

УДК 691.891

В.В. Запорожець¹, В.М. Стадніченко¹, О.М. Трошін², В.В. Варваров², М.Г. Стадніченко²¹Національний авіаційний університет, Київ²Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ПРИСКОРЕНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ НАНОПОКРИТТІВ В ТРІБОСИСТЕМАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

В даній статті викладено методика прискореної оцінки тріботехнічних характеристик іонно-плазмових покриттів при випробуваннях на тертя та зношування за схемою випробувань «плоскість-диск» яка дозволяє проводити прискорені випробування на достатньо високих питомих навантаженнях. Для реєстрації зношування в реальному масштабі часу з використанням методу акустичної емісії.

Ключові слова: трібосистема, іонно-плазмові покриття, акустична емісія, зношування.

Вступ

Серед методів, які підвищують зносостійкість деталей в літакобудуванні і пов'язаного з ним агрегатобудуванні особливе місце займають іонно-плазмові технології покриттів. Важливим етапом впровадження цих покриттів є проведення випробувань на зносостійкість і задиростійкість. Традиційні методи випробувань (ГОСТ23.001–2004) є неприпустимими із-за незначної товщини покриттів, крім того, висока їх зносостійкість значно збільшує час проведення випробувань. Низька точність традиційних методів вимірювання зносу (лінійний, метод штучних баз, ваговий) вимагає багатократного проведення експериментів для підвищення точності і статистичної оцінки їх результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для ефективної діагностики технічного стану трібосистем в процесі лабораторних випробувань і експлуатації необхідно використовувати показники, що дозволяють визначати швидкість зношування і перехід до різних механізмів руйнування, у тому числі і до задиру. Відповідно до результатів робіт [1], показниками, що визначають швидкість зношування, є різного роду енергетичні критерії, оскільки вони є критеріями, які відображають дисипацію (зміну) енергії при терті. В розвитку даного напрямку в останній час велику увагу приділяється прискореним методам оцінки зносостійкості [1, 2].

Мета і постановка задачі. В роботі викладена методика проведення прискореної оцінки тріботехнічних характеристик іонно-плазмових покриттів на машині для випробувань на тертя та зношування 2070 СМТ-1 за схемою випробувань «плоскість-диск» яка дозволяє проводити прискорені випробування на достатньо високих питомих навантаженнях в умовах граничного тертя, згідно з ГОСТ23.001-2004.

Виклад основного матеріалу дослідження

Одним із недоліків випробувань на зношування за схемою «плоскість-диск» є нерівномірність роз-

поділення навантаження по лінії контакту за рахунок деформації валів машини тертя, а також люфту в опорному підшипнику рухомого валу. Для виключення даного недоліку розроблений пристрій (рис. 1), який представляє собою каретку з отвором для кріплення на нерухомий вал машини тертя. В основі каретки є опорні виступи з отворами які розташовуються осі пристрою для кріплення випробувальних зразків. При збільшенні навантаження відбувається пружна деформація валів в цьому випадку пристрій для кріплення зразків орієнтується за напрямком рухомого зразка. Таким чином досягається рівномірне розподілення навантаження за лінією контакту трібосистеми «плоскість-диск».

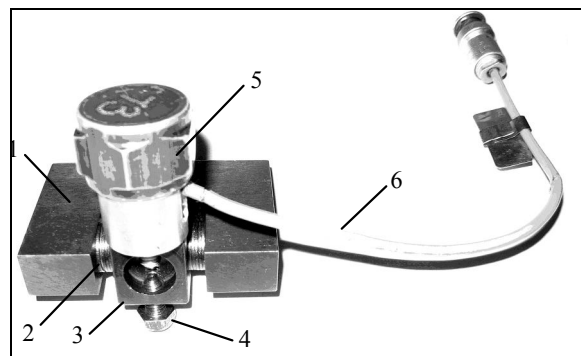


Рис. 1. Пристрій для прийому сигналів акустичної емісії для кінематичної схеми випробувань «диск-куб»: 1 – каретка; 2 – вісь; 3 – самоустановлювальний по потоку утримувач зразка; 4 – болт кріплення зразка; 5 – корпус з датчиком акустичної емісії з хвилеводом; 6 – високочастотний кабель від датчика акустичної емісії

Сучасні досягнення в області розробки нанотехнологій дозволила збільшити зносостійкість поверхневого шару на декілька порядків в зв'язку з цим виникли труднощі в порівняльній оцінці їх тріботехнічних характеристик. Для подолання проблеми останнім часом для вимірювання зношування використовується метод акустичної емісії.

В якості критерію для оцінки швидкості зношування використовувалась усереднена потужність сигналів акустичної емісії яка є інтегральною величиною амплітудного розподілу сигналів акустичної емісії за певний період часу реєстрації. Даний параметр вимірюється у відносних інформаційних одиницях про зношування. Величина усереднювання встановлювалась [2], відповідно до досліджень проведеними раніше (крок квантування за часом) і складає 20 мс.

Як показують результати дослідження на зносостійкість іонно-плазмових покриттів при переході від нормального зношування до патологічних явищ таких наприклад як піттингових руйнувань де відбувається значне збільшення амплітуди акустичної емісії (рис. 3).

Програма виконує підрахунок швидкості зношування за обраний інтервал часу і виконується інтегрування рівнів сигналів за цей період, вибудовує залежності швидкості зношування за цей період часу. У відповідності описаному вище методикою сигнал усередненої потужності, квантований за часом може інтегруватись до деякого фіксованого рівня.

Для отримання значення масового, лінійного і іншого виду зношування в абсолютних величинах

необхідно визначити параметр питомої емісійної активності. Рівень порогу інтеграції усередненої потужності відповідає фіксованій величині зносу, що визначається відповідно до робіт [3-5] за лінійною залежністю:

$$I_{n_{\text{кв}}} = W_{\text{ус}} \xi_{\text{AE}} + b,$$

де ξ_{AE} – коефіцієнт пропорційності, названий питомою емісійною активністю даного трібоспряження; b – постійна, така, що є величиною зносу, яка залишається за межами чутливості каналу вимірювання і обробки сигналів акустичної емісії.

Приведені експериментальні дослідження при різних швидкостях обертання приводного валу машини тертя показали необхідність приведення усередненої потужності акустичної емісії до одного і того ж шляху тертя, оскільки щільність потоку енергії J_W сигналів акустичної емісії зростає із збільшенням швидкості ковзання елементів трібосистеми згідно залежності [6]:

$$W_{\text{ус}} = \frac{J_W}{2T},$$

де $2T$ – період реєстрації J_W .

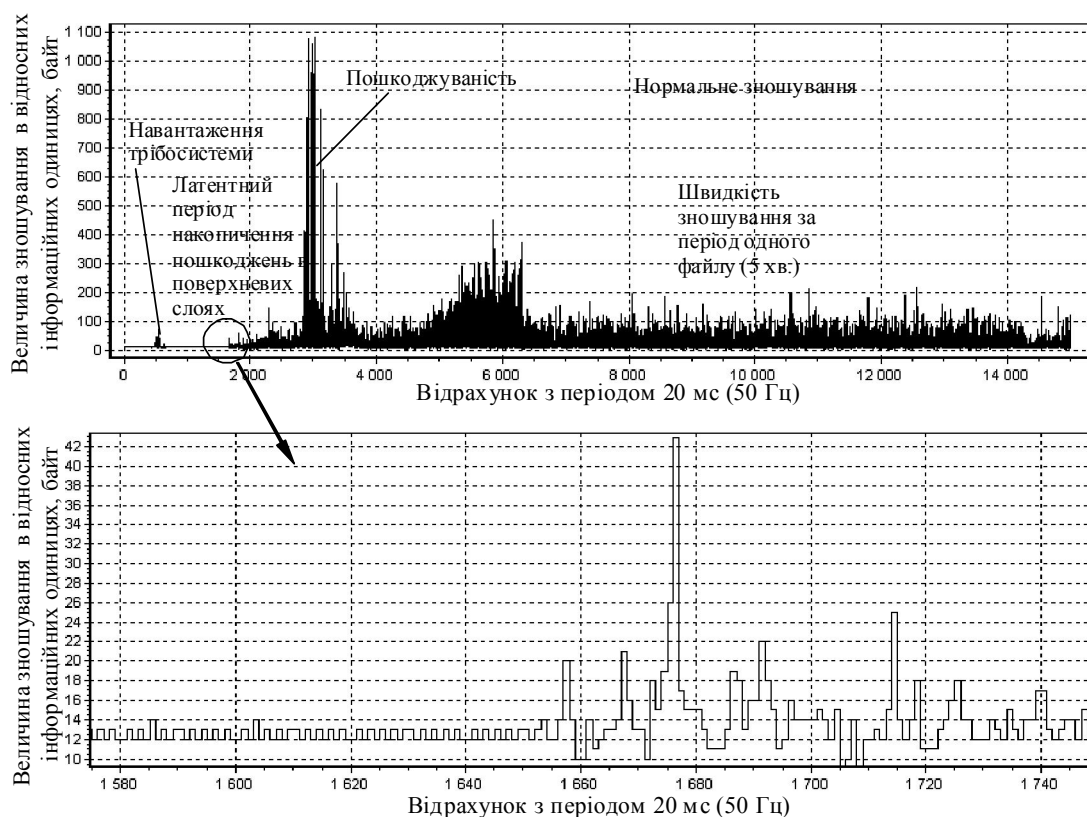


Рис. 3. Діаграма вимірювання швидкості зношування за перші 5 хвилин роботи трібосистеми у відносних інформаційних одиницях

Із тієї ж роботи [6]:

$$J_W = \eta \frac{k_\phi \sigma_0^2 v n_s}{f_\tau (1 - k_\phi)} \cdot e^{-\left[\frac{\sigma_0}{b f_\tau} + 8\pi^2 \gamma R (1 - k) \right]}, \quad (1)$$

де k_ϕ – коефіцієнт форми; σ_0 – питома поверхнева енергія; v – швидкість переміщення поверхонь трібоспряження; n_s – концентрація часток зносу; f_τ – питома сила тертя; b – розмір осцилятора в напрямі

перпендикулярному напрямку руху; γ – коефіцієнт поглинання середовища; R – радіус трібоелемента.

Вочевидь, що усереднена потужність акустичної емісії W_{yc} залежить від ряду чинників і важко піддається обчисленню. Для візуалізацій динаміки зношування використовується квантування за рівнем. Енергетичні випромінювання в трібосистемах залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів, і враховується питома емісійна активність. Питома емісійна активність трібосистеми визначається після проведення тестових випробувань на зношування, і може бути обчислена за формулою:

$$\xi_{AE} = \frac{I_{\Sigma}}{W_{cp}z},$$

де I_{Σ} – сумарний знос; z – загальне число наборів квантового рівня W_{yc} на всьому шляху тертя; на зазначеному шляху тертя.

Таким чином, величина сумарного зносу трібосистеми за будь-який період випробувань може бути розрахована за формулою:

$$I_{\Sigma} = I_{n_{KB}} z.$$

Рівень квантування відповідає фіксованій величині зношування, що визначається виразом (1) як:

$$I_{n_{KB}} = W_{yc} \xi_{AE} z.$$

Величина сумарного зносу за будь-який період випробувань може бути розрахована за формулою:

$$I_{\Sigma} = W_{yc} \xi_{AE} z. \quad (2)$$

З виразу (2) може бути визначена питома емісійна активність:

$$\xi_{AE} = \frac{I_z}{W_{yc}(x)z}.$$

За своїм фізичним змістом питома емісійна активність є величиною зносу трібоспряження за інтервал часу набору усередненого значення квантового рівня W_{yc} .

Як зазначено вище, однією з головних умов реєстрації усередненої потужності сигналів акустичної емісії за даним каналом є реєстрація сигналів відповідних за рівнем виду зношування трібосистеми. Це обмеження реалізується рівнем дискримінації сигналів акустичної емісії за амплітудою. Таким чином, реєструючи усереднену потужність сигналів акустичної емісії, вдається з високою точністю визначити динаміку процесів зношування трібосистеми на різних етапах його роботи та визначити величину сумарного зносу трібосистеми за будь-який період випробувань.

Для оцінки похибки вимірювання методом акустичної емісії зазвичай виділяють три групи похи-

бок: інструментальні, методичні, та похибки статистичного характеру. Проте, в випадку вимірювання методом акустичної емісії окрім вказаних доповнюються похибки квантування за часом квантування і за рівнем квантування. Решта похибок мають конкретний, несистемний характер і загалом несуттєво впливають на результати вимірювання за методом акустичної емісії, [7]. При квантуванні за часом сигнал фіксується тільки в деякі моменти часу; у випадку обмеженості спектру сигналу використовується теорема Котельникова, згідно з якою будь-який безперервний сигнал повністю визначається своїми дискретними значеннями в моменти відліку, що відстоять один від одного на інтервал:

$$\Delta t_{\max} = \frac{\pi}{\omega_B} = \frac{1}{2} f_B,$$

де Δt_{\max} – максимальний крок квантування; ω_B – верхня гранична кутова частота, [рад/с]; f_B – верхня гранична частота, [Гц].

Математично теорема Котельникова має вигляд:

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x(k\Delta t) \frac{\sin \omega_B(t - k\Delta t)}{\omega_B(t - k\Delta t)},$$

де $x(t)$ – безперервний сигнал акустичної емісії.

Числові розрахунки згідно [8] показують, що при відносній похибці амплітуди сигналу порядку 1% відносна точність кроку квантування за часом дорівнює 0,1%. При квантуванні сигналу акустичної емісії за рівнем виникає помилка в значеннях, які обумовлені заміною реального значення сигналу допустимим рівнем. Ця похибка не може бути усунена і вона є наслідком квантування. При цьому можна вважати, що квантований сигнал $x(t)$ та похибки Δx_k сумують:

$$x_k(t) = x(t) + \Delta x_k,$$

а операцію квантування трактують як проходження сигналу через встановлений рівень $x_k(t)$, називають «шумом квантування».

Максимальна похибка квантування за рівнем

$$G_{\max} \delta/2,$$

де δ – крок квантування за рівнем.

В [8] показано, що при $\delta = x_{\max}/100$, коефіцієнт варіації V_{δ} за рахунок квантування за рівнем:

$$V_{\delta} = \frac{\sigma_{\delta}}{\bar{x}} = \frac{x_{\max} \cdot 100}{100 \sqrt{12} \cdot x_{\max}/2} \approx 0,7\%.$$

Статистична похибка із-за кінцевої тривалості спостереження випадкового процесу без знання виду кореляційної функції δ_f може бути знайдена за формулою:

$$\delta_f \sqrt{\theta} = \sqrt{2 \sum_1^n \frac{1}{v!} [\Phi_v(\xi)] / [\Phi(\xi)]}$$

де $\theta = T/\tau_{\text{кк}}$, T – тривалість спостереження, $\tau_{\text{кк}}$ – інтервал кореляції досліджуваної функції $x(t)$;

$\Phi_v(\xi) - v - a$ – похідна від інтегралу імовірності

$\Phi(\xi)$, $\xi = \frac{x}{\sigma_x}$:

$$\Phi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}\xi^2} d\xi$$

Визначення $\Phi_v(\xi)$ здійснюють за допомогою поліномів Ерміта, [9].

Практичні розрахунки показують, що похибка δ_f в середньому не перевищує 1,2%.

У роботі [10] показано, що при обмежені тривалості сигналів акустичної емісії при $m = 5$ і $q = 8$, величина похибки енергії і потужність сигналів при різних механізмах руйнування поверхневого шару не перевищує 0,002%.

Отже, метод акустичної емісії достатньо точний і похибки системного характеру не суттєво впливають на нього. Це зумовлює умови використання методу акустичної емісії для розрахунку підвищення ресурсу техніки яка експлуатується після використання нових матеріалів.

Результати експериментальних випробувань. Трібологічні випробування на тертя та зношування проводилися на автоматизованій системі трібодіагностики на базі удосконаленої серійної машини тертя 2070 СМТ-1, за схемами «кільце-кільце», «плоскість-диск». Кільце-кільце – для традиційних випробувань на зносостійкість. Зразки для традиційних і прискорених випробувань виконані зі сталі 30Х3ВА, рухоме кільце виконано з азотуванням і твердістю 780 HV, а не рухоме кільце без термообробки з нанесенням на нього іонно-плазмового покриття. Схема випробувань плоскість-диск, плоскість куба виготовлена зі сталі 30Х3ВА без термообробки, на нього наносилося іонно-плазмове покриття на основі MoN різної товщини (1 трібосистема: 3 – 5 мкм; 2 трібосистема: 7 – 10 мкм; 3 трібосистема: 12 – 15 мкм; 4 – базова трібосистема – без покриття), для всіх трібосистем диск зі сталі 30Х3ВА, азотований, твердістю 780 HV з покриттям TiAlN, товщина нанесеного шару 10 – 15 мкм.

Методика випробування стандартизована. Режим тертя граничне мащення. Форма і розміри зразків для моделі тріботех-

нічних випробувань відповідали вимогам ДСТУ 30480-97 з коефіцієнтом взаємного перекриття $K_{\text{вз}}=0,88$. Основні тріботехнічні характеристики середня поверхнева температура, момент тертя з перерахунком в коефіцієнт тертя. Величина навантаження на зносостійкість – 600 Н, швидкість ковзання – 0,4 м/с. Час випробувань 8 годин, Зношування вимірювалося ваговим методом з точністю до 10^{-5} г.

Прискорені випробування проводили при тій же швидкості ковзання, що і при традиційних випробуваннях. Величина навантаження змінювалась в процесі випробування з кроком 100 Н, з витримкою на кожній ступені 10 хв. Схема випробування плоскість-диск у відповідності з ГОСТ23.001-2004. Конструктивне виконання пристрою, рис. 1, дозволяє зсовувати куб по лінії контакту і проводити на одній грані куба три випробування, а в цілому на одному кубі 12 випробувань, це приводить до значної економії матеріальних ресурсів у порівнянні з традиційним підходом.

Випробування проводили до прояву явищ задирки, який контролювався методом акустичної емісії, і моментом тертя, або перевищення експлуатаційної температури оливи. Випробування зупиняли при збільшенні експлуатаційної температури оливи $M 10Г_2К (100^\circ \text{C})$.

Результати прискорених випробувань на задиростійкість і зносостійкості представлені на рис. 4, 5.

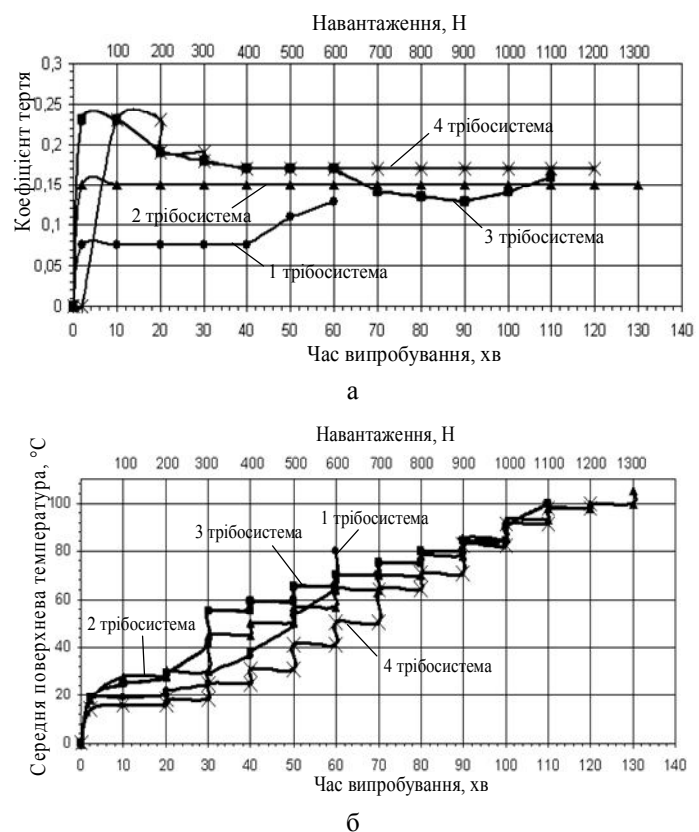


Рис. 4. Прискорені випробування на задиростійкість: а – коефіцієнти тертя; б – середня поверхнева температура

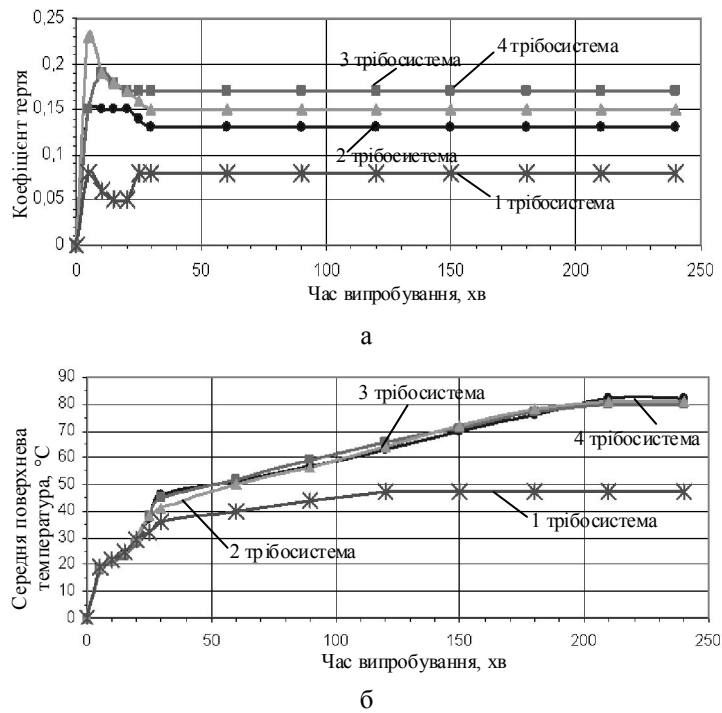


Рис. 5. Випробування на зносостійкість:
а – коефіцієнти тертя;
б – середня поверхнева температура

Для порівняльної оцінки зносостійкості покриттів в процесі проведення випробувань реєстрували рівень акустичної емісії у реальному часі. Після випробування проводили інтегрування сигналу акустичної емісії за термін 60 хв. (навантаження 600 Н) будувалися діаграми швидкості зношування у відносних інформаційних одиницях (рис. 6, а) а також діаграми зношування випробуваних трібосистем за час 480 хв.

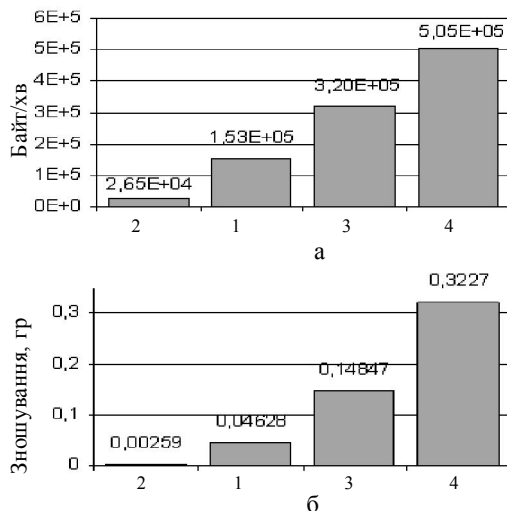


Рис. 6. Порівняльна характеристика зносостійкості використовуваними методами для обраних трібосистем:
а – використання методу акустичної емісії;
б – використання вагового методу.
1, 2, 3, 4 – трібосистеми

Результати порівняльної зносостійкості по даним методикам представлені на рис. 7 корелюють між собою по сумарному значенню зносостійкості.

За результатами прискорених випробувань встановлено залежність зносостійкості випробовуваних іоно-плазмових покриттів від їх товщини нанесення. З проведених тестових випробувань найбільш оптимальною товщиною покриття MoN нанесеного на пластичну основу є 2 трібосистема: 7 – 10 мкм.

Для 1 трібосистеми були показані кращі фрикційні характеристики, однак протизносні характеристики знижувались за рахунок пітингових руйнувань, що було встановлено за результатами фактографічного аналізу, рис. 7.

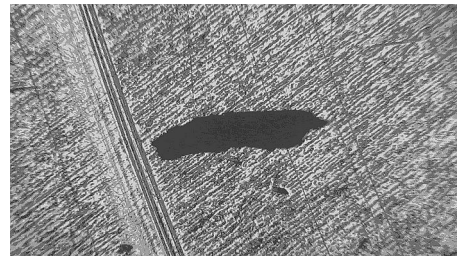


Рис. 7. Фрактографія поверхні тертя з пітинговим руйнуванням х300

Таким чином використання прискореної методики у 8 раз зменшує час випробувань до того при значній економії матеріальних затрат на виконання зразків для випробування.

Приклад діаграми швидкості зношування за період випробування відображено на рис. 8.

Висновки

1. Таким чином використання методу акустичної емісії є надзвичайно ефективним інструментом в економії матеріальних засобів і часу при впровадженні нових матеріалів у виробництво.

2. Створено теоретичні основи для статистичної обробки акустичної емісії випромінювання в ході довготривалих випробувань на тертя та зношування широкого класу трібосистем.

Список літератури

1. Маркова Л.Ф. Перспективи розвитку трибодіагностики / Л.Ф. Маркова // *Трение и износ.* – 2006. – Т. 11, № 7. – С. 175-184.
2. Бабак В.П. Непрерывный контроль процессов трения и изнашивания на основе использования метода акустической эмиссии / В.П. Бабак, В.Н. Стадниченко, В.А. Войтов, Р.Н. Джус, Н.Г. Стадниченко // *Технологические системы.* – 2004. – № 2. – С. 42-46.
3. Березняков А.И. О взаимосвязи характеристик акустического излучения поверхности трибосоприлегания с трибологическими параметрами / А.И. Березняков, В.Н. Стадниченко // *Трение и износ.* – 1998. – Т. 19, №3. – С. 312-317.

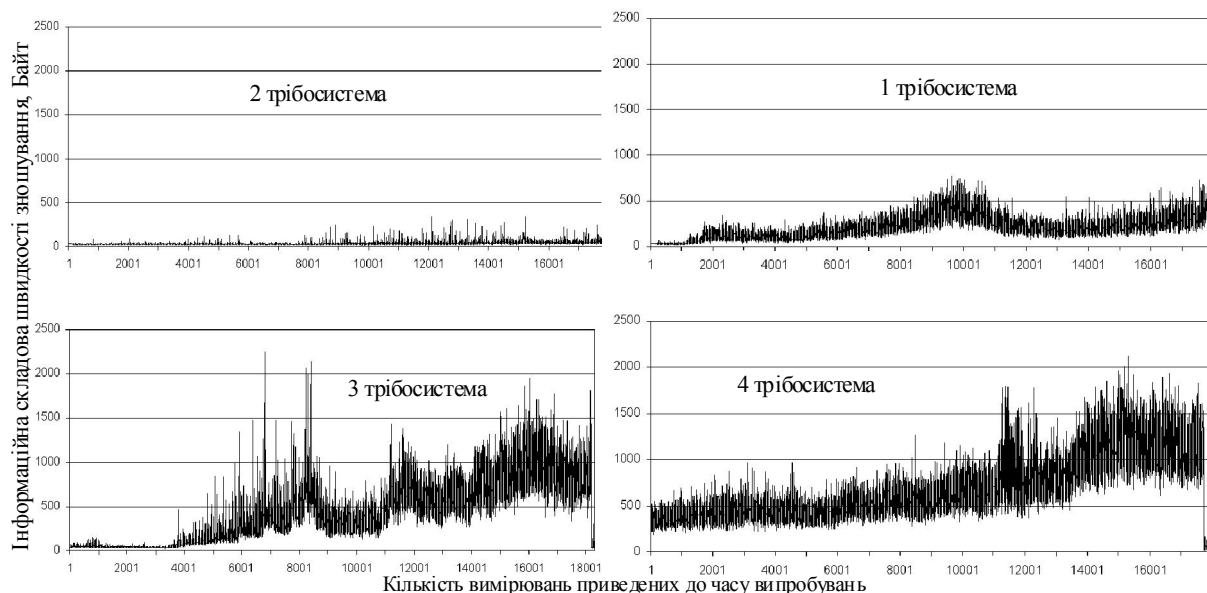


Рис. 8. Діаграма зміни швидкості зношування у відносних інформаційних одиницях про зношування

4. Сарычев Г.А. Влияние внешних факторов на ультразвуковое излучение при трении / Г.А.Сарычев, М.К. Шахновский, В.М. Щавелин. – В кн.: Методы и средства исследования материалов и конструкций в радиационных полях. – М.: Энергоиздат. – 1982. – С. 56-64.

5. Войтов В.А. Применение метода акустической эмиссии для диагностики процессов изнашивания материалов / В.А. Войтов, В.Ф. Тесля, О.М. Белас, М.М. Краснощеков // Зб. науч. тр. АН УССР. – К.: Ин-т пробл. литя. – 1988. – С. 80-85.

6. Березняков А.И. О взаимосвязи характеристик акустического излучения поверхности трибосопряжения с трибологическими параметрами / А.И. Березняков, В.Н. Стадниченко // Трение и износ. – 1998. – Т.19, №3. – С. 312-317.

7. Fleischer G. Verschleiss und zukerlassigkeit veb / Fleischer G., Groges H., Thum H. – Berlin: Verlag Technik, 1980. – 244 p.

8. Измерение вероятностных характеристик случайных процессов с применением стохастических вычислительных устройств / под ред. В.Г. Корчагина. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. – 128 с.

9. Ливищ Н.А. Вероятностный анализ систем автоматического управления / Н.А. Ливищ, В.Н. Пугачев. – М.: Советское радио, 1963. – 896 с.

10. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Под общей редакцией Семашко Н.А. – М.: Машиностроение, – 2002. – 240 с.

Надійшла до редколегії 13.07.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Калкманов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

УСКОРЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАНОПОКРЫТИЙ В ТРИБОСИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В.В. Запорожец, В.Н. Стадниченко, О.Н. Трошин, В.В. Варваров, Н.Г. Стадниченко

В данной статье изложена методика ускоренной оценки триботехнических характеристик ионно-плазменных покрытий при испытаниях на трение и изнашивание по схеме испытаний «плоскость-диск» которую позволяет проводить ускоренные испытания на достаточно высоких удельных нагрузках. Для регистрации изнашивания в реальном масштабе времени с использованием метода акустической эмиссии.

Ключевые слова: трибосистема, ионно-плазменные покрытия, акустическая эмиссия, изнашивание.

SPEED-UP METHOD OF DETERMINATION OF WEARPROOF NANOCOVERAGES IN TRIBOSYSTEM WITH THE USE OF INFORMING PARAMETERS OF ACOUSTIC EMISSION

V.V. Zaporozhets, V.M. Stadnichenko, O.M. Troshin, V.V. Varvarov, M.G. Stadnichenko

In the given article it is laid out method of speed-up estimation of tribotechnical descriptions of ionic-plasma coverages at the tests on friction and wears after the chart of tests a «plane-disk» which allows conducting the speed-up tests on the enough high specific loading. For registration of wear in the real time with the use of method of acoustic emission.

Keywords: tribosystem, ion-plasma coverages, acoustic emission, wear.