

ІНФОРМАЦІЙНО-ДІАГНОСТИЧНІ СИСТЕМИ

УДК.621.891:621.316

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

**ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛОКЕРАМІЧНИХ ШАРІВ
НА АКУСТИЧНУ ЕМІСІЮ**

Кафедра інформаційних технологій, НАУ, e-mail: stadnichenkoo_nau@mail.ku

Досліджено вплив простою на експлуатаційні властивості пар тертя з металокерамічним поверхневим шаром. Запропоновано використання інформації акустичної емісії для контролю та діагностики складних триботехнічних систем безпосередньо в процесі їх експлуатації.

Вступ

Використання трибовідновлювальних сумішей (ТВС) є одним із напрямів збільшення ресурсу вузлів тертя сучасної техніки. Уведення ТВС спрямовано на відновлення властивостей поверхонь тертя триботехнічних систем без виконання досить трудомістких операцій, які пов'язані з необхідністю розбирання виробів для проведення їх ремонту [1; 2; 3].

Однак існуючі рекомендації із застосування ТВС не враховують специфіки умов експлуатації реальних пар тертя. Наприклад, зачеплення трансмісії газотурбінних двигунів можуть працювати в умовах як стаціонарних, так і нестаціонарних режимів експлуатації. При цьому в процесі їх експлуатації можуть існувати значні інтервали часу, протягом яких пари тертя не працюють [4]. Природно, що наявність різних робочих режимів буде впливати на фізико-механічні характеристики металокерамічних шарів (МКШ), які утворюються на поверхнях тертя в результаті використання ТВС, а також на напруженість їх стану. Безумовно, що зміна властивостей МКШ буде впливати і на зміну ресурсу газотурбінних двигунів.

Для вивчення властивостей пар тертя використовують різні методи досліджень, зокрема фрактографічний аналіз їх поверхонь, електричний, електромеханічний методи оцінки інтенсивності зношування та ін. У той же час значного поширення набувають методи, які дозволяють отримувати інформацію про кінетику процесів, які протікають у поверхневих шарах матеріалів в умовах їх динамічної контактної взаємодії. Одним із таких методів є метод акустичної емісії (АЕ). Він має високу чутливість до зміни механізмів зношування деталей, які обумовлені фізико-хімічними процесами, що протікають на межі розділу поверхневих шарів матеріалів [5–8].

Це дозволяє використовувати АЕ інформацію для розробки методів оцінки стану пар тертя з визначення стадій зношування їх матеріалів.

У результаті тривалого простою пар тертя з МКШ відбувається зміна його властивостей, що пов'язано з релаксацією внутрішніх напружень системи “основний матеріал – МКШ”. Це призводить до збільшення інтенсивності зношування поверхонь деталей, які вводяться в експлуатацію після тривалого простою. Також буде визначено основні закономірності зміни акустичного випромінювання, які можливо використовувати для розробки методів оцінки стану поверхонь тертя в робочих умовах, поверхонь тертя – в умовах їхньої експлуатації.

Методика досліджень

Для проведення досліджень було виготовлено три пари зразків зі сталі ШХ-15 і 12Х2Н4А. Зразки першої пари тертя мали МКШ з витримкою один місяць після його утворення, другої пари – з витримкою 10 діб, а МКШ на поверхнях тертя третьої пари зразків утворювався безпосередньо в процесі проведення досліджень, тобто з відсутністю витримки. Металокерамічний шар усіх пар зразків був отриманий шляхом введення в редукторне масло “ИТП-300” ТВС “Гель-ревіталізант для редукторів” (ТВС фірми ХАДО). Методику отримання МКШ, що формується в процесі тертя з ТВС, наведено в праці [9]. Вибір матеріалів досліджуваних пар тертя та мастильного середовища обумовлений їх широким використанням у трансмісіях авіаційних газотурбінних двигунів. Випробування зразків проводилось на універсальній машині тертя СМТ-1 з використанням конструктивної схеми “диск–диск”. За цією схемою один із зразків був нерухомий, інший обертася на шпинделі машини тертя. Під час проведення досліджень реалізовувався режим тертя кочення з 20% проковзуванням.

Розміри досліджуваних зразків становили: діаметр $D_{обр}=25\text{мм}$, товщина $h=15\text{мм}$. Швидкість обертання приводного вала машини тертя також визначалася з умови максимального наближення до умов експлуатації моделюючих вузлів і становила 500 об/хв.

Дослідження виконувалися в два етапи. Спочатку під навантаженням проводилось випробування пар тертя з визначенням їх виходу на режим сталої “квазібезносної” роботи. Прикладене навантаження, яке було переведене в прикладене напруження, з урахуванням розмірів досліджуваних зразків, дорівнювало $\sigma_{\max} = 1000\text{ МПа}$. Методика розрахунку напружень наведена в праці [10]. На другому етапі після виходу пар тертя на сталий режим роботи проводилося миттєве відмоктування масла з мастильної ванни. Після цього робота пар тертя відбувалась до виникнення задиру під час змазування зразків маслом, яке залишилось на їх контактних поверхнях. При цьому величина прикладеного напруження залишалася постійною і не змінювалась. Основними параметрами, що характеризували зносостійкість досліджуваних зразків, були момент тертя і маса зразків, які визначались відповідно до методики, наведеної в праці [11].

У процесі тертя проводилась реєстрація і обробка сигналів АЕ. Акустико-емісійний комплекс складався з приладу АЕ-109М, який мав вивід інформації на два самописних пристрої типу Н306 і персональний комп'ютер (ПК). Первинне перетворення інформації виконувалось за допомогою датчика, який був виготовлений з п'єзокераміки ЦТС-19. Датчик встановлювався на хвилевід, що мав жорсткий контакт з нерухомим зразком пари тертя. Сигнал на виході датчика слабкий для обробки електронною апаратурою. Тому проводилося його підсилення та виділення на фоні завад з використанням попереднього підсилювача. Частотний діапазон реєстрованих сигналів АЕ знаходився в межах 500 кГц – 1 МГц. Основними оброблювальними параметрами сигналів АЕ, що реєструються, були: усереднена амплітуда, усереднена потужність і усереднена накопичена потужність. Час усереднення становив 0,2 с. Цей час вибирався з умови необхідності узгодження швидкості надходження інформації на АЕ апаратуру і швидкості її виведення після обробки на самописні прилади. 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.

У разі досягнення граничного рівня АЕ параметра, наприклад, потужності, що накопичується, відбувається автоматичне скидання інтегровального ланцюга. Після цього процес накопичення потужності повторюється. В результаті процес накопичення усередненої потужності сигналів АЕ виводиться у вигляді пілкоподібних кривих із різними кутами нахилу.

У процесі досліджень також проводився аналіз структурного стану та хімічного складу МКШ. Для цього використовувався растровий електронний мікроскоп-аналізатор «CamScan-4DV» при збільшенні $\times 3500$.

Результати досліджень

У процесі контактної взаємодії пар тертя у разі прикладеного напруження в 1000 МПа відбувається поступовий їх перехід в режим сталого зношування, яке добре спостерігається на залежностях зміни реєстрованих параметрів (рис. 1).

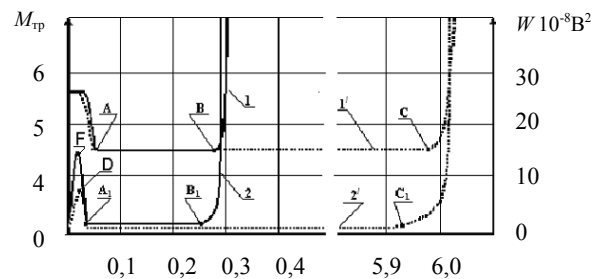


Рис. 1. Залежності зміни в часі моменту тертя $M_{тр}$ (1, 1') та усередненої потужності сигналів АЕ (W) (2, 2'):

1, 2 – зразок з витримкою 30 дБ; 1', 2' – зразок з витримкою 10 дБ;

A, A' – момент переходу в “квазібезносний” режим тертя; B, B' – момент виникнення задиру

На рис. 1 показано залежності зміни моменту тертя для першої (рис. 1, крива 1) та другої (рис. 1, крива 2) пар зразків, а також залежності зміни усередненої потужності сигналів АЕ відповідно криві 1' та 2' (рис. 1). Точками A, A₁ на рис. 1 позначено момент переходу з режиму вторинного припрацювання в “квазібезносний” сталий режим за моментом тертя та сигналами АЕ. Точками B, B₁ позначено момент виникнення задиру для першої пари зразків, який реєструвався відповідно за моментом тертя $M_{тр}$ та усередненою потужністю сигналів АЕ (W). Точками C, C₁ на рис. 1 позначено момент виникнення задиру для другої пари зразків, який реєструвався відповідно, за моментом тертя $M_{тр}$ та усередненою потужністю сигналів АЕ (W). Режим сталого зношування характеризується стабілізацією значень $M_{тр}$ для всіх досліджуваних пар зразків на рівні 4,6 Н/м (рис. 1, точка A).

У момент переходу зразків на “квазібезносний” режим роботи проводилося відсмоктування масла з ванни. Подальша робота пар тертя відбувалась до настання задиру.

З отриманих результатів видно, що тривалість “квазібезносного” режиму тертя до виникнення задиру різна для всіх досліджуваних пар тертя. Так, для першої пари зразків тривалість, яка визначалась за моментом тертя, становила приблизно 18 хв (рис. 1, точка *B*), а для другої пари тертя – приблизно 6 год (рис. 1, точка *C*). Для другої пари зразків тривалість “квазібезносного” режиму дорівнювала тривалості роботи пари тертя з МКШ, який був утворений безпосередньо в процесі проведення досліджень. У той же час, момент появи задиру, визначений за сигналами АЕ для досліджуваних пар зразків, становив 14 хв (рис. 1, точка *B*) та 5,9 год (рис. 1, точка *C*) відповідно.

Отримані результати також показали, що процес вторинного припрацювання є однаковим для другої та третьої пар зразків, але відрізняється від першої пари зразків, що спостерігаються не за зміною моменту тертя, а за зміною усередненої потужності сигналів АЕ (*W*). Для першої пари зразків зміна *W* становила $14,8 \times 10^{-8}$ В (рис. 1, точка *F*), а для другої та третьої пар зразків приблизно дорівнювала $6,2 \times 10^{-8}$ В (рис. 1, точка *D*). Більша усереднена потужність сигналів АЕ для першої пари зразків свідчить про більшу інтенсивність їх зношування, що узгоджується з даними, які наведено в праці [6]. Слід також зазначити, що час появи задиру за сигналами АЕ фіксується на 15–20 % раніше, ніж за моментом тертя. Значно більша усереднена потужність сигналів АЕ, що реєструються, менша тривалість “квазібезносного” режиму роботи, менший час до фіксації моменту виникнення задиру свідчать про низьку стійкість МКШ, що мав 30-денну витримку. Це пов’язано з релаксацією внутрішніх напружень у поверхневому прошарку МКШ, які впливають на його фізико-механічні характеристики. Металографічні дослідження поверхневого прошарку МКШ після його утворення показали, що його рельєф гладкий (рис. 2, *a*).

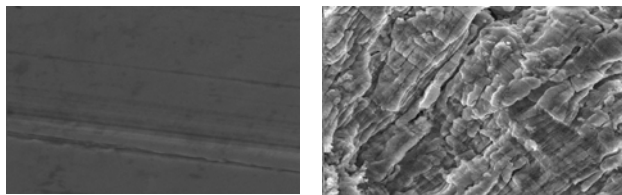


Рис. 2. Фрактографія поверхні МКШ:
a – зразок із витримкою 10 діб; *б* – зразок із витримкою 30 діб

Він являє собою скло, яке армовано здрібненими продуктами зносу, основну частину яких становить корунд Al_2O_3 (див. таблицю).

Хімічний склад МКШ, %

Елемент	Зразок з витримкою, доба	
	10	30
Si	82,747	2,943
Al	9,943	95,747
Fe	2,548	0,548
Cu	1,762	0,762

У той же час після витримки 30 діб рельєф поверхні змінюється. Він має складну гребінчастоподібну форму (рис. 2, *б*). По всій поверхні зразка спостерігається характерний напрям макропластичного зсуву, який збігається з напрямом переміщення рухомої частини пари тертя, і мікротріщини, розмір яких відрізняється. Хімічний аналіз поверхневого прошарку досліджуваного МКШ також показує зміну його складу. При цьому основним елементом на поверхні зразка є Al (див. таблицю). Подібні зміни, які спостерігаються на поверхні МКШ, очевидно, пов’язані з руйнуванням його поверхневого прошарку (скла), що може бути викликано релаксацією внутрішніх напружень, з урахуванням існування в поверхневому прошарку концентраторів у вигляді здрібнених продуктів зносу.

Процес тертя відбувається при значних механічних напруженнях кручення, розтягування, стиску і подовжнього вигину, що призводить до виникнення високих температур. Причому останні, як відомо із праці [12], різні за товщиною поверхневого прошарку матеріалу. Тому в процесі охолодження виникають залишкові внутрішні напруження [12]. Їх релаксація в часі з урахуванням концентраторів напружень у вигляді часток зносу призводить до розтріскування крихкого поверхневого прошарку МКШ (скла) і його руйнування. Крім того, релаксація напружень приводить і до виникнення мікротріщин в більш пластичному прошарку МКШ з основною складовою Al, що добре спостерігається на поверхні пари тертя (рис. 2, *б*). У разі існування міцного адгезійного зчеплення проміжного прошарку, значну частину якого складає Al, з основним матеріалом пари тертя розвиток мікротріщин в проміжному прошарку може приводити до виникнення зародків мікротріщин і в основному матеріалі. Таке порушення поверхневої структури МКШ зразків призводить до того, що при повторному проведенні тертя в умовах значного навантаження виникнення задиру відбувається значно раніше, ніж в зразках без порушення структури.

Така фіксація задиру спостерігається за результатом реєстрації як моменту тертя, так і усередненої потужності сигналів АЕ (рис. 1). Однак за АЕ виникнення задиру фіксується значно раніше.

Висновок

Результати проведених досліджень показали, що при тривалому простої пар тертя з МКШ відбувається зміна їх експлуатаційних властивостей, тобто зменшується їх стійкість до виникнення задиру. Це пов'язано з тим, що в процесі тривалої витримки пар тертя руйнується їх поверхневий прошарок МКШ (скла), виникають мікротріщини в проміжному пластичному прошарку МКШ та зародки або мікротріщини в основному матеріалі.

Такі видозміни поверхневого прошарку можуть бути викликані релаксацією залишкових внутрішніх напружень системи „основний матеріал – МКШ”, які виникають за рахунок високих напружень і температур.

Аналіз залежностей зміни моменту тертя й усередненої потужності сигналів АЕ показав більш значну чутливість методу АЕ до інтенсивності зношування пар тертя. Причому початок зародження і розвитку задиру за сигналами АЕ фіксується значно раніше, ніж за моментом тертя. Це дозволяє використовувати АЕ інформацію для контролю та діагностики складних триботехнічних систем безпосередньо в процесі їх експлуатації.

Література

1. *Аратский П.Б., Кансаров А.Г.* Применение геомодификаторов трения для увеличения ресурса работы металлообрабатывающего инструмента // Трение, износ, смазка. – 2001. – №1. – Т. 3. – С. 32–37.
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. – №2. – Т. 2.
3. *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. – 2004. – Vol. VIII, #1. – P. 8–12 (Vilnius, Lithuania).
4. *Максимов Н.А., Секистов В.А.* Двигатели самолётов и вертолётотв. Основы устройства и лётной эксплуатации. – М.: Воениздат, 1977. – 343 с.
5. *Свириденко А.И., Калмыкова Т.Ф., Холодильников О.В.* Исследование фактической площади фрикционного контакта полимер-металл с помощью акустических колебаний // Трение и износ. – 1980. – № 5. – Т.1. – С. 898–907.
6. *Свириденко А.И., Мышкин Н.К.* Акустические и электрические методы в триботехнике / Под ред. В.А. Белого. – Минск: Наука и техника, 1987. – 280 с.
7. *Стадниченко В.М., Стадниченко М.Г., Джус Р.М., Чотий Л.Ю.* Вибір інформативних параметрів АЕ для структурної побудови автоматизованої системи контролю процесів зношування // Вопр. проектирования и производства ЛА: Сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосмич. ун-т им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. – 2003. Вып. 34(3). – С. 96–103.
8. *Бабак В.П., Стадниченко В.М., Филоненко С.Ф.* Дослідження пар тертя з трибовідновлювальними сумішами методом акустичної емісії // Вісн. НАУ. – 2004. – №3(21). – С. 3–8.
9. *Опис. изобр. к пат. РФ: RU 2135638 С1, 6 С 23 С 26/00, С 10 М 125/00.* Способ образования защитного покрытия, избирательно компенсирующего износ поверхностей трения и контакта деталей машин / И.В. Никитин; 26.11.98. – 10 с.
10. *Справочник по триботехнике.* В 3 т. / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – Т. 1: Теоретические основы. – 400 с.
11. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
12. *Кацеев В.Н.* Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 213 с.

Стаття надійшла до редакції 31.03.05.

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

Влияние поверхностных свойств металлокерамических слоев на акустическую эмиссию

Исследовано влияние простоя на эксплуатационные свойства пар трения с металлокерамическим поверхностным слоем. Предложено использование информации акустической эмиссии для контроля и диагностики сложных триботехнических систем непосредственно в процессе их эксплуатации.

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

The influence of superficial properties of ceramic-metal layers on acoustic emission

The influence of idle time on operational properties of friction pairs with ceramic-metal superficial layers is investigated in this article. The application of AE information for the control and diagnostics of complex tribotechnical systems directly during their operation is offered.