

СУЧАСНІ АВІАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.891:621.316

В.П. Бабак, д-р техн. наук
В.М. Стадниченко, канд. техн. наук
С.Ф. Філоненко, д-р техн. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАР ТЕРТЯ З ТРИБОВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ СУМІШАМИ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Інститут інформаційно-діагностичних систем НАУ, e-mail: stadnichenko_nau@mail.ru

Наведено результати досліджень акустичного випромінювання пар тертя в початковому стані та після введення трибовідновлювальної суміші. Виявлено закономірності зміни параметрів сигналів акустичної емісії, які відповідають стадії вторинного припрацювання.

Вступ

Одним із напрямів збільшення ресурсу вузлів тертя, застосовуваних у різних виробках авіаційної і автомобільної промисловості, є не тільки використання матеріалів з підвищеною зносостійкістю, але й різноманітних трибовідновлювальних сумішей (ТВС) [1–3]. Останні знаходять усе більше поширення, оскільки дозволяють проводити “ремонт” чи відновлення властивостей поверхонь тертя триботехнічних систем без виконання досить трудомістких операцій, пов’язаних із розбиранням виробів чи окремих їхніх вузлів. Аналіз сучасного стану українського ринку подібних сумішей показує наявність їхнього різноманітного асортименту, що характеризується значною кількістю вітчизняних і іноземних торгових марок [1; 2].

Разом з тим, існуючі рекомендації з їхнього застосування не враховують специфіки роботи пар тертя, наприклад, зчеплень трансмісії газотурбінних двигунів, матеріали яких можуть мати різний хімічний склад, структуру і фізико-механічні характеристики, що буде впливати на кінетику фізико-хімічних процесів, які протікають на поверхнях контакту при введенні ТВС. Це зрештою приводить до зміни структури і фізико-механічних характеристик поверхневих шарів, зміни характеру і величини їхнього зносу. Тому застосування тих чи інших типів ТВС потребує не тільки оптимізації їхнього вибору для пар тертя, виготовлених з певних матеріалів, але й оптимізації експлуатаційних режимів роботи трибосистем. У першу чергу це відноситься до визначення умов виникнення і роботи металокерамічного шару (МКШ) як на стаціонарних, так і на нестаціонарних режимах експлуатації вузлів тертя авіаційної і наземної техніки.

Подібні дослідження є досить трудомісткими. Вони припускають розробку спеціальних мето-

дик для визначення експлуатаційних характеристик трибосистем із введеними ТВС залежно від умов поверхневої контактної взаємодії. При цьому часові витрати на проведення подібних досліджень досить великі. У той же час залишається проблема, пов’язана з оцінкою стану пар тертя, що працюють із введеними ТВС, в умовах експлуатації.

Для вирішення даної проблеми усе ширше застосовуються нові методи досліджень, які дозволяють отримати інформацію про кінетику процесів, що протікають у матеріалах в умовах їхньої динамічної контактної взаємодії. Одним із таких методів є метод акустичної емісії (АЕ) [4–7]. Як показують результати досліджень [5–7], він має високу чутливість до зміни механізмів зношування деталей, обумовлених фізико-хімічними процесами, що протікають у поверхневих шарах матеріалів на межі їх поділу. Це дає можливість використовувати АЕ для розробки методів контролю і оцінки стану пар тертя з визначенням стадій зношування їхніх матеріалів.

Так, при введенні ТВС відбувається перебудова структури поверхонь тертя, що пов’язано з появою МКШ. Це призводить до зміни умов контактної взаємодії і зниження інтенсивності зношування деталей. Нижче будуть визначені основні закономірності зміни акустичного випромінювання, на підставі яких можлива розробка методів оцінки стану поверхонь тертя в умовах їхньої експлуатації.

Методика досліджень

Для проведення досліджень на знос були виготовлені зразки зі сталі ШХ-15 і 12Х2Н4А. Вибір даних матеріалів обумовлений їхнім широким використанням у виробництві зубів шестерень і тіл кочення підшипників трансмісій авіаційних двигунів. Випробування зразків проводилися на універсальній машині тертя СМТ-1 з ви-

користанням конструктивної схеми “диск-диск”. Під час проведення досліджень реалізовувався режим тертя кочення з 20 % прослизанням. Діаметр $D_{обр}$ досліджуваних зразків становив: 25 мм, товщина $h = 15$ мм.

Дослідження виконувалися в два етапи. Спочатку на зношування під навантаженням випробувалися пари тертя без ТВС. Прикладене навантаження перераховувалося в прикладене напруження з урахуванням розмірів досліджуваних зразків відповідно до прийнятих методик [4; 6; 7]. Первісне прикладене напруження $\sigma_{max} = 1000$ МПа.

Потім, після виходу пари тертя на режим сталого зношування і тривалої роботи в цьому режимі (не менш ніж 30 год) проводилося миттєве зменшення напруження до 600 МПа. Діапазон зміни контактних навантажень на зразки вибирався з умови їх відповідності експлуатаційним навантаженням, що виникають на плямах контакту зубів шестерень редукторів і тіл кочення опор вертолітних газотурбінних двигунів.

На другому етапі проводилися випробування на зношення пар тертя з МКШ. МКШ на поверхнях тертя утворювався після введення між поверхнями зразків, що контактують, мастильної ТВС типу “Комбат” відповідно до методики, викладеної в праці [3]. Температура мастильного середовища становила 373 К і підтримувалася сталюю. Це досягалося за допомогою системи терморегулювання. Дана температура відповідає робочим температурам мастильного середовища вертолітних редукторів і підшипникових опор вертолітних газотурбінних двигунів. Швидкість обертання привідного вала машини тертя також вибиралася з умови максимального наближення до умов експлуатації моделюючих вузлів і становила 500 об/хв.

Основними параметрами, що характеризували зносостійкість досліджуваних пар тертя, були момент тертя і маса зразків, значення яких обчислювалися відповідно до методики, викладеної в праці [4].

Одночасно з визначенням параметрів, що характеризують процес зношування вузлів тертя, проводилася реєстрація і наступна обробка сигналів акустичної емісії (АЕ).

Частотний діапазон реєстрованих сигналів АЕ знаходився в межах 500 кГц – 1 МГц. Акустико-емісійний комплекс складався з приладу АЕ-109М, який мав вивід інформації на два самописних пристрої типу Н306 і персональний комп’ютер. Первинне перетворення інформації виконувалось за допомогою датчика, який був виготовлений з п’єзокераміки ЦТС-19. Датчик установлювався на хвилевід, що мав жорсткий

контакт з нерухомим зразком пари тертя. Сигнал на виході датчика не достатній для обробки електронною апаратурою, тому проводилось його підсилення та відокремлення на фоні завад з використанням попереднього підсилювача.

Як основні оброблювані параметри сигналів АЕ, що реєструються, використовувалися їхні усереднені амплітуда, потужність і накопичена потужність. Час усереднення становив 0,2 с. Цей час вибирався з умови необхідності узгодження швидкості надходження інформації на АЕ апаратуру і швидкості її виводу після обробки на самописні прилади. Для цього в АЕ апаратурі використовуються елементи затримки у вигляді інтегруючих ланцюгів.

Оскільки реєстрація сигналів АЕ здійснюється протягом тривалого періоду часу, що відповідає часу проведення випробувань, то для можливості керування тривалістю виводу інформації в АЕ апаратурі використовуються два рівні обмеження як за амплітудою, так і за потужністю. При цьому робота інтегруючого ланцюга заснована на принципі “переповнення – скидання”, що широко застосовується в самописних приладах типу “Ricadenky” виробництва японських фірм. Це відноситься, насамперед, до потужності сигналів АЕ, що накопичується.

У разі досягнення граничного рівня відбувається автоматичне скидання інтегруючого ланцюга з потужності, що накопичується.

Після цього процес накопичення потужності повторюється. У результаті процес накопичення усередненої потужності сигналів АЕ виводиться у вигляді пилкоподібних кривих із різними кутами нахилу. Після завершення випробувань пар тертя на зношення з одночасною реєстрацією й обробкою сигналів АЕ проводилися металографічні дослідження поверхонь зразків з використанням мікроскопа-інтерферометра Лінника МП-4 при збільшенні в 290 разів, а також виконувалася Фур’є-аналіз анізотропії їхнього структурного стану за твердими фотокопіями, отриманими на растровому електронному мікроскопі “CamScan-4DV” при збільшенні в 1960 разів.

Фур’є-аналіз фрактограм здійснювався на персональному комп’ютері з використанням спеціального пакету прикладних програм.

На підставі результатів проведення обробки фрактографічної інформації проводилися оцінки рівня анізотропії орієнтації блоків структури відносно вектора головних діючих напружень, ступеня упорядкованості структури та ряду інших параметрів.

Основна методологія обробки інформації, а також аналізовані параметри розглянуті в працях [8–10].

Результати досліджень

Результати випробувань пар тертя без МКШ на зношення показали, що у процесі контактної взаємодії при прикладеному напруженні в 1000 МПа відбувається поступовий перехід вузла тертя з режиму припрацювання в режим сталого зношування. Останній режим характеризується стабілізацією значень моменту тертя на рівні $M_{тр} \approx 5,6$ Н/м (рис. 1, а, стадія 1). Після 30 год безперервної роботи пар тертя проводилося різке зниження напруження на них до 600 МПа. При такому зниженні спостерігалось миттєве падіння моменту тертя до $M_{тр} \approx 4,3$ Н/м (рис. 1, а, А).

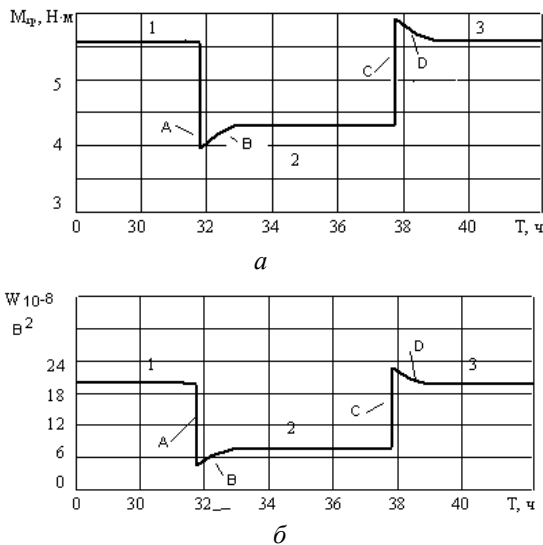


Рис. 1. Зміна моменту тертя $M_{тр}$ (а) і усередненої потужності W (б) у звичайних парах тертя без МКШ:

1, 3 – $\sigma_{max} = 1000$ МПа; 2 – $\sigma_{max} = 600$ МПа

Надалі відбувалося поступове зростання моменту тертя (рис. 1, а, В), що тривало протягом приблизно однієї години контактної взаємодії поверхонь досліджуваних зразків. Після цього настала стабілізація моменту тертя на новому рівні: $M_{тр} \approx 4,5$ Н/м (рис. 1, а, стадія 2).

З отриманих результатів видно, що різниця між миттєвим значенням $M_{тр}$ у момент часу після зменшення напруги і його стабілізованим значенням на новому рівні становить $\Delta M_{тр} \approx 0,2$ Н/м. Після 5 год роботи пари тертя без МКШ на новому режимі стабілізації проводилося миттєве збільшення прикладеного напруження до первісного значення ($\sigma_{max} = 1000$ МПа). На діаграмі зміни $M_{тр}$ даний перехід характеризується різким стрибкоподібним зростанням моменту тертя (рис. 1, а, С) до рівня $M_{тр} \approx 5,9$ Н/м, що перевищує рівень первісної стабілізації при тому самому значенні напруження.

Надалі при тому самому напруженні спостерігається плавне зменшення $M_{тр}$ (рис. 1, а, D) з

поступовим його виходом на режим стабілізації (рис. 1, а, стадія 3). Стадія стабілізації характеризується значенням моменту тертя, що несуттєво перевищує первісний рівень стабілізації. Як показали результати обробки даних, середнє відхилення моменту тертя ΔM на стадії 3 для всіх проведених випробувань становить приблизно 0,5–0,7 %.

Плавна зміна $M_{тр}$ із виходом на режим стабілізації як у випадку зменшення, так і у випадку збільшення прикладеного напруження (рис. 1, а, В, D), очевидно, пов'язано з виникненням і протіканням процесу вторинного припрацювання, що є наслідком структурного пристосування поверхневих шарів працюючих матеріалів у нових умовах навантаження. Це збігається з результатами досліджень, що наведені в працях [11; 12].

З отриманих даних також випливає, що структурна пристосовуваність при зміні напруження не відбувається миттєво, а протікає протягом деякого, досить тривалого проміжку часу, який у випадку збільшення і зменшення навантаження приблизно однаковий. Це дозволяє припустити, що механізми структурної пристосовуваності поверхневих шарів матеріалів пар тертя при зміні зовнішніх факторів подібні між собою.

Результати обробки сигналів АЕ показали, що характер зміни їхньої усередненої потужності цілком повторює характер зміни моменту тертя. При цьому на акустичній діаграмі також виділяються три характерні стадії, а також стадії, що відповідають стадіям виникнення і протікання вторинного припрацювання пар тертя (рис. 1, б, стадії 1, 2, 3, В, D). Однак час плавної зміни потужності реєстрованих сигналів на стадії припрацювання більше часу плавної зміни моменту тертя (рис. 1, б, В, D). Обробка отриманих результатів показала, що тривалість вторинного припрацювання, яка фіксується за моментом тертя, при зменшенні навантаження на 3 % менша, ніж при збільшенні навантаження.

Однак на відміну від стадій стабілізації моменту тертя, що розрізняються за своїми числовими значеннями (рис. 1, а, стадії 1, 3), усереднена потужність сигналів АЕ на даних стадіях практично залишається постійною: $W = 22 \cdot 10^{-6} \text{ В}^2$. Це вказує на те, що при поверненні максимального напруження, прикладеного до пар тертя, їхнє зношування відбувається за єдиним механізмом.

Результати випробувань пар тертя з МКШ при тих самих режимах зміни прикладеного напруження показали, що діаграми зміни моменту тертя й усередненої потужності сигналів АЕ від-

різняються від діаграм, отриманих при випробуваннях пар тертя без МКШ. При цьому на діаграмі зміни $M_{тр}$ фіксуються ділянки миттєвої зміни навантаження і переходи до стабілізаційних “беззношувальних” стадій (рис. 2, а) з відсутністю ділянок вторинного припрацювання.

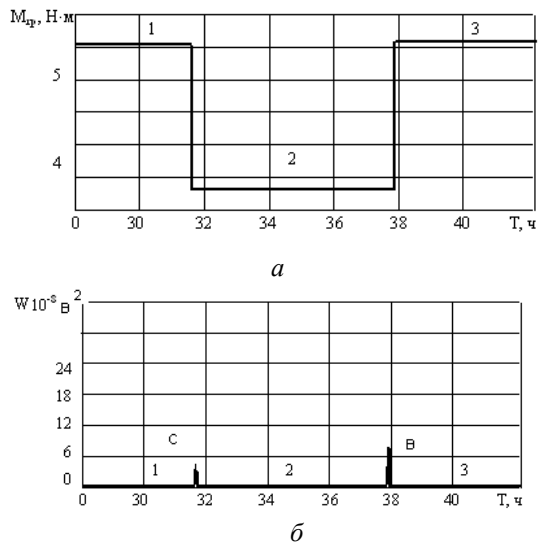


Рис. 2. Зміни моменту тертя $M_{тр}$ (а) і усередненої потужності W сигналів АЕ (б) в парах тертя з МКШ:
1, 3 – $\sigma_{max} = 1000$ МПа; 2 – $\sigma_{max} = 600$ МПа

Як і в описаних дослідженнях, повернення напруження до первісного значення ($\sigma_{max} = 1000$ МПа) супроводжується збільшенням $M_{тр}$ на стадії стабілізації 3 (рис. 2, а). Дане збільшення ΔM для всіх проведених випробувань становить приблизно 0,3 – 0,6 % відносно стадії стабілізації 1 (рис. 2, а). Відсутність ділянок плавної зміни $M_{тр}$ при зміні навантаження зазвичай пояснюють близькою до “миттєвої” структурної пристосованості МКШ до нового режиму роботи.

У той же час на діаграмах зміни потужності сигналів АЕ спостерігаються короткочасні сплески акустичного випромінювання, які становлять приблизно 6 – 8 с (рис. 2, б, С, В). Вони фіксуються в моменти часу зміни прикладеного напруження на ділянках стабілізації $M_{тр}$ (рис. 2, а, стадії 2, 3.). У подальшому акустичне випромінювання відсутнє. Слід зазначити, що поняття “миттєва” зміна прикладеного напруження є досить умовним. З урахуванням її стабілізації встановлення нового значення напруження може відбуватися протягом 2–3 с. У той же час АЕ випромінювання фіксується на значно більшому проміжку часу. Це вказує на те, що при миттєвій зміні прикладеного напруження в парах тертя з МКШ так само відбувається вторинне припрацювання. Але при цьому час його протікання незначний і не фіксується за допомогою реєстрації моменту тертя.

Даний результат підтверджує припущення, яке зроблено в праці [13]. Цьому висновку відповідають і результати аналізу фрактограм поверхонь зразків пар тертя, які отримані для різних стадій прикладеного напруження (рис. 3).

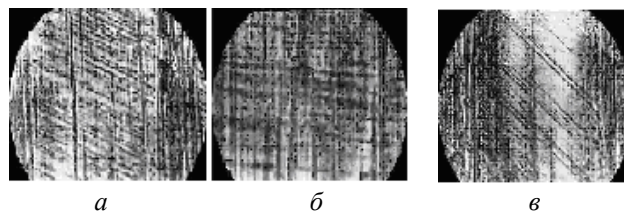


Рис. 3. Фрактограми МКШ для різних значень прикладеного напруження:
а – $\sigma = 1000$ МПа (рис. 2, а, стадія 1);
б – $\sigma = 1000$ МПа (рис. 2, а, стадія 3);
в – $\sigma = 600$ МПа (рис. 2, а, стадія 2)

Як видно з рис. 3, на всіх стадіях тертя спостерігаються макрозсувні деформації. При цьому макрозсувні деформації, які спостерігаються для стадій 1, 3 (рис. 3, а, б), значно більші, ніж для стадії 2 (рис. 3, в), наявність характерних зсувних смуг.

Зміна величини макрозсувних деформацій також указує на існування вторинного припрацювання. Цьому відповідають і результати проведеного структурного Фур’є-аналізу.

Обробка отриманих даних показала, що при зміні навантаження на парах тертя відбувається зміна розмірів блоків структури і їхньої орієнтації відносно вектора головних діючих напружень. Зі зменшенням навантаження відбувається збільшення блоків і зростає ступінь їхньої упорядкованості. У той же час, при збільшенні навантаження на пари тертя спостерігаються зворотні процеси.

Висновки

Таким чином, у результаті проведених досліджень встановлені основні закономірності зміни усередненої потужності сигналів АЕ на різних стадіях навантаження пар тертя. При цьому показано, що характер зміни АЕ діаграм повторює характер діаграм зміни моменту тертя. У першу чергу це стосується ділянок вторинного припрацювання для пар тертя без уведеного ТВС. Відповідність часових інтервалів ділянок вторинного припрацювання, що фіксуються за сигналами АЕ, а також стабільність величини акустичного випромінювання при тому самому значенні прикладеного напруження свідчить про схожість механізмів структурної пристосованості матеріалів пар тертя при їхньому зносі.

При введенні ТВС на діаграмах зміни моменту тертя ділянки вторинного припрацювання не фіксуються. Однак сплески акустичного випро-

мінювання, реєстрованого на малих проміжках часу при зміні умов навантаження, дозволяють зробити висновок про існування вторинного припрацювання. Проте воно має динамічний характер і відбувається зі значною швидкістю в короткому проміжку часу. Це підтверджується результатами фрактографічного і структурного Фур'є-аналізу.

Список літератури

1. Аратский П.Б., Капсаров А.Г. Применение геомодификаторов трения для увеличения ресурса работы металлообрабатывающего инструмента // Трение, износ, смазка. – 2001. – Т. 3, №1. – С. 244–251.
2. Половинкин В.Н., Лянной В.Б., Аратский П.Б. Применение геомодификаторов трения для восстановления изношенных поверхностей узлов трения при эксплуатации // Трение, износ, смазка. – 2000. – Т. 2, №2. – С. 172–178.
3. Булатов В.П., Киреенко О.Ф. Структурное исследование механизмов безыносного трения конструкционных материалов на основе синергетических представлений // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 1991. – №2. – С. 56–61.
4. 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 техники. – Харьков: ХДНТ и НТУ “ХПИ”. – 2004. – Вып. 1(16). – С. 18–27.
5. Джус Р.М., Стадниченко В.М., Стадниченко М.Г. Пристрій для беззупинної реєстрації динаміки зміни геометрії зразків при випробуваннях на тертя і знос // Вісн. НТУ “ХПИ”: Зб. наук. пр. Темат. вип.: Динаміка і міцність машин. – Харків: НТУ “ХПИ”. – 2003. – Т.1, №12. – С. 58–64.
6. Справочник по триботехнике: В 3-х т. / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – Т. 1: Теоретические основы. – 400 с.
7. Чихос Х. Системный анализ в триботехнике. – М.: Мир, 1982. – 352 с.
8. Богданов А.К. Оптико-структурный машинный анализ лейкоцитов: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москов. гос. ун-т им. М. Ломоносова. – М., 1983. – 122 с.
9. 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.
10. Fisher R.A. Statistical methods for research works. – Edinburgh: Oliver and Royard, 1958. – 261 p.
11. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
12. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Техніка, 1970. – 263 с.
13. Структурно-энергетическая модель изнашивания / Л.И. Погодаев и др. // Трение и износ. – 2001. – Т.22, №2. – С. 168–172.

Стаття надійшла до редакції 27.09.04.

В.П. Бабак, В.Н. Стадниченко, С.Ф. Филоненко

Исследование пар трения с трибовосстанавливающими составами методом акустической эмиссии
Приведены результаты исследований акустического излучения пар трения в начальном состоянии и после введения трибовосстанавливающего состава. Получены основные закономерности изменения параметров сигналов акустической эмиссии, соответствующие стадии вторичной приработки.

V.P. Babak, V.N. Stadnychnko, S.F. Filonenko

The research of friction pairs with tribo-recovery compositions with use the method of acoustic emission
The results of research of the acoustic radiation of friction pairs both on the initial and tribo-recovery stages are brought. The main dependences of the alteration of acoustic emission, which correspond to the stage of the secondary wear-in are presented.