



Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Духоти Олександра Івановича

«Науково-технічні основи підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем за умов їх фретинг-контактної взаємодії», яку представлено на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

Актуальність теми та її зв'язок з державними науковими програмами.

Вирішення проблеми розробки науково-обґрунтованих основ підвищення зносостійкості деталей трибоз'єднань авіаційної техніки, які працюють за умов фретинг-корозії (характеризується високими рівнями вібрацій, контактних навантажень, циклічно змінюваних температур) завжди буде на часі і тому потребує системних досліджень, що підпорядковуються меті забезпечення довговічності трибовузлів шляхом створення методів формування робочих поверхонь і матеріалів з необхідними властивостями. Складність вирішення названої проблеми значною мірою зумовлена тим, що традиційні підходи теорій тертя та зношування в умовах фретингу не завжди дають прогнозований результат. Тому тема роботи є безумовно актуальною.

Актуальність теми дисертації та вибраний напрямок досліджень тісно пов'язаний з науково-дослідними роботами: № 386-ДБ07 (0107U0022739), № 718-ДБ11 (0111U01639), № 947-ДБ14 (0114U001604), № 008-ДБ92 (0193U0017660), № 620ГА-95 (0195U0028595), в яких здобувач був співвиконавцем та відповідальним виконавцем.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг складає 402 сторінки. Обсяг основного тексту складає 284 сторінки. Робота ілюстрована 34 таблицями та 122 рисунками. Список використаних джерел із 355 найменувань займає 37 сторінок. Додатки містять 8 сторінок.

Загальна характеристика дисертаційної роботи.

У вступі відображено основні, передбачені нормативними положеннями ДАК МОН України дані, які характеризують роботу, а саме: актуальність теми, зв'язок

роботи з науковими програмами, темами, мету та завдання досліджень, наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, відомості про кількість публікацій.

У першому розділі наведені результати аналізу літературних джерел за темою дисертації, зокрема пов'язаних з дослідженнями стану проблеми зношування металів при фретинг-корозії стосовно деталей авіаційних трибомеханічних систем, конструктивно-технологічних заходів боротьби з фретинг-корозією, прогресивних методів інженерії робочих поверхонь та вибору напрямків досліджень. За результатами цього розділу сформульовано наукову проблему, яка вирішувалась в дисертації, визначено її мету, а також поставлені завдання, що розв'язувалися для досягнення цієї мети.

Недоліками розділу є:

- в деяких підрозділах аналітичного обзору джерел інформації не наводиться відношення автора до поданого матеріалу (п/р 1.2, частково п/р 1.5);
- відсутність аналізу інформації щодо впливу конструктивних параметрів дискретних ділянок на триботехнічні та фізико-механічні властивості металів.

У другому розділі описано методики і обладнання для випробувань зносостійкості матеріалів, які експлуатуються за умов фретингу та динамічного контактного навантаження. Розглянуто методику і устаткування з випробувань на втому, сучасні металофізичні методи досліджень для вивчення структурних перетворень в поверхневих шарах досліджуваних сталей, сплавів і матеріалів технологічних покриттів, фазового складу продуктів зношування і вторинних структур, що утворювались на поверхнях тертя в процесі фретинг-корозії. Наведено методику багатофакторного планування експериментів, яку реалізовано за допомогою комп'ютерних програм «планування, регресія та аналіз моделей».

Як зауваження до розділу слід віднести наступне:

- на с. 105 сказано, що при динамічному навантаженні на експериментальній установці для динамічного контактного навантаження, можлива реалізація режимів випробувань:
 - циклічне відносне проковзування зразків (динамічний фретинг). Не зрозуміло в чому посягає тоді різниця між динамічним фретингом (в інтерпретації автора) і класичним визначенням фретингу: «фретинг – це коливальний відносний рух який може бути між контактуючими поверхнями. Відносний рух зазвичай називають проковзуванням»;

- співударяння зразків з циклічним відносним проковзуванням (ударний фретинг). Такому режиму випробувань, на наш погляд, більш точно відповідає термін «динамічне контактне навантаження»;
- в роботі, для оцінки зносостійкості зразків не вдало вибрано ваговий метод, оскільки він не враховує пластичне деформування тертьових поверхонь;
- с. 102 стабілізація частот коливань контртіла здійснюється за допомогою індуктивного датчика. Не зрозуміло яким чином це здійснюється.

У третьому розділі з використанням методики проведених випробувань на зношування при фретинг-корозії досліджено вплив природи матеріалів трибо вузлів та параметрів фретингу на закономірності зношування, умови формування структури поверхневих шарів. Запропоновано аналітичний метод та критерій оцінювання сумісності матеріалів за умов фретингу (згідно з ними для мінімізації зносу необхідно поєднувати матеріали, продукти зношування яких здатні створювати поверхневі структури за механізмом ущільнення та спікання). Визначені закономірності впливу параметрів навантаження на зносостійкість матеріалів при динамічному контактному навантаженні (удар з проковзуванням), встановлено зокрема, що в порівнянні зі зносостійкістю без удару величина зносу зростає у 2,7-6 разів в залежності від матеріалів трибопар. Наведено механізм інтенсифікації зношування при ударі з наступним проковзуванням.

Виходячи з енергетичного балансу трибосистеми, структурно-реологічних механізмів дисипації енергії і релаксації напружень у контакті, сформульовано загальні принципи створення поверхнево-модифікованих шарів, а також покриттів підвищеної зносостійкості.

Зауваження до розділу:

- не зрозуміло яким чином можна визначити об'єм продуктів зношування при експериментальних дослідженнях в умовах підвищених температур, адже продукти зношування спікаються і впресовуються у зношувану поверхню, створюючи вторинні структури;
- рис. 3.16 в залежності $V = f(A)$ не враховується знос від величини амплітуди. Це по суті знос від шляху тертя. Більш коректною залежністю була б залежність інтенсивності зношування, як функція амплітуди: $I_V = \frac{V}{L}$, де V – об'єм зносу, L – шлях тертя, на якому відбувся знос;

- введені автором терміни «випадкова похибка фретинг-зносу», «жорсткість амплітудно-навантажувального режиму фретингу», «параметр K_3 », «критична амплітуда фретингу» потребують більш детального обґрунтування і уточнення.

У четвертому розділі проведені дослідження впливу технологічних параметрів формування дискретно-текстурованих маслоємних поверхонь і параметрів фретингу на процеси контактної їх взаємодії та фретингостійкість. Побудовано регресивні математичні моделі, аналізом яких доведено, що найбільш значущими за впливом на зносостійкість є глибина мікрозаглиблень та щільність їх розташування. Розроблено модель трибопроцесу, яка описує стадійність і механізм руйнування та регенерації граничних мастильних шарів за умов фретингу.

Виконані дослідження фретингостійкості поверхнево-модифікованих шарів, сформованих: електроіскровим легуванням; пошаровим електроіскровим легуванням з перемішуванням м'якої металічної і твердої керамічної фаз; електроіскровим легуванням з додатковою лазерною обробкою; газотермічних покриттів; покриттів напилених детонаційно-газовим методом, визначено вплив параметрів навантаження на зносостійкість газотермічних покриттів, сформованих методами плазмово-дугового, імпульсно-плазмового та високошвидкісного газополуменевого напилення. Запропоновано скінчено-елементну модель трибосистеми з шаром захисного покриття. Аналіз моделі показав, що внаслідок фрикційного нагріву в покритті можуть виникати додаткові напруження співмірні з когезійною міцністю покриття.

До зауважень по розділу слід віднести:

- не визначено вплив і значення сили поверхневого натягнення рідини в механізмі подачі мастильного матеріалу для регенерації граничної мастильної плівки. При яких умовах вона діє?
- розділ перевантажено графіками розподілу еквівалентних напружень. Доцільно їх перенести в додатки.

У п'ятому розділі проведено дослідження, метою яких є розробка наукових принципів створення зносостійких матеріалів гарячого тракту газотурбінних двигунів. На основі аналізу температурних залежностей зношування і характеру руйнування поверхонь контакту, отриманих для різного класу матеріалів розроблено еволюційну модель трибосистеми, яка описує закономірності зміни стану поверхневих шарів матеріалу трибоз'єднань при високотемпературному фретингу в окислювальному середовищі та визначає умови переходу від нормального зношування до

недопустимого руйнування поверхонь тертя. Сформульовано загальні принципи створення зносостійких матеріалів. Виконано дослідження з визначення пористості на зносостійкість при фретингу-корозії спечених порошкових сплавів систем $Co (C;Al;Fe) - Ti$, $Ni (Cr;Al;Fe) - TiC$. Зокрема встановлено, що вміст зміцнюючої карбідної фази TiC для забезпечення високої фретингостійкості знаходиться в області близькій до 50 %. Визначено температурні залежності величини зносу матеріалів та розкрито механізми трибо логічних процесів.

Недоліками розділу є:

- не зрозуміле визначення інтерметалідного γ' -сплаву $TiAl$ (це сплав на основі Ni зі зміцнюючою γ' -фазою $Ni_3 (Al,Ti)$?);
- на с. 258 використовується посилання на джерело [10] про високу зносостійкість складнолегованих евтектичних сплавів ХТН-37, ХТН-61 в умовах високотемпературного фретингу, тобто в умовах відносного тангенціального проковзування без розриву контакту. Таке твердження неправомірне, оскільки для названих сплавів випробування на зносостійкість виконувались за умов динамічного контактного навантаження, тобто при наявності удару з наступним проковзуванням.

Шостий розділ присвячено побудові математичної моделі прогнозування фретингостійкості поверхневих шарів та розробці практичних заходів з підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем. Прогнозування фретингостійкості поверхневих шарів базується на аналізі структури енергетичного балансу трибосистем та енергетичної концепції міцності твердих тіл. З позиції енергетичної моделі трибопроцесу виконано аналітичне дослідження умов утворення часток зносу та розглянута можливість застосування енергетичного підходу до оцінювання зносостійкості поверхневих шарів.

Для забезпечення високої міцності і зносостійкості покриттів із евтектичних сплавів на основі Fe з тугоплавкими фазами втілення запропоновано спосіб модифікування дискретною лазерною обробкою. Пропонується метод підвищення опору контактному-втомному руйнуванню тонкоплівкових покриттів. Наведено технологічні процеси зміцнення гвинтів кульково-гвинтових механізмів, обґрунтовано технологічні заходи з підвищення втомної міцності деталей з ГТН-покриттям, розроблено технологічні рекомендації з відновлення зношених деталей із титанових сплавів.

Зауваження до розділу:

- в роботі представлено ряд технологічних заходів щодо підвищення зносостійкості і відновлення при ремонті деталей авіаційних трибомеханічних систем. Доцільно було б показати, яким чином їх вибір або розробка пов'язуються зі структурно-реологічними принципами створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної зносостійкості.

Висновки дисертаційної роботи ґрунтуються на аналізі отриманих теоретичних та експериментальних результатів досліджень, які наведені в кінці кожного розділу та в узагальненому вигляді в заключній частині дисертації.

Список літературних джерел включає 355 найменувань, що свідчать про глибоке і ґрунтовне опанування дисертантом інформації за обраною тематикою та її аналіз.

У додатках наведено акти реалізації результатів наукових досліджень.

Наукова новизна роботи. У відповідності з метою досліджень дисертантом розроблені наступні наукові положення. Запропоновано загальну концепцію і принципи керування зносостійкістю елементів трибосистем в умовах фретингу, науковою базою яких є енергетична модель трибопроцесів та аналіз структурно-реологічних механізмів дисипації енергії і релаксації напружень у фрикційному контакті. Розкрито закономірності впливу параметрів формування трибосистем з дискретно-текстурованими мастилоємними поверхнями та навантажувальними параметрами при динамічному контактному навантаженні на трибологічні характеристики поверхонь. Експериментально доведено, що поверхні з розвинутою системою мікрозаглиблень дозволяють регенерувати граничні мастильні шари, а це дає змогу значно підвищувати зносостійкість трибосистем в умовах контакту з обмеженою подачею мастильного матеріалу. Установлено закономірності взаємного впливу природи матеріалів контактної пари на формування структури поверхонь та трибологічні характеристики трибосистем. Сформульовано принципи вибору поєднання матеріалів трибопари. Запропоновано аналітичний метод та критерій оцінювання фретинг-корозійної сумісності, який показує у скільки разів об'єм ущільнених продуктів зношування більший або менший сумарного об'ємного зносу елементів трибопари. За результатами моделювання трибосистем, де функції зовнішньої трибоповерхні виконує шар зносостійкого покриття, методом скінчено-елементного аналізу, отримано закономірності розподілу напружень, які виникають від дії фрикційного нагріву. Доведено, що ці додаткові напруження можуть перевищувати

когезійну міцність покриття. Розроблено модель трибосистеми, яка встановлює закономірності зміни стану трибосистеми при високотемпературному фретингу і визначає умови переходу від нормального зношування до недопустимого когезійного руйнування тертьових поверхонь. Запропоновано наукові основи створення матеріалів для роботи в умовах фретингу при високих температурах (до 1000°C).

Практичне значення одержаних результатів полягає в підвищенні зносостійкості деталей авіаційних трибосистем на етапах їх проектування, експлуатації та ремонту шляхом використання нових наукових положень, які є науково-методологічною базою створення і оцінки триботехнічних характеристик контактних поверхонь, мастильних матеріалів та довговічності зношувального шару за умов фретинг-корозії. Розроблено та запропоновано для практичного використання низку технологічних методів, спрямованих на підвищення стійкості фретинг-корозійного зношування робочих поверхонь деталей. Зокрема: спосіб модифікування дискретною лазерною обробкою ГТН-покриттів; спосіб формування ГТН-покриттів з дискретно-фрагментованим шаром; спосіб підвищення опору контактно-втомному руйнуванню твердих тонкоплівкових покриттів; спосіб дискретної лазерної обробки азотованої сталі; технологічні рекомендації з вибору способу та матеріалу для відновлення зношених деталей з титанових сплавів.

Достовірність результатів та висновків. Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані у роботі, обґрунтовані достатньо переконливо та повно. Достовірність та обґрунтованість одержаних у дисертації наукових положень підтверджуються коректною постановкою наукової проблеми, використанням апробованого математичного апарату, збігом результатів теоретичних досліджень з результатами проведених експериментальних досліджень, упровадженням технологій у виробництво.

В роботі застосовано комплексний підхід до наукових досліджень, який забезпечив всебічне і глибоке вивчення та аналіз процесів, які відбуваються на поверхнях тертя за умов фретингу. Триботехнічні дослідження проводились за методикою, визначеного стандартом «Метод випробування матеріалів на зношування при фретингу і фретинг-корозії». Якісні зміни поверхонь тертя, мікроструктуру, склад і властивості досліджували методами оптичної та електронної растрової мікроскопії,

трибоспектральним методом, методами мікрорентгеноспектрального та рентгено-фазового аналізів, Оже-спектроскопії з використанням сучасного вітчизняного та закордонного устаткування.

Повнота викладення основних результатів дисертації у наукових фахових виданнях. Основні результати дисертації Духоти О.І. опубліковані у 56 наукових працях, у тому числі: 26 праць у фахових виданнях переліку МОН України; 8 наукових праць в іноземних спеціалізованих виданнях і виданнях України, які внесені до реєстру міжнародних наукометричних баз даних; 14 матеріалів та тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах; 8 патентів України.

Загальні зауваження по змісту та оформлення дисертації і автореферату.

1. У першому розділі слід було б приділити увагу інформації щодо впливу конструктивних параметрів маслоємних мікрозаглиблень на фізико-механічні властивості металів.

2. Якість рисунків, особливо надписів низька (рис. 1, 7, 10, 21 автореферату).

3. В роботі присутні друкарські помилки.

Загальний висновок до дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Духоти О.І. «Науково-технічні основи підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем за умов їх фретинг-контактної взаємодії» є закінченою науковою працею, в якій отримані нові, науково-обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що забезпечують підвищення зносостійкості деталей авіаційних систем. Напрямок проведеного дослідження відповідає паспорту спеціальності 05.02.04 –тертя та зношування в машинах. Аналіз дисертаційної роботи показав, що в ній вирішено важливу наукову проблему – розробки науково обґрунтованих підходів до забезпечення високого рівня довговічності деталей авіаційної техніки шляхом створення методів формування робочих поверхонь і матеріалів з необхідними наперед заданими властивостями та методів оцінювання і прогнозування сумісності матеріалів та їх зносостійкості в умовах фретинг-корозії. Викладене вище дозволяє стверджувати, що дисертація Духоти О.І. є закінченою науково-дослідною роботою, яка відповідає вимогам пунктів 9, 10, 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового

співробітника», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567 (зі змінами) до докторських дисертацій за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах, а її автор, Духота Олександр Іванович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук.

Доктор технічних наук, професор
директор машинобудівного інституту
Запорізького національного технічного
університету



Л.І. Івченко

Підпис доктора технічних наук,
професора Івченко Л.І.
засвідчую

Вчений секретар Запорізького
національного технічного
канд. соц. наук, доцент



В.В. Кузьмін