. –С.236–247.
14. Шевеля В. В. Трибохимия и реология износостойкости / В. В. Шевеля, В. П. Олександренко. - Хмельницький: ХНУ, 2006. – 278 с.
15. Шевеля В. В. Влияние поверхностного пластического деформирования на фреттинг-усталостную прочность металлов / В. В. Шевеля, Г. С. Калда, В. П. Олександренко // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: під. ред. В. Т. Трошенко. – Тернопіль: ТДТУ, 2004. – С. 99-103.
16. Серебряков В. И. Повышение долговечности при фреттинг-усталости технологическими методами / В. И. Серебряков // Поверхностный слой, магнитные и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: - 1990. – С. 81.
17. Изотов Е. Д. Повышение долговечности деталей несущей системы вертолетов, работающих в условиях фреттинг-коррозии, методом диффузионного хромирования / Е. Д. Изотов, Г. Н. Дубинин // Перспективные методы ремонта авиационной техники: Межвуз. сборник науч. трудов. – К.: КИИГА, 1981. – С. 127 -135.
18. Технологическая инструкция по восстановлению деталей АТ / А.Я. Аляб'ев , В.А. Вендіктов, Г.А. Гельгар и др. - -М.: ГосНИИГА, 1982. – 32с.
19. Trofimov V.A. Metody uluchsheni podvizhnyh uzlov shassi? Vypolnenny iz titanovyh splavov / V. A. Trofimov // Avsacionnye – Kosmicheskaja tehnika I tehnologsja. – 2001. – 24. – S. 143 – 150.
20. Tribotekhnicheski harakteristiki detonacionnyh pokrytij na titanovom splave VT-22 / M. V. Kindrachuk, Je. A. Kulgavyi, A. L. Shevchenko, A. P. Danilov // Problemi tertja ta znoshuvannja. – 2009. – 51. – S. 112 – 123.
21. Повышение фреттингостойкости деталей грузовых автомобилей // Долговечность трущихся деталей машин; под. ред. Д. Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
22. The effects of molybdenum intermediate layers on the frictional properties of silver films for vacuum use / T. Nishioka, K. Sekine, K. Matsumoto ets. // International tribology conference. Yokohama (Synopses). – Japanese Society of Tribologist. – 1995. –P. 161.
23. Friction and wear of electroplated silver-carbon composite / H. Shinohara, K. Taguchi, S. Tanata, K. Kuboyuma // International tribology conference. Yokohama (Synopses). – Japanese Society of Tribologist. – 1995. – P. 161.
24. Твердосмазочные покрытия для машин и механизмов, работающих в экстремальных условиях / Е. П. Ковальов, М. Б. Игнатьев, А. П. Семенов и др. // Трение и износ. – 2004. – Том 25, № 3. – С. 316 – 336.
25. Крылов К. А. Долговечность узлов трения самолетов / К. А. Крылов, М. Е. Хаймзон. – М.: Транспорт, 1976. – 183 с.
26. Крылов К. А. Повышение износостойкости деталей самолетов / К. А. Крылов. – Из-во «Транспорт», 1974. – 144 с.
27. Муравкін О.Н. Защита металлических поверхностей от фреттинг – коррозии пластмассовыми пленками / О.Н. Муравкин, А.В. Рябченков, П.Н. Панафидин. – м.:ЦНИИТМАШ, 1959.-247с.
28. Иванова В.С. Влияние наиритовых покрытий на циклическую прочность образцов и деталей, подвергающихся действию фреттинг – коррозии /В.С. Иванова, М.Г. Вейцман С.Л. – В кн.: Усталость металлов и сплавов- м.:изд-во “Науки”, 1971/-с/103-108.
29. Евдокимов Ю.А. Фреттингостойкость композиционных фторпластмассовых покрытий /Ю.А. Евдокимов, К.К. Мороз, Т.В. Сухоленцева //Трение и износ. – 1981.-Т. 2, №4.-С.610-616.
30. Применение фторпластмассового электрофоретического покрытия для защиты титанового сплава ВТ3-1 в условиях фреттинг-коррозии / М.Г. Вейцман, Л.Н. Колтунова, И.С. Коган и др. // Журнал прикладной химии.- 1980. –Т III, №5.-С.1013-1016.

31. Григорьянц А.Г. Исследование упрочнения титанового сплава ОТ -4 с помощью лазерного излучения / А.Г.Григорьянц. // Поверхностные методы упрочнения металлов и сплавов в машиностроении. – М. : “Знание”, 1985. С.22-24.
32. Хетч Л. Методы поверхностной обработки высокопрочных сплавов с целью повышения их трещиностойкости : состояние и перспективы /Л. Хетч, Б.Рам. В кн. Обработка поверхности и надежность материалов: Пер. с англ./ Под ред. Дж. Бурке, Ф. Вайса. – Мир, 1984. – С. 121-148.
33. Исследование влияния лазерного упрочнения на износостойкость титанового сплава ОТ 4 – 0 /Н.Л. Голего,В.П. Оноприенко, А.Ф. Романчук, О.П. Мельниченко // Трение и износ. – 1988. – Том 9, № 4. – С. 729-733.
34. Мельник В.В. Исследование износостойкости в условиях фреттинг – коррозии конструкционных материалов при лазерном облучении: автореф. дис. на соискание учен. степени канд.техн.наук: спец. 05.02.04- трение и износ / В.В. Мельник. – К.: КИИГА, 1985.-22с.
35. Шалапко Ю.И. Лазерная обработка электроискровых покрытий для обеспеченно фреттигостойкости / Ю.И. Шалапко, В.Г. Каплун, В.В. Гончар // Весник двигателестроения. 2002. -№ 4. С. 17-25.
36. Физико-химическая модель формирования износостойких покрытий на алюминиевых сплавах при электроискровом массопереносе композиционной керамики / Д.В. Юречко, И.А. Подчерняева, А.Д. Панасюк, О.Н. Григорьев // Порошковая металлургия. – 2006. №1/2. С. 51-58.
37. Особенности формирования и трибологического поведения износостойких  $ZrB_2$  – содержащих электроискровых и лазерно-электроискровых покрытий на титановом сплаве. / И. А. Подчерняева, В. М. Панашенко, А. И. Духота, А. Д. Панасюк, // Проблемы трибології. – 2012. - №4. – С. 53 – 57.
38. Структурно-фазовые превращения на поверхности лазерно- электроискрового покрытия в условиях фреттинг-коррозии на воздухе / В. М. Панашенко, И. А. Подчерняева, А. И. Духота, А. Д. Панасюк. // Порошковая металлургия. – 2012. - № 1/2. – С. 142 – 152. [Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2012, 51 (1-2), С. 112-120].
39. Ильинский И.И. Оптимальные и граничные условия фреттинго-стойкости детонационных покрытий на основе карбида вольфрама / И.И. Ильинский, А.И. Духота, В.В. Сергеев //Трение и износ. – Т.П - № 6. – С. 850-855.
40. Духота О. І. Зносостійкість композиційних газотермічних покриттів за умов фреттинг-корозійного зношування / О. І. Духота, Н. О. Науменко, Л. В. Богач // Матеріали для роботи в екстремальних умовах : метріали V Міжнар. наук. конф., 3 – 5 грудня 2015 р. – К.: НТУУ “КПІ”. – 2015. – С. 148 – 150.
41. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости / Б.А.Ляшенко, Е.К.Соловых, В.И. Мирненко и др.: под. ред. В.В. Харченко. – К.: Ин – т пробл. прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2010. – 193с.
42. Свойства защитных Ni-Cr покрытий после дуплексной обработки/ А. Д. Погребняк, С. Н. Братушка, Н. К. Ердыбаева и др. // ФХОМ. – 2007. - № 6. – С. 37-47.
43. Формування покриттів триботехнічного призначення комбінованою лазерно-хіміко-термічною обробкою / А. О. Корнієнко, М. С. Яхья, Н. В. Іщук та інші. // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2008. – Вип. 49. – Т. 2. – С. 61-65.
44. Дискретне зміщення та зносостійкість циліндричних трибосистем ковзання/ О.В. Диха, Р.В. Сорокатий, С.Ф. Пасонський, М.О. Диха- Хмельницький.-ХНУ, 2016.-197с.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2020.

**Духота Олександр Іванович** – доктор технічних наук, професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден Національно авіаційного університету.

**Мельник Олексій Валерійович** – аспірант, Національний авіаційний університет.

**Науменко Ніла Олександрівна** – науковий співробітник ДП«ДЕРЖАВТОТРАНСНДІПРОЕКТ».

**Костецький Іван Володимирович** – студент Національного авіаційного університету.

**Гловін Михайло Андрійович** – студент Національного авіаційного університету.

O. I. DUKHOTA, O. V. MELNYK, N. O. NAUMENKO, I. V. KOSTECKII, M. A. GLOVIN

## STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FRETTING RESISTANCE OF SURFACES ENGINEERING

The paper considers the problem of increasing the fretting resistance of tribomechanical systems. Based on a review of literary sources and the results of our own research, we conducted an analysis of structural and technological methods aimed at preventing the evolution of fretting-corrosion wear and reducing its negative effect on the fatigue strength of parts. It has been determined that a promising direction in the development of technology for engineering of fretting-resistant surfaces is the use of combined multi-operational methods for the formation of wear-resistant surfaces, the creation of discrete and gradient functional coatings.

**Key words:** nominally stationary tribosystems, fretting corrosion, wear, wear resistance, surface engineering.

### Referenses

1. Golego N. L. Fretting-korroziya metallov / N. L. Golego, A. Ya. Alyab'ev, V. V. Shevelya. – K.: Tekhnika, 1974. – 272 s.
2. Uoterkhauz R. B. Fretting-korroziya / R.B. Uoterkhauz – L.: Mashinostroenie, 1974. – 272 s.
3. Shevelya V. V. Fretting-ustalost' metallov / V. V. Shevelya, G. S. Kalda. – Khmel'nits'kii: Podillya, 1998. – 299 s.
4. Filimonov G. N. Freting v soedineniyakh sudovykh detalei / G. N. Filimonov, L. T. Baladnii. – L.: Sudostroenie, 1973. – 296 s.
5. Kovalevskii V. V. Tekhnologicheskie metody upravleniya fretting-protsessami / V. V. Kovalevskii, S. G. Kostogryz. – K.: Znanie, 1989. – 18 s.
6. Phillips C. E. Fretting corrosion and fatigue failure / C. E. Phillips // Teknich Ukeblad. – 1958. - Vol. 105, №13. – P. 281 – 286.
7. Kompleksnii pidkhid do vioru materialiv par tertya, shcho piddayut'sya freting-koroziinomu znoshuvannyu / O. I. Dukhota, M. V. Kindrachuk, N. O. Naumenko, L. R. Kindrachuk, V. V. Kharchenko. // Problemi tertya ta znoshuvannya. – 2014. - №4 (65). – S. 19 – 28.
8. Revkov G. A. Meropriyatiya po ustraneniyu fretting-korrozii / G. A. Revkov // Novoe v tyazholom mashinostroenii. – 1957. - №1. – S. 15- 21.
9. Nekotorye printsipy razrabotki frettingostoikoi smazki / V.I. Pokhmurskii, Yu. L. Belonoga, Ya. N. Sirak, N. V. German // Fiziko-khimichna mekhanika materialiv. – 1985. – Vyp. 21, №6. – S. 85 – 86.
10. Malenkov M. I. Konstruktsionnye i smazochnye materialy kosmicheskikh mekhanizmov / M. I. Malenkov, S. I. Karatushin, V. M. Tarasov. – Sankt-Peterburg, Balt. gos.tekhn.un-t, 2007. – 54 s.
11. Shevelya V. V. Razvitie fretting-korrozii v usloviyakh granichnogo treniya / V. V. Shevelya, V. A. Kirilkov, V. P. Fedyna // Prblemy tribologii. – 2007. - №2. – S. 102 – 108.
12. Datsishin O. P. Rozrakhunkovi modeli mekhaniki ruinovannya dlya otsinyuvannya dovgovichnosti tverdikh til pri ikh tsiklichnii kontaknii vzaemodii: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya dok. tekhn. nauk: spets. 01.02.04. – mekhanika deformovanogo tverdogo tila / O. P. Datsishin. – L'viv, 2007. – 42 s.
13. Kudryavtsev I.V. Vliyanie poverkhnostnykh obrabotok na vozniknovenie i razvitie treshchin v titanovom splave / I.V. Kudryavtsev.// Trudy TsNIITMASH, Kn.112.-M: Mashinostroeniya, 1976. –S.236–247.
14. Shevelya V. V. Tribokhimiya i reologiya iznosostoikosti / V. V. Shevelya, V. P. Oleksandrenko. - Khmel'nits'kii: KhNU, 2006. – 278 s.
15. Shevelya V. V. Vliyanie poverkhnosnogo plasticheskogo deformirovaniya na fretting-ustalostnuyu prochnost' metallov / V. V. Shevelya, G. S. Kalda, V. P. Oleksandrenko // Dinamika, mitsnist' i nadiinist' sil's'kogospodars'kikh mashin: pid. red. V. T. Troshchenko. – Ternopil': TDTU, 2004. – S. 99-103.

16. Serebryakov V. I. Povyshenie dolgovechnosti pri fretting-ustalosti tekhnologicheskimi metodami / V. I. Serebryakov // Poverkhnostnyy sloi, magnitnye i ekspluatatsionnye svoystva detalei mashin. – M.: - 1990. – S. 81.
17. Izotov E. D. Povyshenie dolgovechnosti detalei nesushchei sistemy vertoletov, rabotayushchikh v usloviyakh fretting-korrozii, metodom diffuzionnogo khromirovaniya / E. D. Izotov, G. N. Dubinin // Perspektivnye metody remonta aviatsionnoi tekhniki: Mezhdvuz. sbornik nauch. trudov. – K.: KIIGA, 1981. – S. 127-135.
18. Tekhnologicheskaya instruktsiya po vosstanovleniyu detalei AT / A.Ya. Alyab'ev, V.A. Venidiktov, G.A. Gel'gar i dr. – M.: GosNIIGA, 1982. – 32s.
19. Trofimov V.A. Metody uluchsheni podviznykh uzlov shassi? Vypolnennykh iz titanovykh splavov / V. A. Trofimov // Avsacionnye – Kosmicheskaya tekhnika I tehnologiya. – 2001. – 24. – S. 143 – 150.
20. Tribotekhnicheskiy harakteristiki detonatsionnykh pokrytij na titanovom splave VT-22 / M. V. Kindrachuk, Ye. A. Kulgavyi, A. L. Shevchenko, A. P. Danilov // Problemy tert'ya ta znoshuvannya. – 2009. – 51. – S. 112 – 123.
21. Povyshenie frettingostoikosti detalei gruzovykh avtomobilei // Dolgovechnost' trushchikhsya detalei mashin; pod. red. D. N. Garkunova. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 264 s.
22. The effects of molybdenum intermediate layers on the frictional properties of silver films for vacuum use / T. Nishioka, K. Sekine, K. Matsumoto etc. // International tribology conference. Yokohama (Synopsis). – Japanese Society of Tribologist. – 1995. – P. 161.
23. Friction and wear of electroplated silver-carbon composite / H. Shinohara, K. Taguchi, S. Tanata, K. Kuboyama // International tribology conference. Yokohama (Synopsis). – Japanese Society of Tribologist. – 1995. – P. 161.
24. Tverdosmazochnye pokrytiya dlya mashin i mekhanizmov, rabotayushchikh v eksremal'nykh usloviyakh / E. P. Koval'ov, M. B. Ignat'ev, A. P. Semenov i dr. // Trenie i iznos. – 2004. – Tom 25, № 3. – S. 316 – 336.
25. Krylov K. A. Dolgovechnost' uzlov treniya samoletov / K. A. Krylov, M. E. Khaimnzon. – M.: Transport, 1976. – 183 s.
26. Krylov K. A. Povyshenie iznosostoikosti detalei samoletov / K. A. Krylov. – Iz-vo «Transport», 1974. – 144 s.
27. Muravkin O.N. Zashchita metallicheskih poverkhnostei ot fretting – korrozii plastmassovymi plenkami / O.N. Muravkin, A.V. Ryabchenkov, P.N. Panafidin. – m.:TsNIITMASH, 1959.-247s.
28. Ivanova V.S. Vliyaniye nairitovykh pokrytii na tsiklicheskiy prochnost'obraztsov i detalei, podvergayushchikhsya deistviyu fretting – korrozii /V.S. Ivanova, M.G. Veitsman S.L. – V kn.: Ustalost' metallov i splavov- m.:izd-vo “Nauki”, 1971/-c/103-108.
29. Evdokimov Yu.A. Frettingostoikost' kompozitsionnykh ftorplastmassovykh pokrytii /Yu.A. Evdokimov, K.K. Moroz, T.V. Sukholentseva //Trenie i iznos. – 1981.-T. 2, №4.- S.610-616.
30. Primeneniye ftorplastmassovogo elektroforeticheskogo pokrytyadlya zashchity titanovogo splava VT3-1 v usloviyakh fretting-korrozii / M.G. Veitsman, L.N. Koltunova, I.S. Kogan i dr. // Zhurnal prikladnoi khimii.- 1980. –T III, №5.-S.1013-1016.
31. Grigor'yants A.G. Issledovanie uprochneniya titanovogo splava OT -4 s pomoshch'yu lazernogo izlucheniya / A.G.Grigor'yants. // Poverkhnostnye metody uprochneniya metallov i splavov v mashinostroenii. – M. i “Znanie”, 1985 C.22-24.
32. Khetch L. Metody poverkhnostnoi obrabotki vysokoprochnykh splavov s tsel'yu povysheniya ikh treshchinostoikosti : sostoyaniye i perspektivy /L. Khetch, B.Ram. V kn. Obrabotka poverkhnosti i nadezhnost' materialov: Per. s ang./ Pod red. Dzh. Burke, F. Vaisa. – Mir, 1984. – S. 121-148.
33. Issledovanie vliyaniya lazernogo uprochneniya na iznosostoikost' titanovogo splava OT 4 – 0 /N.L. Golego,V.P. Onoprienko, A.F. Romanchuk, O.P. Mel'nichenko // Trenie i iznos. – 1988. – Tom 9, № 4. – S. 729-733.

34. Mel'nik V.V. Issledovanie iznosostoikosti v usloviyakh fretting – korrozii konstruksionnykh materialov pri lazernom obluchenii: avtoref. dis. na soiskanie uchen. stepeni kand.tekhn.nauk: spets. 05.02.04- trenie i iznos / V.V. Mel'nik. – K.: KIIGA, 1985.-22s.
35. Shalapko Yu.I. Lazernaya obrabotka elektroiskrovyykh pokrytii dlya obespechenno frettigestoikosti / Yu.I. Shalapko, V.G. Kaplun, V.V. Gonchar // Vesnik dvigatelestroeniya. 2002. -№ 4. S. 17-25.
36. Fiziko-khimicheskaya model' formirovaniya iznostoikikh pokrytii na alyuminievykh splavakh pri elektroiskrovom massoperenose kompozitsionnoi keramiki / D.V. Yurechko, I.A. Podchernyaeva, A.D. Panasyuk, O.N. Grigor'ev // Poroshkovaya metallurgiya. – 2006. №1/2. S. 51-58.
37. Osobennosti formirovaniya i tribologicheskogo povedeniya iznosostoikikh ZrB<sub>2</sub> – soderzhashchikh elektroiskrovyykh i lazerno-elektroiskrovyykh pokrytii na titanovom splave. / I. A. Podchernyaeva, V. M. Panashenko, A. I. Dukhota, A. D. Panasyuk, // Problemi tribologii. – 2012. - №4. – S. 53 – 57.
38. Strukturno-fazovye prevrashcheniya na poverkhnosti lazerno- elektroiskrovogo pokrytiya v usloviyakh fretting-korrozii na vozduke / V. M. Panashenko, I. A. Podchernyaeva, A. I. Dukhota, A. D. Panasyuk. // Poroshkovaya metallurgiya. – 2012. - № 1/2. – S. 142 – 152. [Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2012, 51 (1-2), C. 112-120].
39. Il'inskii I.I. Optimal'nye i granichnye usloviya frettingo-stoikosti detonatsionnykh pokrytii na osnove karbida vol'frama / I.I. Il'inskii, A.I. Dukhota, V.V. Sergeev //Trenie i iznos, 1981. – T.II - № 6. – S. 850-855.
40. Dukhota O. I. Znosostiikist' kompozitsiinykh gazotermichnykh pokrytii za umov fretting-koroziinogo znoshuvannya / O. I. Dukhota, N. O. Naumenko, L. V. Bogach // Materiali dlya roboti v ekstremal'nykh umovakh : metriali V Mizhnar. nauk. konf., 3 – 5 grudnya 2015 r. – K.: NTUU “KPI”. – 2015. – S. 148 – 150.
41. Optimizatsiya tekhnologii naneseniya pokrytii po kriteriyam prochnosti i iznosostoikosti / B.A.Lyashenko, E.K.Solovykh, V.I. Mirnenko i dr.: pod. red. V.V. Kharchenko. – K.: In – t probl. prochnosti im. G.S. Pisarenko NAN Ukrainy, 2010. – 193s.
42. Svoistva zashchitnykh Ni-Cr pokrytii posle dupleksnoi obrabotki/ A. D. Pogrebnyak, S. N. Bratushka, N. K. Erdybaeva i dr. // FKhOM. – 2007. - № 6. – S. 37-47.
43. Formuvannya pokrytii tribotekhnichnogo pryznachennya kombinovanoyu lazerno-khimiko-termichnoyu obrobkoyu / A. O. Kornienko, M. S. Yakh'ya, N. V. Ishchuk ta insh. // Prblemi tertya ta znoshuvannya : nauk.-tekhn. zb. – K. : NAU, 2008. – Vip. 49. – T. 2. – S. 61-65.
44. Diskretne zmishchennya ta znosostiikist' tsilindrichnykh tribosistem kovzannya/ O.V. Dikha, R.V. Sorokatii, S.F. Pasons'kii, M.O. Dikha- Khmel'nits'kii.-KhNU, 2016.-197s.