

ІНФОРМАЦІЙНО-ДІАГНОСТИЧНІ СИСТЕМИ

УДК621.891:621.316

В.П. Бабак, чл.-кор. НАН України
С.Ф. Філоненко, д-р техн. наук
В.М. Стадніченко, канд. техн. наук

УМОВИ ПЕРЕХОДУ ПАР ТЕРТЯ В «КВАЗІБЕЗЗНОСНИЙ» СТАН

НАУ, кафедра інформаційних технологій, e-mail: stadnichenko_nau@mail.ru

Наведено результати досліджень впливу навантаження на швидкість і товщину утворення металокерамічного шару на поверхнях тертя внаслідок використання трибовідновлювальних сумішей. Показано, що найбільша швидкість зростання і товщина металокерамічного шару досягаються при максимальних навантаженнях.

Вступ

Використання трибовідновлювальних сумішей (ТВС) – один із напрямів збільшення ресурсу вузлів тертя технічних систем.

Уведення ТВС спрямовано на відновлення поверхонь тертя триботехнічних систем без виконання досить трудомістких операцій, пов'язаних з необхідністю розбирання виробів для проведення їх ремонту [1; 2].

Проте існуючі рекомендації щодо використання ТВС не враховують специфіку умов експлуатації реальних вузлів тертя. Наприклад, зачеплення трансмісії газотурбінних двигунів працюють в широкому діапазоні робочих навантажень [3].

Наявність такого розкиду робочих режимів впливатиме на швидкість утворення і товщину металокерамічного шару (МКШ) при введенні ТВС.

Аналіз робіт, присвячених механізму утворення МКШ при використанні ТВС, показав, що цей процес потребує високої густини енергії в зоні контакту [2; 3]. Крім того, МКШ є металосилікатом, що армований допустимо здрібненими продуктами зносу, основну частину яких складає оксид алюмінію Al_2O_3 [4].

Для утворення на поверхнях контакту такого матеріалу необхідно досягти в зоні фрикційної взаємодії температури 900–1600 °С [4], що можливо тільки за наявності значних навантажень, що виникають у зоні тертя. Визначення діапазону навантажень, за яких відбувається утворення МКШ, і його нижньої межі – актуальне завдання. У разі підвищення рівня робочих навантажень збільшується товщина МКШ. При цьому існує граничне значення навантажень, нижче за яке утворення МКШ не відбувається.

Метод акустичної емісії (АЕ) високочутливий до процесів утворення металокерамічного шару та може бути використаний для визначення перехо-

ду і контролю «квазібеззносного» режиму.

Методика досліджень

Для проведення досліджень використовували пари тертя зі сталі 12Х2Н4А. Металокерамічний шар на поверхні контакту одержали введенням у редуторне масло Б-3В ТВС „Гель-ревіталізант”, згідно з методикою, розглянутою в праці [3].

Вибір матеріалів досліджених пар тертя і змащувального середовища зумовлений їх широким використанням в трансмісіях авіаційних газотурбінних двигунів.

Випробування проводили на універсальній машині тертя СМТ-1 з використанням конструктивної схеми «диск–диск». Згідно з цією схемою один із зразків робиться нерухомим, а інший обертається на шпинделі машини тертя. При цьому реалізовувався режим тертя кочення з 20%-ним проковзуванням. Розміри зразків становили: діаметр $D = 25$ мм, товщина $h = 15$ мм. Швидкість обертання приводного вала машини тертя 500 об/хв вибирали, виходячи з максимального наближення до умов експлуатації модельованих вузлів тертя.

Для визначення максимально можливого навантаження на МКШ за початкові дані використовували контактні напруги, одержані при розрахунку на міцність зубів вертолїтних редуторів як найбільш навантажених елементів модельованих вузлів тертя: $\sigma_{\max} = 800\text{--}1000$ МПа. Відповідно до цього досліджувався діапазон робочих напруг до 1000 МПа і варіювався у бік зменшення з кроком 100 МПа.

Для визначення товщини МКШ використовували спеціальний пристрій, який дозволяв здійснювати безперервну фіксацію зміни розміру випробовуваних на машині тертя СМТ-1 зразків. Фактично в процесі тертя проводиться реєстрація зміни геометрії зразків у реальному масштабі часу за рахунок або їх зносу, або збільшення по-

верхнього шару.

У схемі вимірювання перешкоди від биття валів і рухомої каретки машини тертя повністю виключаються завдяки закріпленню всього пристрою на самій каретці. Його механічна частина є пристроєм важеля, закріпленим на каретці машини тертя СМТ-1 (рис. 1).

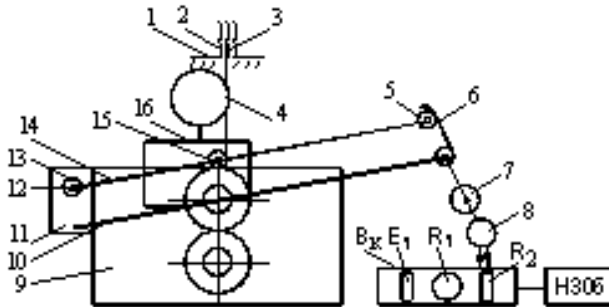


Рис. 1. Кінематична схема пристрою для визначення геометрії зразків:

1 – обмежувач; 2 – гайка обертання; 3 – болт; 4 – індикатор годинного типу; 5 – верхній підшипник важеля; 6 – качалка; 7 – мультиплікатор; 8 – потенціометр; 9 – каретка; 10 – стояк; 11 – профіль; 12 – вісь обертання; 13 – корпус; 14 – важіль; 15 – нижній підшипник важеля; 16 – кронштейн

Важіль 13 обертається на осі 12 у прецизійних підшипниках, що знаходяться всередині корпусу 13, який болтами жорстко закріплений через профіль 11 на каретці 9. До неї через той самий профіль 11 прикріплений стояк 10. Важіль 14 на 1/3 довжини від осі торкається верхнього випробовуваного ролика. У місці дотикання на важелі закріплений підшипник 15, який вільно обертається при обертанні випробовуваних зразків. На кінці важеля встановлений підшипник 5, який у разі зміни положення важеля (зносі або збільшенні поверхневого шару зразка) передає обертання через спеціально спрофільовану качалку 6 до мультиплікатора 7. Профіль робочої поверхні качалки в процесі тарування пристрою уточнюється для забезпечення лінійної залежності між зміною геометрії зразка і показаннями реєстратора (самописа).

Вихідний вал мультиплікатора через втулку жорстко з'єднаний з валом потенціометра 8, який дозволяє одержувати зміну електричного сигналу як при підніманні, так і при опусканні важеля. Живлення потенціометра здійснюється від елемента постійного струму E_1 напругою 1,5 В більшої ємності через додатковий опір R_1 (рис. 2). Вимкнення джерела живлення здійснюється вимикачем ВК (рис. 2). Змінний опір R_2 складено з потенціометром в мостову схему для регулювання нуля на реєструвальному пристрої –

високочутливому самописі Н306.

У результаті зносу зразків або утворення на їх поверхні МКШ відбувається опускання або піднімання важеля 14 (рис. 1), а отже, і переміщення повзуна потенціометра. Це призводить до розбалансування мостової схеми, і на самопис Н306 подається електричний сигнал, величина якого прямо пропорційна зміні товщини верхнього зразка. Передавальне число мультиплікатора становить 1:40 і розраховується з урахуванням вимірювання зміни геометрії реальних зразків. Для тарування пристрою в місці кріплення підшипника 15 за допомогою кронштейна 16 до стояка 10 жорстко прикріплений мікрометричний індикатор годинного типу 4, голка якого спирається на важіль 14 (рис. 1).

Тарування вимірювального пристрою здійснюється за допомогою болта 3, жорстко закріпленого на важелі 14, на якому обертається гайка 2, що спирається на обмежувач 1, піднімаючи важіль 14 щодо випробовуваних зразків. При відхиленні важеля з використанням показання мікрометричного індикатора годинного типу 4 одержаний тарувальний графік, що дозволяє за показаннями самописа Н306 контролювати зміну товщини поверхонь тертя Δh у контактній області.

Як показали результати тарування, середнє значення зміни геометрії зразків можна приблизно оцінити як $\Delta h/3$.

Чутливість розробленого пристрою обмежена шириною контактної «витка» датчика потенціометра. У разі зміни геометрії зразка в межах ширини одного «витка» показання приладу не змінюються. Подальша зміна геометрії зразків призводить до зміни положення пера реєструвального пристрою на 10 мм.

Як показали вимірювання, чутливість пристрою становить $4,9 \cdot 10^{-5}$ мм.

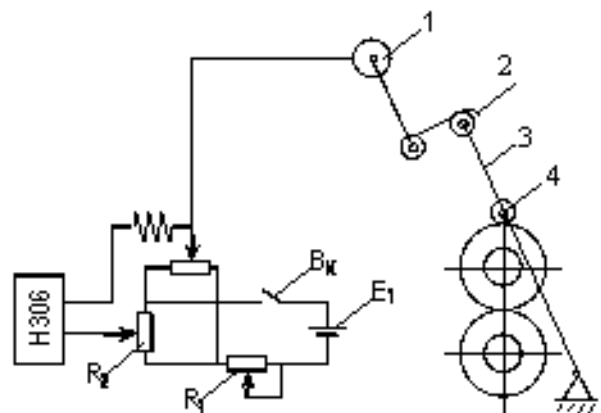


Рис. 2. Електрична схема пристрою для визначення геометрії зразків:

1 – мультиплікатор; 2 – качалка; 3 – каретка; 4 – нижній підшипник важеля; E_1 – джерело

постійного струму

Одночасно з реєстрацією товщини МКШ проводилася реєстрація і обробка сигналів акустичної емісії (АЕ). Акустико-емісійний комплекс складався з приладу АЭ-109М, який мав виведення інформації на два самописи типу Н306 і персональний комп'ютер. Первинна реєстрація АЕ проводилася за допомогою датчика, виготовленого з п'єзокераміки ЦТС-19.

Датчик устатковлювався на хвилевід, який мав жорсткий контакт з нерухомим зразком досліджуваних пар тертя. Сигнал АЕ на виході датчика мав низький рівень і посилювався з виділенням його обвідної на фоні перешкод за допомогою попереднього підсилювача.

Частотний діапазон реєстрованих сигналів АЕ становив 500 кГц – 1 МГц. Як основні оброблювані параметри сигналів АЕ використовували усереднену амплітуду, усереднену потужність і усереднену накопичувану потужність. Час усереднювання дорівнював 0,2 с.

У процесі проведення експерименту після виходу пар тертя на «квазібезносний» режим експлуатації випробування зупиняли і проводили фрактографічні дослідження поверхонь зразків, а також Фур'є-аналіз анізотропії структурного стану поверхневих шарів за жорсткими фотокопіями, одержаними на растровому електронному мікроскопі «CamScan-4DV» при збільшенні у 1960 разів.

Фур'є-аналіз фрактограм проводили з використанням персонального комп'ютера і спеціалізованого пакета прикладних програм. За наслідками обробки фрактограм оцінювали анізотропію орієнтації блоків структури щодо вектора головних діючих напруг, а також ступеня впорядкованості структури. Основну методологію обробки інформації та її результати розглянуто в праці [5].

Експериментальні результати

Проведені дослідження показали, що при введенні ТВС у процесі тертя відбувається утворення МКШ, товщина якого визначається, перш за все, величиною напруги контактної взаємодії (прикладеного навантаження). При цьому рівень прикладеного навантаження впливає на швидкість зростання МКШ.

Якщо $\sigma_{\max} = 1000$ МПа (рис. 3, крива 1), утворення на зразках нового МКШ реєструвалося самописом Н306 вже через 10 хв з моменту введення ТВС. Після закінчення 3 год випробувань зростання покриття припинялося, досягнувши значення 23–25 мкм. Як показали дослідження, при постійному прикладеному навантаженні процес зростання МКШ в часі протікає зі зміною його швидкості.

У початковий період часу роботи пар тертя (до 45 хв) швидкість утворення МКШ була невеликою 1,5–2,5 мкм/год. Потім, протягом 1–2 год вона збільшилася до максимального значення 7,5–8,5 мкм/год, а до кінця 3–5 год випробувань зменшилася до нуля.

Подальші випробування впродовж 5 год показали, що спостерігаються незначні відхилення в бік як зростання, так і убування реєстрованої товщини МКШ, що свідчить про протікання процесу незначного зносу МКШ з подальшою його регенерацією.

При зменшенні навантаження, прикладеного до пар тертя, характер утворення і зростання МКШ є подібним.

При навантаженні $\sigma_{\max} = 900$ МПа максимальна товщина МКШ, що утворюється, становила $h_{\max} = 20$ –22 мкм.

Завершення процесу його зростання припинялося приблизно через 5 год після введення ТВС (рис. 3, крива 2). З подальшим зниженням навантаження на пари тертя відбувалося збільшення часу утворення МКШ при одночасному зменшенні його товщини. При навантаженні 800 МПа утворення МКШ відбувалося через 5,5 год після введення ТВС при товщині утвореного МКШ 17–18 мкм (рис. 3, крива 3).



Рис. 3. Швидкість утворення і товщина МКШ залежно від контактної навантаження:

1 – $\sigma_{\max} = 1000$ МПа; 2 – $\sigma_{\max} = 900$ МПа;
3 – $\sigma_{\max} = 800$ МПа; 4 – $\sigma_{\max} = 700$ МПа;
5 – $\sigma_{\max} = 600$ МПа

Для навантаження 700 МПа час утворення МКШ дорівнював 7 год, причому товщина утвореного МКШ не перевищувала 10 мкм (рис. 3, крива 4). При $\sigma_{\max} = 600$ МПа і нижче (рис. 3, крива 5) утворення МКШ не фіксувалося.

Результати обробки сигналів АЕ показали, що незалежно від експлуатаційного навантаження в процесі тертя зразків протягом перших 8 год збільшуються значення усередненої і сумарної потужності сигналів АЕ. При цьому рівень сумарної потужності приблизно однаковий $W \approx 25 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2$ (рис. 4).

При подальшій роботі пар тертя (більше 8 год) спостерігається поступове зниження як усередненої, так і сумарної потужності сигналів АЕ, причому зі збільшенням часу випробувань при зменшенні прикладеного до зразків навантаження «залишковий» рівень значень цих параметрів збільшується (рис. 4, ділянка 2).

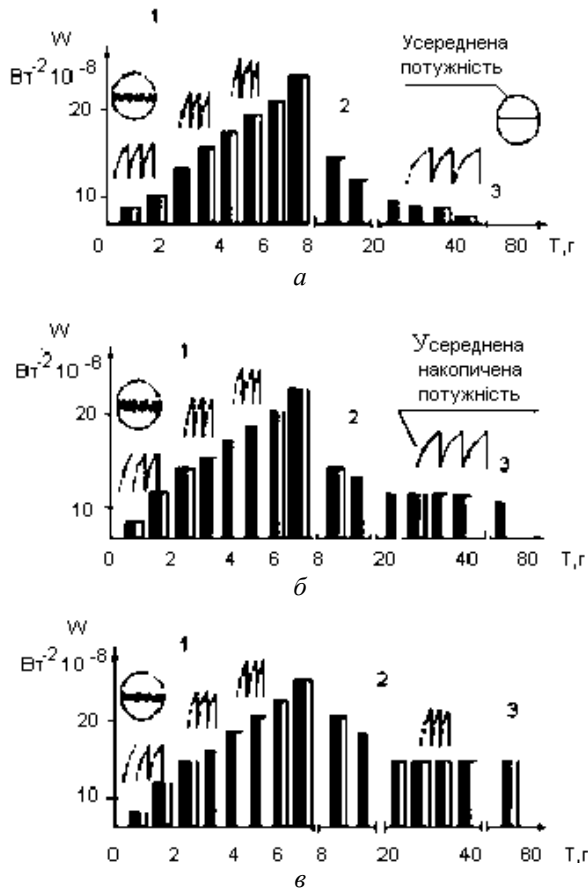


Рис. 4. Характер зміни усередненої спектральної потужності W сигналів АЕ:
а – $\sigma_{\max} = 1000$ МПа; б – $\sigma_{\max} = 700$ МПа; в – $\sigma_{\max} = 600$ МПа

Через 80 год роботи пари тертя при навантаженні $\sigma_{\max} = 1000$ МПа сумарна потужність сигналів АЕ практично дорівнює нулю $W \approx 0$ (рис. 4, а, ділянка 3). Кореляція цього інформативного параметра АЕ з інтенсивністю зношування [5] дозволяє стверджувати про роботу пари тертя в «квазібеззносному» режимі її експлуатації.

При навантаженні $\sigma_{\max} = 1000$ МПа сумарна потужність реєстрованих сигналів АЕ після 80 год роботи пари тертя становила $W \approx 8 \cdot 10^{-8}$ В² (рис. 4, б, ділянка 3), що свідчить про поступовий вихід з «квазібеззносного» режиму і початку переходу пари тертя до режиму нормального зношування. Такий режим, як показали дослідження, характеризується достатньо низькою інтенсивністю зношування.

Зниження експлуатаційного навантаження до $\sigma_{\max} = 600$ МПа супроводжується подальшим збільшенням сумарної потужності реєстрованих сигналів АЕ до $W \approx 18 \cdot 10^{-8}$ В² (рис. 4, в, ділянка 3), що свідчить про перехід пари тертя в режим нормального зношування.

Отже, зменшення експлуатаційного навантаження призводить до зниження зносостійкості утвореного після введення ТВС МКШ. При навантаженнях $\sigma_{\max} \leq 600$ МПа утворення МКШ не відбувається і пари тертя працюють у режимі нормального зношування. Це можна пояснити відмінностями структури МКШ, утвореного при різних значеннях робочих навантажень.

Фрактографічний аналіз поверхонь контакту пар тертя після їх виходу на сталий режим зношування показав, що їх структури розрізняються між собою. При навантаженні $\sigma_{\max} = 1000$ МПа сформований МКШ складається з блоків, розмір яких незначний (рис. 5, а).

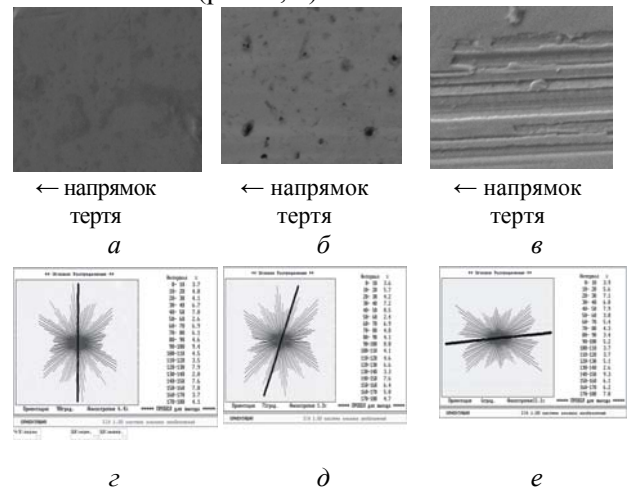


Рис. 5. Фрактограма поверхні ($\times 1960$), орієнтація блоків, анізотропія структури МКШ в процесі нанесення (програма SIA 1.00):
а, г – $\sigma_{\max} = 1000$ МПа; б, д – $\sigma_{\max} = 700$ МПа;
в, е – $\sigma_{\max} = 600$ МПа

Зменшення навантаження до $\sigma_{\max} = 700$ МПа призводить до формування МКШ, у структурі якого спостерігається поява блоків більшого розміру (рис. 5, б). При навантаженнях $\sigma_{\max} \leq 600$ МПа на поверхні тертя утворюються лише окремі ділянки МКШ (рис. 5, в).

При цьому, як показує аналіз, спостерігається зміна орієнтації блоків поверхневих шарів. При навантаженні $\sigma_{\max} = 1000$ МПа основна маса блоків, з яких складається утворений МКШ, орієнтована в напрямку, перпендикулярному напрямку виникаючої сили тертя (рис. 5, г). Зі зменшенням навантаження до $\sigma_{\max} = 700$ МПа відбувається зміна орієнтації блоків структури МКШ в напрямку, паралельному напрямку тертя (рис. 5, д).

Подальше зниження навантаження до $\sigma_{\max} \leq 600$ МПа призводить до того, що орієнтація більшості блоків поверхневого шару практично збігається з напрямком тертя (рис. 5, e).

Висновок

Результати експериментальних досліджень показали, що швидкість зростання і товщина утвореного МКШ залежать від величини навантажень, що прикладені до пар тертя з введеними ТВС. Найбільше значення цих параметрів досягається при максимальних навантаженнях. При цьому реалізується режим «квазібеззносного» тертя.

Із зменшенням рівня робочих навантажень фіксується їх межове значення, при якому утворення МКШ не відбувається. У цьому разі пара тертя працює в режимі нормального зношування.

Фрактографічні дослідження показали, що зі зменшенням напруги контактної взаємодії відбувається збільшення розмірів блоків структури поверхневих шарів і їх переорієнтація в напрямку, паралельному вектору сили тертя.

Подібна поведінка МКШ, імовірно, пов'язана зі зменшенням температури в зоні контакту. Дійсно, при високих температурах можливо протікання макрозсувної деформації поверхневих шарів, що не призводить до розорієнтації блоків структури.

При зниженні температури спостерігаються мікророзсувні деформації на рівні блоків структури.

У цьому разі відбувається їх переорієнтація в напрямку, паралельному вектору сили тертя, що підтверджується результатами фрактографічного аналізу.

Як показали дослідження, АЕ чутлива до зміни механізмів тертя. При цьому вона дозволяє не тільки фіксувати перехід від «квазібеззносного» тертя до нормального зносу, але і здійснювати моніторинг цього переходу. Використання АЕ робить можливою оптимізацію режимів роботи пар тертя з погляду як швидкості зростання, так і товщини утвореного МКШ.

Література

1. Булатов В.П., Киреєнко О.Ф. Структурное исследование механизмов безыносного трения конструкционных материалов на основе синергетических представлений // Пробл. машиностроения и надежности машин. – 1991. – №2. – С. 56–61.
2. Babak V.P., Stadnichenko V.N. Application of revitalisants for extension of resource and restoring of worn-out friction units of aviation axial-piston hydromachines // Aviation. – 2005. – Vol. VIII, #1. – P. 8–12 (Vilnius, Lithuania).
3. Стадниченко В.Н., Стадниченко Н.Г., Джус Р.Н., Трошин О.Н. Об образовании и функционировании МК покрытия, полученного с помощью ревитализантов // Вестн. науки и техн. – Х.: ХДНТ; НТУ “ХПИ”. – 2004. – Вып. 1(16). – С. 18–27.
4. Бабак В.П., Філоненко С.Ф., Стадниченко В.М. Влияние поверхностных свойств металлокерамических шаров на акустичну емісію // Вісн. НАУ. – 2005. – №3. – С. 3–6.
5. О структуре поверхностного слоя стали 100Cr6, обработанной лезвийным инструментом из композита 10 / О.А. Розенберг, С.Е. Делеви, В.Н. Шейкин и др. // Сверхтвердые материалы. – 1999. – №5. – С. 57–62.

Стаття надійшла до редакції 04.04.06.

Приведены результаты исследований влияния нагрузки на скорость и толщину образования металлокерамического слоя на поверхностях трения в результате применения трибовосстанавливающих смесей. Показано, что наибольшая скорость роста и толщина металлокерамического слоя достигаются при максимальных нагрузках.

In the work, the results of researches of loading effect on velocity and thickness of the metallic-ceramic layer formation, which is formed as a result of applying the triboretrofitting mixes in lubrication are presented. It is shown that the maximum rate of growth and the thickness of the metallic-ceramic layer takes place at the peak loads.