УДК 621.785.539

О. І. ДУХОТА, Н. О. НАУМЕНКО, В. І. КОСТЮЧИК

Національний авіаційний університет, Україна

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ МАТЕРІАЛІВ ТРИБОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ КОНТАКТНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Виконано дослідження впливу параметрів контактної взаємодії на зносостійкість ряда конструкційних сплавів і газотермічних покриттів при динамічному контактному навантаженні. Показано, що поєднання навантажень від динамічної складової і фретинга в режимі удара з проковзуванням суттєво пришвидчує процес зношування. Розглянуто механізм інтенсифікації зношування в режимі удара з проковзуванням.

Ключові слова: *контактні напруження, ударний фретинг, динамічне навантаження, зносостійкість поверхонь.*

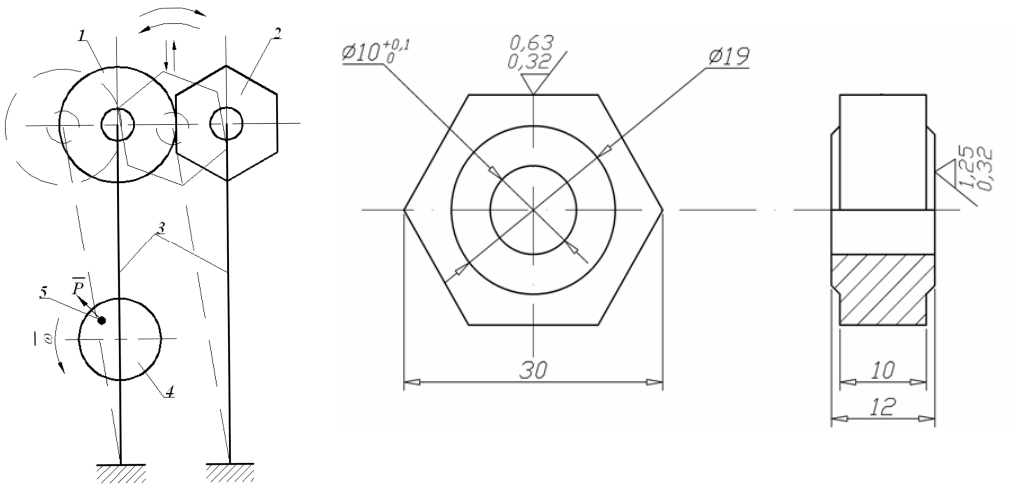
Постановка проблеми. Основне завдання яке перед собою ставить сучасне машинобудування полягає у збільшенні терміну служби деталей машин і механізмів. Процеси тертя вузлів авіаційних конструкцій пов'язані з динамічним характером діючих контактних навантажень. У зв'язку з цим важливою є необхідність визначення впливу параметрів контактної взаємодії на зносостійкість матеріалів при динамічному контактному навантаженні, а також встановлення для цих умов загальних закономірностей та принципів формування зносостійких поверхонь.

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем. Конструкція сучасних повітряних суден (ПС) і авіаційних двигунів (АД) являє собою складну багатофункціональну систему взаємопов'язаних конструктивних елементів, вузлів і механізмів з великою кількістю рухомих і номінально-нерухомих вузлів і з'єднань, деталі яких під час експлуатації піддаються тертю та зношуванню. Так, тільки у комплексі системи шасі літака АН-124 кількість рухомих з'єднань перевищує 390 [1], а загальна кількість вузлів тертя широкофюзеляжного літака з урахуванням потенційної можливості малих відносних переміщень у всіх з'єднаннях може визначатись 6–7 значним числом. Не дивлячись на значний прогрес і досягнення в технології літако- і авіадвигунобудуванні, знос і пошкодження деталей в вузлах тертя продовжує залишатись одним із основних факторів, що знижують експлуатаційну надійність і обмежують ресурс АТ. Так, згідно останніх даних, тільки по гарячій частині авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) знос деталей складає до 46 % у загальній кількості дефектів [2], а в цілому з недостатньою зносостійкістю деталей пов'язано 30…40 % відмов та дострокового припинення експлуатації ПС [3]. Різноманітність поєднання матеріалів в парах тертя, різний характер і рівень діючих контактних і об'ємних навантажень, температур та інших умов роботи деталей різних вузлів, систем і агрегатів ПС і АД приводять до різних процесів, які відбуваються, як на поверхні, так і в об'ємі деталей і створюють різні за величиною і характером пошкодження та дефекти. При визначенні стратегії і напрямків досліджень, спрямованих на пошук ефективних способів забезпечення працездатності деталей вузлів тертя авіаційних трибосистем, розробку фізичних принципів і методів підвищення їх зносостійкості та відновлення при ремонті необхідно мати інформацію про масштаби прояву дефектів, умови і причини виник-

нення цих дефектів. Значна частина деталей пошкоджується внаслідок динамічної контактної взаємодії при віброконтактних навантаженнях.

Мета досліджень. Визначення загальних закономірностей та принципів формування зносостійких поверхонь в умовах контактної взаємодії матеріалів при динамічному навантаженні в залежності від схеми навантаження.

Методика досліджень. Для випробувань матеріалів на зношування при динамічному навантаженні використовувалась установка, кінематична схема якої представлена на рис. 1.



а *б*

Рис. 1. Кінематична схема установки (*а*) і зразок (*б*) для випробувань матеріалів на зношування при динамічному контактному навантаженні

На установці реалізуються схеми контакт зразків «площина-площина», «циліндр-площина», «куля-площина». Зразок випробуваного матеріалу *2* і матеріалу контрзразка *1* установлюються на відповідних консольно закріплених призмах *3*, виконаних у вигляді ресор із набору пружинних сталевих пластин. Статичне навантаження у контакті (величина попереднього натягу) задається стисненням ресори зразка при його контакті із контрзразком за допомогою тензодатчиків, наклеєних на ресору контрзразка. На ресорі контрзразка закріплено диск 4 з неврівноваженою масою *5*. Диску задається обертовий рух від електродвигуна з регульованою частотою обертання. При обертанні диска з закріпленою на ньому неврівноваженою масою виникає відцентрова сила:

$$P = m\omega^2 R, \qquad (1)$$

де m – неврівноважена маса; ω – кутова швидкість обертання диска; R – обертання неврівноваженої маси.

Вертикальна складова відцентрової сили урівноважується жорстко закріпленою пружиною, а горизонтальна складова збуджує коливання пружини за рахунок чого створюється динамічне контактне навантаження зразків з перемінним нормальним зусиллям у контакті.

В залежності від стану спряження зразка і контрзразка в статичному положенні (натяг, дотик без статичного навантаження, зазор), величини збуджуючої сили при динамічному навантаженні та способу закріплення контрзразка можлива реалізація наступних режимів випробувань:

– циклічне відносне проковзування зразків (динамічний фретинг);
– співударяння зразків(удар без проковзування);
– співударяння зразків з циклічним відносним проковзуванням(ударний фретинг).

Рівень динамічного навантаження регулюється зміною кутової швидкості обертання диска і радіусом обертання неврівноваженої маси.

Результати досліджень та їх аналіз. Проводились порівняльні випробування двох груп матеріалів:

– конструкційних сплавів ВТ22 і 40ХН2МА (HRC 42);
– газотермічних плазмових покриттів із порошкових матеріалів КХН (механічна суміш 30 мас.%Ni+ 70мас.%Cr_2C_3), ПН55Т45 (нікелід титана – 45 мас.%Ti + 55 мас. %Ni).

В першій серії дослідів проводилось дослідження зносостійкості конструкційних сплавів ВТ22 і 40ХН2МА в режимах динамічного фретингу (без розриву контакту), ударного та ударного з коченням фретингу. В якості контрзразків використовувались ролики із шарико-підшипникової сталі 95Х18Ш (50..55 HRC). Для виділення долі ударної складової у загальному зносі при ударі з проковзуванням випробування проводили з жорстко закріпленим та з вільно закріпленим роликом контрзразка (удар з коченням). При проведенні експериментів без розриву контакту зразки установлювались з попереднім натягом із зусиллям 30 Н. Сумарне зусилля від статичного і динамічного навантаження складало 60 Н. В експериментах з розривом контакту зразки установлювались без натягу, динамічна складова навантаження установлювалась рівною 60 Н. Прийнята у першій серії дослідів база випробувань складала $N = 1{,}2 \cdot 10^5$ циклів.

В другій серії дослідів випробовувались зразки із сплаву ВТ22 у вихідному стані та з нанесеним на робочу поверхню газотермічним покриттями КХН; ПН55Т45. Покриття наносились методом імпульсно-плазменого напилювання. Товщина шару покриття після обробки шліфуванням складала 200..300 мкм. Умови експерименту моделювали роботу точкового контакту при спряженні «кулька-площина» з розривом контакту в режимі ударного фретингу. В якості контрзразків використовувались шарикопідшипникові кульки із сталі ШХ15 (55..56 HRC) діаметром 10 мм. Зусилля від ударного навантаження складало 150 Н, база випробувань $N = 5 \cdot 10^5$ цикл. Критерієм оцінки зносостійкості матеріалів була величина середнього лінійного зносу, визначена за результатами замірів в місцях максимальної виробітки зразків. Отримані результати випробувань для першої і другої серії дослідів представлені діаграмами відповідно на рис. 2 і рис. 3.

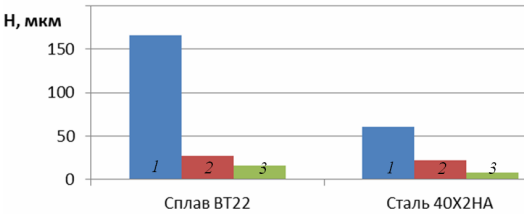


Рис. 2. Діаграма величин лінійного знос у при випробуванні в умовах динамічного контактного навантаження: *1* – ударний фретинг; *2* – динамічний фретинг; *3* – удар з коченням

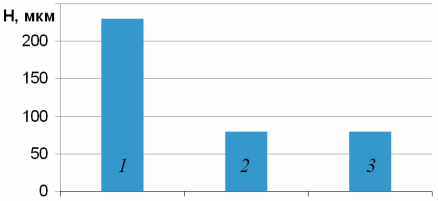


Рис. 3. Діаграма величини лінійного зносу зразків при випробуванні в умовах динамічного контактного навантаження в режимі удару з проковзуванням: *1* – ВТ22; *2* – плазмове покриття КХН; *3* – плазмове покриття ПН55Т45

Аналіз величин зносу, отриманих за результатами випробувань в першій серії дослідів, показує, що найбільш інтенсивне зношування матеріалів відбувається в режимі ударного фретингу при ударі з проковзуванням. У порівнянні з режимом динамічного фретингу без удару величина зносу титанового сплаву ВТ22 і сталі 40Х2НМА зростає відповідно у 6 і 2,7 рази. При цьому, як у режимі ударного фретингу, так і у режимі динамічного фретингу, більшу зносостійкість проявляє сталь 40ХН2МА. Доля ударної складової, яка може бути оцінена як різниця зносу зразків при динамічному фретингу і при ударі з коченням, для сплаву ВТ22 і сталі 40ХН2МА складає відповідно 10 % і 13,5 %. Отримані результати свідчать про те, що удар при динамічному контактному навантаженні вносить суттєвий вклад в розвиток процесів зношування, а інтенсивність зношування при цьому, за інших однакових умов контактної взаємодії елементів трибосистеми, залежить від природи і властивостей матеріалу. Механізм інтенсифікації зношування при ударному навантаженні можна розглядати як результат утворення в зонах контакту при ударі з наступним проковзуванням складного напружено-деформованого стану [2] та імпульсного характеру діючих навантажень, в результаті яких в поверхневих шарах матеріалу розповсюджуються затухаючі ударні хвилі деформації. У найпростішому випадку ударну хвилю можна розглядати як плоску хвилю, яка складається із повздовжньої, що викликає деформацію розтягнення-стиснення, і поперечну, що викликає деформацію зсуву [4]. Взаємодія ударної хвилі з хвилями деформації від тангенціального ковзання (фретингу) буде обумовлювати більш інтенсивне накопичення в матеріалі дефектів структури, і, як наслідок, пришвидшення процесів втомного руйнування. Таким чином можна сказати, що однією із найбільш важливих характеристик, що визначають зносостійкість матеріалу при ударному фретингу, буде його здатність до розсіювання енергії хвиль деформації і релаксації виникаючих при ударі в зонах контакту локальних екстремальних напружень.

Процеси релаксації контактних напружень і розсіювання механічної енергії при дії динамічних навантажень, в свою чергу, тісно пов’язані з розвитком в металах не пружних явищ, викликаних внутрішнім тертям, [5; 6; 7]. Рівень і механізм внутрішнього тертя матеріалу контролюють найбільш важливі види дисипації механічної енергії. При високому рівні внутрішнього тертя демпфірування коливань, деформаційні і теплові процеси локалізуються в більш тонких поверхневих шарах трибосистеми, що буде зменшувати об’єми метала, охопленого деградаційними процесами руйнування. Тому матеріали з високим рівнем внутрішнього тертя, який визначається декрементом затухання коливань здатен більш ефективно розсіювати енергію і релаксувати локальні екстремальні напруження від динамічних навантажень. З цієї позиції більш низьку зносостійкість сплаву ВТ22 у порівнянні із сталлю 40Х2НМА можна пояснити більш низьким рівнем у титанових сплавів декремента затухання коливань і його малою амплітудною залежністю, ніж у конструкційних сплавів на основі заліза [8]. Додатковим фактором, який впливає на рівень зносостійкості титанового сплаву може бути також менша твердість рівень якої при ударно-циклічній взаємодії визначає характер і глибину розповсюдження деформацій [9].

Результати, отримані у другій серії дослідів також показали, що в умовах ударного динамічного навантаження газотермічні покриття проявляють більш високу зносостійкість у порівнянні з титановим сплавом ВТ22 (рис. 3). При цьому по зносостійкості покриття КХН і ПН55Т45 показали практично співставлені результати.

Умови формування підвищеної зносостійкості газотермічних покриттів можуть бути пов'язані з композиційною будовою і гетерогенністю їх структури. Наявність у складі покриття КХН твердої карбідної фази Cr_2C_3 стримує розвиток пластичної деформації, а відносно м'яка нікелева зв'язуюча фаза забезпечує релаксацію виникаючих напружень. Крім цього, у феромагнітних матеріалах, яким є нікель, суттєвий внесок в релаксацію напружень, і затухання хвиль деформацій вносить наявність магніто-пружного гістерезису, механізм якого пов'язаний із зміщенням границь магнітних доменів під дією на феромагнітний матеріал [10]. У покриття ПН55Т45, вихідний склад якого відповідає області інтерметаліди TiNi, ефективним механізмом погашення коливань і релаксації напружень може бути наявність у нікеліда титана низькотемпературного мартенситного перетворення. Дрібнодисперсна, гетерогенна структура з великою протяжністю між фазових і міжзеренних границь, яка обумовлена специфікою формування газотермічних покриттів також буде сприяти більш інтенсивному розсіюванню підведеної енергії, що позитивно позначається на підвищенні зносостійкості.

Висновки. Встановлено закономірності впливу параметрів контактної взаємодії на зносостійкість матеріалів при динамічному контактному навантаженні. Показано, що поєднання навантажень від динамічної складової і фретингу в режимі удару з проковзуванням суттєво пришвидшує процеси зношування. З позиції теорії розповсюдження ударних хвиль і дисипації механічної енергії в металах розкрито механізм інтенсифікації зношування і визначені умови забезпечення зносостійкості матеріалів трибосистем при динамічному контактному навантаженні.

Список літератури

1. Трофимов В.А. Обеспечение надёжности и долговечности подвижных соединений шасси, выполненных из титановых сплавов / В.А. Трофимов, В.М. Белецкий // Технологические системы. –2002. – №35. – С.56–65.

2. Богуслаев В.А. Контактное взаимодействие сопряженных деталей ГТД / В.А. Богуслаев, Л.И. Ивщенко, А.Я. Качан, В.Ф. Мозговой. – Запорожье.: изд-во ОАО «Мотор Сич», 2009. – 328 с.

3. Кудрін А.П. Основні види зношування деталей вузлів тертя сучасної авіаційної техніки / А. П. Кудрін, О. В. Мельник // Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб-к.: НАУ, 2007. – Вип. 48. – С. 24–38.

4. Артемьев В.А. Формирование, затухание и взаимодействие ударного импульса конечной протяженности со свободной поверхностью упругопластического тела / В.А. Артемьев, В.А. Басков, Е.В. Палканов, Л.Е. Чернов // Весник ВГУ серия: Физика, математика. – 2004. – №2. – С. 103–116.

5. Голего Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н.Л. Голего, А.Я. Алябъев, В.В. Шевеля – К.: Техніка, 1974. – 272с.

6. Шевеля В.В., Олександренко В.П. Трибохимия и реология износостойкости – Хмельницкий: ХНУ, 2006 – 278 с.

7. Шевеля В.В. О роли неупругих явлений при трении твердых тел/ В.В. Шевеля, В.О. Орлович, В.П. Олександренко // Трение и износ. – 2005. – №4. – С. 367–374.

8. Писаренко Г.С. Вибропоглощающие свойства конструкционных сплавов: Справочник// Г.С. Писарено, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – К.: Наук. думка, 1971. – 375 с.

9. Колесников Ю.В. Механика контактного разрушения / Ю. В. Колесников, Ю. М. Морозов. – М.: Наука, 1989. – 224 с.

10. Кекало И.Б. Магнитоупругие явления / И. Б. Кекало // Металловедение и термообработка. – М., 1973. – Т7. – С.5–88.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2013

O. I. DUKHOTA, N. O. NAUMENKO, V. I. KOSTYUCHYK

WEAR RESISTANCE OF MATERIALS TRYBOMECHANICAL SYSTEMS FOR DYNAMIC CONTACT LOAD

Was carried out in two research of structural alloys BT22 and 40XH2MA and hot-gas plasma coatings of powder materials КХН, ПН55Т45 to wear resistance under various conditions of dynamic contact load, namely Strike fretting, fretting and dynamic punch from rolling. The diagrams of the linear wear considered mechanism of formation process of wear and wear resistance of these materials under conditions of dynamic loading resistance. Therefore we can say that one of the most important characteristics that determine the wear resistance of the material during shock fretting, will be its ability to dissipation of wave energy and strain relaxation occurring during impact in areas of extreme local contact stresses.

Keywords: contact stresses, hammer fretting, dynamic loading, wear surfaces.

Духота Олександр Іванович – канд. техн. наук, доцент кафедри технології виробництва та відновлення авіаційної техніки, Національного авіаційного університету.

Науменко Ніла Олександрівна – провідний інженер кафедри машинознавства Національного авіаційного університету.

Костючик Віталій Іванович – студент Національного авіаційного університету.