

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора **Дихи Олександра Володимировича**, завідувача кафедри зносостійкості і надійності машин Хмельницького національного університету,

на дисертаційну роботу Духоти Олександра Івановича на тему «**Науково-технічні основи підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем за умов їх фретинг-контактної взаємодії**», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

Дисертаційна робота Духоти О.І. є науково-дослідною роботою, яка представлена у вигляді рукопису та містить анотацію, вступ, шість розділів, висновки, список використаних джерел із 355 найменувань та додатки. Дисертаційна робота викладена на 303 сторінках машинописного тексту із 124 рисунками і 32 таблицями. Загальний обсяг роботи 402 сторінки.

Актуальність обраної теми досліджень та зв'язок її з науковими програмами

Технологічні методи, які на сьогодні застосовуються в практиці авіабудування і ремонту авіаційної техніки для підвищення контактної міцності і зносостійкості деталей в багатьох випадках не задовольняють все більш зростаючим вимогам до надійності і ресурсу трибосистем. Складність розробки ефективних методів запобігання фретинг-корозійному зношуванню значною мірою пов'язана з відсутністю достатньо повного розуміння щодо механізмів керування процесами зношування, критеріїв та методів оцінювання та прогнозування працездатності деталей і спряжень з урахуванням різних форм прояву фретинг-корозії і умов фретинг-контактної взаємодії деталей. Отже в роботі вирішується актуальна наукова проблема розробки науково-обґрунтованих підходів до забезпечення потрібного рівня довговічності деталей авіаційних трибосистем за допомогою створення методів формування функціональних поверхонь і матеріалів з необхідними керованими властивостями та методів оцінювання і прогнозування фретинг-корозійної сумісності і зносостійкості елементів трибосистем.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

У вступі сформульована наукова проблема, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні завдання дослідження. Подано



інформацію про методи дослідження, наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів, їх апробацію та особистий внесок здобувача.

У першому розділі проаналізовано процеси, що відбуваються у трибологічних системах і відповідають за втрату їх працездатності. Розглянуто сучасні уявлення щодо природи зовнішнього тертя та механізму зношування металів. Доведено, що не одна із існуючих теорій не дозволяє сформулювати універсальні принципи керування процесами, що визначають зносостійкість деталей вузлів тертя. На основі кількісного аналізу показано, що фретинг-корозія притамана більшості деталей номінально-нерухомих з'єднань та спричиняє виникнення несправностей і відмов авіаційної техніки в процесі експлуатації. На основі сформульованої наукової проблеми визначено мету і завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі подано методика експериментальних досліджень.

У третьому розділі досліджено вплив природи матеріалів контактної пари, геометричних параметрів трибоконтракту і параметрів фретингу на умови формування трибоструктури поверхонь тертя. Виконано експериментальні та аналітичні дослідження з визначення фретинг-корозійної сумісності матеріалів пар тертя, що дало можливість проаналізувати взаємозв'язок стійкості до фретинг-корозії з властивостями матеріалів пари тертя і властивостями продуктів їх зношування. Для різного класу конструкційних сплавів визначено вплив параметрів фретингу на статистичні характеристики розсіювання величини фретинг-знос. З метою встановлення взаємозв'язку геометричних параметрів трибоконтракту та інтенсивності зношування проведені дослідження залежності величини фретинг-знос від параметра відносного зміщення поверхонь та геометричної схеми контакту. Досліджено вплив динамічних навантажень на процеси фретинг зношування. На основі енергетичного аналізу трибопроцесу та структурно-реологічних механізмів дисипації механічної енергії і релаксації напружень у фрикційному контакті, сформульовано загальні принципи створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної фретингостійкості.

У четвертому розділі досліджений вплив технологій формування захисних покриттів на процеси зношування в трибосистемах за умов фретинг-корозії. Показано, що формування дискретно-текстурованих поверхонь з системою регулярно розташованих мікрозаглиблень є ефективним способом підвищення ресурсу трибосистем, що працюють в умовах обмеженого мащення. Досліджено закономірності впливу структурно-фазового складу і технологічних схем формування на зносостійкість в умовах фретинг-корозії покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. Для функціональних покриттів, сформованих методами газотермічного напилювання, визначено закономірності впливу

складу вихідного матеріалу і технології напилювання на зносостійкість за різних умов фрикційно-контактної взаємодії. Для трибосистем, у яких функції зовнішньої робочої поверхні виконує шар захисного зносостійкого покриття, проведено аналіз розподілу еквівалентних напружень, що виникають у покритті і матеріалі основи від дії температур фрикційного нагріву.

У п'ятому розділі на основі аналізу температурних залежностей параметрів зносу і характеру руйнування поверхонь контакту для різного класу жароміцних сплавів визначено закономірності формування трибоструктури і зносостійкості матеріалів за умов їх високотемпературної фретинг-контактної взаємодії. Розроблено еволюційну модель трибосистеми, яка описує закономірності зміни стану поверхневих шарів матеріалу елементів трибопари при високотемпературному фретингу. Сформульовані загальні принципи забезпечення високотемпературної зносостійкості матеріалів. Визначено напрямки створення стійких до зношування високотемпературних матеріалів з робочою температурою до 1273К. З метою прогнозування процесів формування складу захисних поверхневих структур проведено аналіз діаграм стану елементів досліджуваних систем та термодинамічний аналіз реакцій їх високотемпературної взаємодії з киснем. Виконано дослідження з визначення впливу пористості на зносостійкість при фретинг-корозії спечених порошкових матрично-наповнених сплавів систем Co (Cr;Al;Fe)-Ti, Ni(Cr;Al;Fe)-TiC.

У шостому розділі представлений аналітично-розрахунковий метод оцінювання фретингостійкості поверхневих шарів, який ґрунтується на енергетичній моделі трибопроцесу, законах термодинаміки відкритих нерівноважних систем та енергетичній концепції міцності твердих кристалічних тіл. Для реалізації потенційно високої міцності і зносостійкості газотермічних покриттів із евтектичних сплавів на основі заліза з тугоплавкими сполуками втілення, розроблено спосіб поверхневого модифікування дискретною лазерною в режимі термоциклювання і режимі оплавлення. Запропоновано спосіб формування ГТН-покриттів, який включає попереднє нанесення покриття дискретної структури з преривчасто-фрагментованим шаром з наступною інфільтрацією порожнин фторопластово-графітовою водною суспензією. Запропоновано метод підвищення опору контактно-втомному руйнуванню твердих крихких тонкоплівкових покриттів. На основі аналізу механізмів впливу ГТН-покриттів на втомну міцність матеріалу основи теоретично і експериментально обґрунтовано технологічні заходи з підвищення втомно-циклічної міцності деталей з ГТН-покриттям.

Висновки дисертаційної роботи ґрунтуються на аналізі одержаних результатів. Вони наведені в кінці кожного розділу і в узагальненому вигляді в заключній частині дисертації.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна

Висунуті у дисертації наукові положення та отримані висновки і рекомендації у достатній мірі обґрунтовані. Достовірність теоретичних положень дисертації ґрунтується на застосуванні сучасних положень трибології, фізики міцності твердих тіл, термодинаміки незворотних процесів відкритих систем, інженерії поверхні та матеріалознавства, методах фізичного, математичного та чисельного комп'ютерного моделювання

Експериментальні результати ґрунтуються на мікроструктурних і рентгеноспектральних методах дослідження матеріалів, визначення фазового та хімічного складу зміцнених поверхневих шарів, методах випробувань на втомну міцність.

Для обробки результатів досліджень та виконання оптимізації технологічних процесів нанесення покриттів застосовувались методи багатofакторного планування експерименту та математичної статистики.

До найбільш **вагомих нових наукових результатів**, отриманих дисертантом можна віднести наступні.

1. Для трибосистем, втрата працездатності яких пов'язана з розклинюючою дією продуктів зношування, запропоновано критерій та розрахунковий метод оцінювання фретинг-корозійної сумісності матеріалів.

2. Встановлено, що незалежно від природи матеріалу і амплітудно-силового режиму фретингу розподіл випадкових похибок величини фретинг-зносів підпорядковується закону нормального розподілу і задовільно описується кривою Гауса. Визначено взаємозв'язок інтенсивності зношування матеріалів від геометричних розмірів та схеми контакту елементів трибопари.

3. Визначено закономірності зношування матеріалів при поєднанні фретингу з динамічним контактним навантаженням в режимі удару з проковзуванням, що обумовлює більш інтенсивне накопичення в матеріалі дефектів структури і пришвидшує розвиток процесу зношування за механізмом втомного руйнування.

4. Визначено та теоретично обґрунтовано загальні принципи керування зносостійкістю елементів динамічно навантажених трибомеханічних систем, які ґрунтуються на енергетичній моделі трибологічних процесів та структурно-реологічних механізмах дисипації енергії у фрикційному контакті.

5. Досліджено вплив технологічних параметрів і характеристик фретингу на зносостійкість трибосистем з дискретно-текстурованими мастилоємними поверхнями, отримано математичні моделі, що описують залежності величини зносу елементів трибопари від технологічних параметрів поверхні та амплітудних параметрів фретингу за умов обмеженого мащення.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

Результати дисертаційної роботи використані при розробці технологічних рекомендацій по відновленню і підвищенню зносостійкості робочих лопаток турбіни ГТД. Розроблені технологічні рекомендації по відновленню деталей крила літаків, розширенню ремонтних допусків на знос циліндричних трибосистем рам гелікоптерів. Окреслені умови по впровадженню сучасних високоефективних технологій та матеріалів триботехнічного призначення для вирішення практичних завдань підвищення надійності і довговічності об'єктів авіаційної техніки.

Розроблені рекомендації щодо підвищення експлуатаційних властивостей і довговічності деталей трибомеханічних систем пройшли апробацію і використані на підприємствах авіапромислового комплексу, що підтверджено актами виробничих випробувань.

Повнота викладу основних результатів дисертації

За темою дисертаційної роботи надруковано 56 наукових праць, у тому числі 8 статей у журналах індексованих у міжнародній наукометричній базі Scopus. 26 статей у фахових виданнях переліку МОН України, восьми патентах та авторських свідоцтвах. Результати роботи доповідалися і пройшли апробацію на 13 наукових конференціях. Всі вимоги положень ДАК МОН України щодо наукових публікацій витримано.

Зауваження по роботі.

1. Автором запропонований критерій сумісності матеріалів при фретингу - коефіцієнт зміни об'єму матеріалу в трибоконткті з урахуванням збільшення утвореного при зносі об'єму оксидів через коефіцієнт Піллінга-Бедфорда та зменшення об'єму продуктів зносу по аналогії з механізмом ущільнення порошкових матеріалів. Але коефіцієнт ущільнення при цьому для всіх матеріалів приймається однаковим 0,66, тоді втрачається сенс його використання для порівняння сумісності різних матеріалів.

2. У постановці задачі дослідження статистичних характеристик фретинг зношування вказується, що недоліком відомих досліджень є відсутність опису розподілу зносу іншими законами крім нормального, але далі автором для аналізу пропонує знову тільки нормальний закон Гауса.

3. При оцінці впливу геометрії контакту використовується параметр K_z , який визначається відношенням амплітуди фретингу до ширини контакту, що є, очевидно, аналогом загально відомого в триботехніці коефіцієнту перекриття, але тут цей термін не використаний.

4. При модифікації поверхонь тертя мастилоутримувальними лунками використаний призматичний і сферичний профіль лунок, для яких проведені експериментальні випробування і встановлена їх ефективність для зменшення фретинг зносу. Разом з цим не враховано, що такі лунки суттєво зменшують контактну площу і відповідно викликають негативне для фретинг

процесів збільшення контактного тиску. Крім того не розкритий механізм кращої мастильної дії сферичних лунок порівняно з призматичними.

5. Гіпотеза про зменшення коефіцієнту тертя за рахунок продуктів зношування у трибоспряженнях з електроіскровими покриттями потребує додаткового обґрунтування, оскільки за класичними уявленнями продукти зношування у більшості випадків мають абразивний вплив на поверхні тертя.

6. В четвертому розділі запропоновані і досліджені різні сучасні технології нанесення покриттів для зразків, що працюють в умовах фретингу. Не зовсім зрозуміло, як при цьому були використані сформульовані автором в попередньому розділі "концепція та структурно-реологічні принципи створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної фретингостійкості".

7. При розрахунку еквівалентних напружень, що виникають у покритті і матеріалі основи від дії температур фрикційного нагріву за допомогою скінчено-елементної моделі трибосистеми бажано було врахувати також напруження від дії контактних навантажень.

8. В підрозділі 5.3 для умов високотемпературного фретингу обговорюються результати термодинамічного розрахунку взаємодії компонентів систем Co (Cr; Al; Fe) – TiC, Ni (Cr; Al; Fe) – TiC з окиснюючим середовищем. Але які саме термодинамічні характеристики розраховувались та їх числові значення в тексті цього розділу не наведені.

9. В підрозділі 6.1. запропонований аналітично-розрахунковий метод прогнозування фретингостійкості поверхневих шарів металів на основі енергетичної моделі. Але представлений матеріал не доведений до можливості його практичного використання, оскільки не наведені алгоритми визначення використаних у розрахункових залежностях параметрів. Немає прикладів реалізації цього методу для розрахунку фретингостійкості конкретних вузлів тертя.

10. В тексті дисертації зустрічаються незначні описки, граматичні та стилістичні помилки.

Разом з цим, вказані зауваження не знижують загальної позитивної оцінки роботи.

Загальний висновок

Дисертаційна робота «Науково-технічні основи підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем за умов їх фретинг-контактної взаємодії» присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми розробки науково-обґрунтованих підходів до забезпечення довговічності деталей авіаційних трибосистем за допомогою методів формування функціональних поверхонь і матеріалів з необхідними керованими властивостями та прогнозування фретинг-корозійної сумісності і зносостійкості елементів трибосистем.

Дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні і є завершеною щодо поставлених завдань. Її нові теоретичні і практичні результати є актуальними, науково обґрунтованими та достовірними. Оформлення, стиль і мова викладення роботи відповідають встановленим вимогам. Зміст автореферату відповідає основним положенням і змісту дисертації.

У цілому робота відповідає вимогам, що висуваються до докторських дисертацій згідно з пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор Духота Олександр Іванович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 - тертя та зношування в машинах.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри зносостійкості
і надійності машин Хмельницького
національного університету

Духа О.В.

Підпис завідувача кафедри зносостійкості машин, д.т.н. Духи О.В.
засвідчую:

Учений секретар Хмельницького національного університету,

к.т.н., доцент



Тєбляшкіна Л.І.

27 лютого 2019р.