

УДК 621.891; 620.19

О. Белас, докт. техн. наук

Національна академія наук України

ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ТРИБОСИСТЕМИ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Резюме. Викладено методологічні основи вибору методу для дослідження й контролю стану елементів трибосистеми без її зупинки і розбирання. Показано ефективність застосування методу акустичної емісії для дослідження динаміки фізико-хімічних процесів у тонких поверхневих шарах матеріалів при терті. Представлено методику, яка дозволяє проводити дослідження процесів тертя та зношування матеріалів із використанням методу акустичної емісії й судити про стан трибосистеми у будь-який момент часу її функціонування, тобто отримувати кількісну оцінку інтенсивності зношування матеріалу за значенням ентропійного параметра, а за параметром стану трибосистеми визначати момент виникнення мікропошкоджень у поверхневих шарах матеріалів, що труться, а це свідчить про перехід трибосистеми від нормального до патологічного виду зношування.

Ключові слова: трибосистема, акустична емісія, тертя, зношування, ентропія.

O. Belas

DETERMINATION OF TRIBOSYSTEM ELEMENTS CONDITION BY THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

The summary. In article are represented methodological bases of a choice of the method for research and control of tribosystem elements condition without its stop and sorting out. The efficiency of application of the acoustic emission method for research of dynamics of physical and chemical processes in surface layers of materials at friction is shown. The represented method allows to determine: significance of the wear intensity of a material in dependence on entropical parameter; the moment of transition of the tribosystem from normal to pathological appearance of wear in dependence on condition parameter of the tribosystem.

Key words: tribosistema, acoustic emission, friction, wear, entropiya.

Постановка проблеми. У зв'язку зі зростаючими вимогами до надійності й довговічності сучасних машин і механізмів, розширенням номенклатури матеріалів, що використовуються в них, важливе значення набуває розроблення високоінформативних методів і засобів контролю стану елементів вузлів тертя як в лабораторних умовах, так і в умовах експлуатації. При цьому не завжди вдається здійснити контроль за станом трибосистеми без її зупинки і розбирання. Тому актуальною проблемою є розроблення методики, що дозволить проводити дослідження динаміки фізико-хімічних процесів у поверхневих шарах матеріалів при терті.

Аналіз публікацій. Серед великої різноманітності методів трибодіагностики особливе місце належить акустичним, перваги яких очевидні. Картина акустичних процесів відображає всі види процесів деформації і руйнування при терті [1]. Їх характеристики вельми чутливі до впливу зовнішнього середовища і фізико-хімічних процесів, що відбуваються на поверхні тертя. Крім цього, до переваг акустичних методів треба віднести можливість поєднання реєструючих приладів з процесорною і обчислювальною технікою. З методів, що використовуються у трибодіагностиці, необхідно виділити метод акустичної емісії (АЕ), який може бути застосований практично до будь-яких матеріалів (металів, полімерів, кераміки та ін.), що має важливе значення.

Більшість дослідників із усіх інформативних параметрів, що реєструються при терті, вважають за краще працювати з амплітудним розподілом сигналів АЕ [1], тому що амплітуда сигналів АЕ пропорційна енергії сигналів, що виникають у процесі зародження і розвитку пошкоджень у матеріалі [2]. При цьому автори досліджень пропонують апріорно апроксимувати експериментально отриманий амплітудний розподіл сигналів АЕ одним із теоретичних законів: нормальним [3], степеневим [4], експоненціальним [5], – після чого встановлювати критерії функціонування вузла тертя. Перед початком досліджень із розроблення методики виникає природне питання про можливість і коректність використання викладеного підходу.

Постановка завдання. З урахуванням викладених уявлень проведено експериментальні дослідження, метою яких було розроблення методики, що дозволяє визначати стан елементів трибосистеми з використанням методу АЕ. Дослідження залежності параметрів амплітудного розподілу сигналів АЕ від значень триботехнічних характеристик нормалізованої сталі 45 проводили в умовах граничного змащування мастилом МС-20 при схемі сполучення пари тертя ковзання “циліндр-циліндр” при початковому герцевському контакті по лінії. Реєстрація, посилення і обробка сигналів АЕ проводилися лише за допомогою серійної апаратури, що має метрологічне забезпечення.

Блок-схема апаратури для реєстрації й обробки сигналів АЕ, що виникають при терті зразків, зображена на рис. 1. Акустичний сигнал приймався п’єзоперетворювачем ЦТС-19, який має постійну чутливість у смузі пропускання від 0,2 до 2,0 МГц, що дозволяє приймати сигнали АЕ від різних за своєю природою процесів, що відбуваються в матеріалі елементів трибоспряження. Після посилення попереднім підсилювачем сигнали подавалися на акустико-емісійний прилад АФ-15, далі – на аналізатор імпульсів АІ-4096. У процесі експерименту реєстрували швидкість рахунку сигналів АЕ та параметри амплітудного розподілу, які в подальшому оброблялися на ПЕОМ.

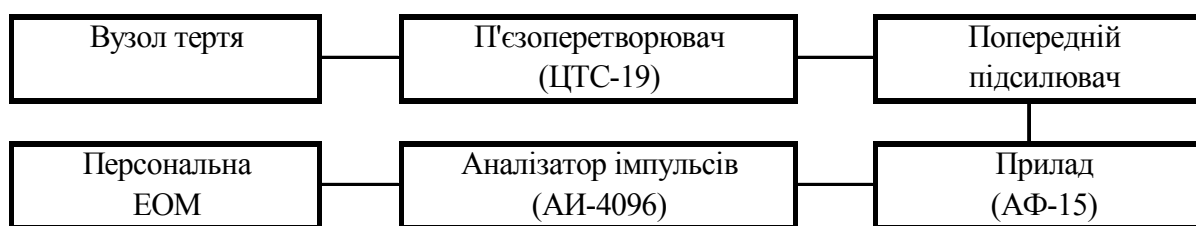


Рисунок 1. Блок-схема експерименту

Пропонується обробку амплітудних розподілів, отриманих у процесі експерименту, проводити за допомогою спеціально розробленого пакета прикладних програм, який дозволяє здійснювати низку перетворень розподілу амплітуд сигналів АЕ і розраховувати для них статистичні характеристики: математичне очікування; дисперсію; коефіцієнти асиметрії, ексцесу і варіації; моду; медіану; інформаційну ентропію, а також апроксимувати вихідний розподіл амплітуд сигналів АЕ низкою теоретичних розподілів (нормальним, логарифмічно нормальним, показовим, гамма, хи-квадрат, Вейбулла, екстремальних значень, Лапласа, Фішера, Парето). Потім перевіряли гіпотезу відповідності вихідного закону розподілу амплітуд сигналів АЕ теоретичним законам за критерієм Пірсона [6]. В результаті такої апроксимації було

встановлено, що власне вихідний розподіл не узгоджується з теоретичними в діапазоні зміни довірчої вірогідності від 0,01 до 0,95. Ступінь відповідності вихідного розподілу теоретичному оцінювали за критерієм Пірсона і порівнювали з його табличним значенням. Ні в одному з випадків, що розглядалися, гіпотеза відповідності вихідного розподілу теоретичному не підтвердилася. При цьому розрахункові значення критерію Пірсона змінювалися в межах від 43 до $37 \cdot 10^6$ (залежно від варіанта апроксимації), тоді як його табличні значення лежали в інтервалі 0,0001...33 (до числа ступенів свободи, що дорівнює 25).

Таким чином, було встановлено, що апriorне постулювати виду амплітудного розподілу сигналів АЕ при вивченні процесів тертя і зношування матеріалів можливе, але лише в окремих випадках, тому що ігнорування результатів вищевикладених досліджень може призвести до істотних помилок в оцінюванні характеру функціонування трибосистеми.

Методика досліджень. Запропоновано використовувати вихідний розподіл амплітуд сигналів АЕ, що реєструється в процесі експерименту, і розраховувати його статистичні характеристики. Для оцінювання інформативності статистичних і триботехнічних характеристик була досліджена їх залежність від навантаження тертям.

Характеристики амплітудного розподілу сигналів АЕ розділили на три групи. До першої увійшли характеристики, що відображають зміну виду зношування (дисперсія, коефіцієнти асиметрії й ексцесу). До другої – характеристики, що відображають зміну інтенсивності зношування (ентропія, мода, швидкість рахунку), тому що їх значення найтісніше корельовані зі значенням інтенсивності зношування. До третьої – слабо залежні від процесу тертя (наприклад, коефіцієнт варіації).

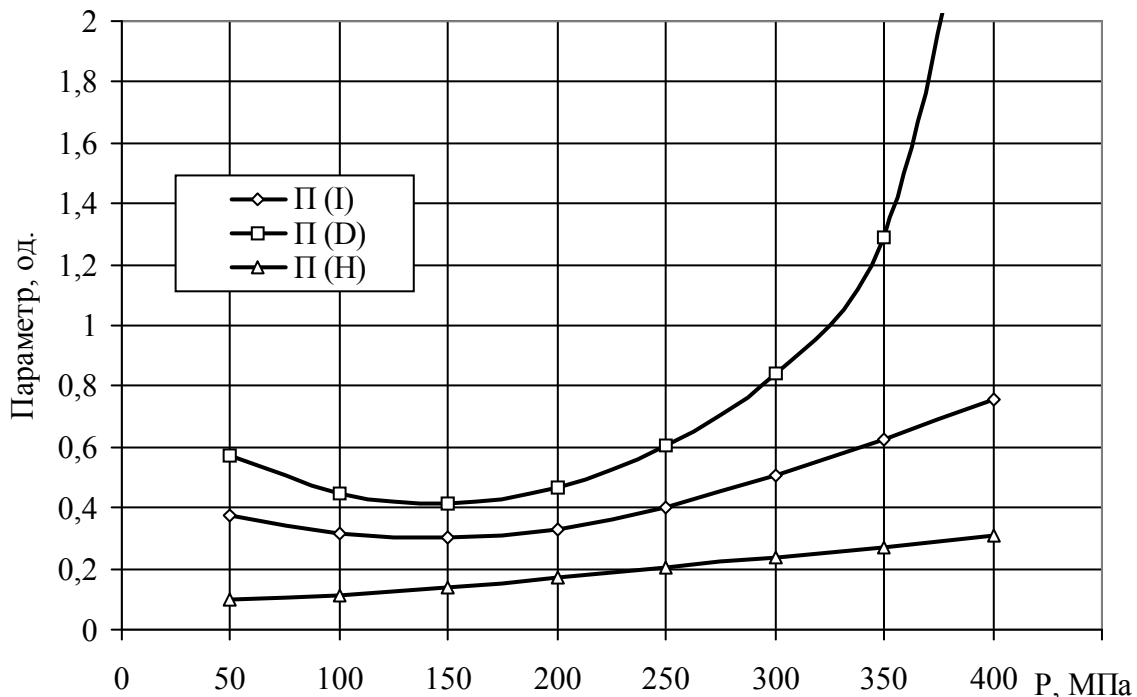


Рисунок 2. Залежність інтенсивності зношування та характеристик амплітудного розподілу сигналів АЕ від контактного навантаження на вузол тертя

Результати випробувань зразків зі сталі 45 у мастилі МС-20 показують (рис. 2), що при контактному навантаженні $P = 375$ МПа спостерігається різке збільшення такої

статистичної характеристики амплітудного розподілу сигналів АЕ, як дисперсія, при незначній зміні значень інтенсивності зношування. Очевидно, при цьому навантаженні відбувається перехід трибосистеми до іншого виду зношування, а значення контактного навантаження (375 МПа) є межею діапазону нормального зношування. При вивченні мікротопографії поверхонь тертя при даному навантаженні було виявлено виникнення мікропошкоджень (початкова пошкодженість) (рис. 3).

Ідентифікація діапазонів нормального зношування, критичних точок виникнення початкової пошкодженості й зносу схоплюванням проводилася на оже-електронному скануючому мікроаналізаторі “Jamp-10S” за методикою розробника фірми “Jeol”.

У результаті зроблено висновок, що такий діагностичний критерій, як дисперсія розподілу амплітуд сигналів АЕ, може служити параметром стану трибосистеми, тобто параметром чутливості переходу від нормального до патологічного виду зношування, тому що під час переходу трибосистеми від механохімічного виду зношування до зношування схоплюванням значення дисперсії змінюється більш ніж у 10 разів при збільшенні інтенсивності зношування на 15...20%.

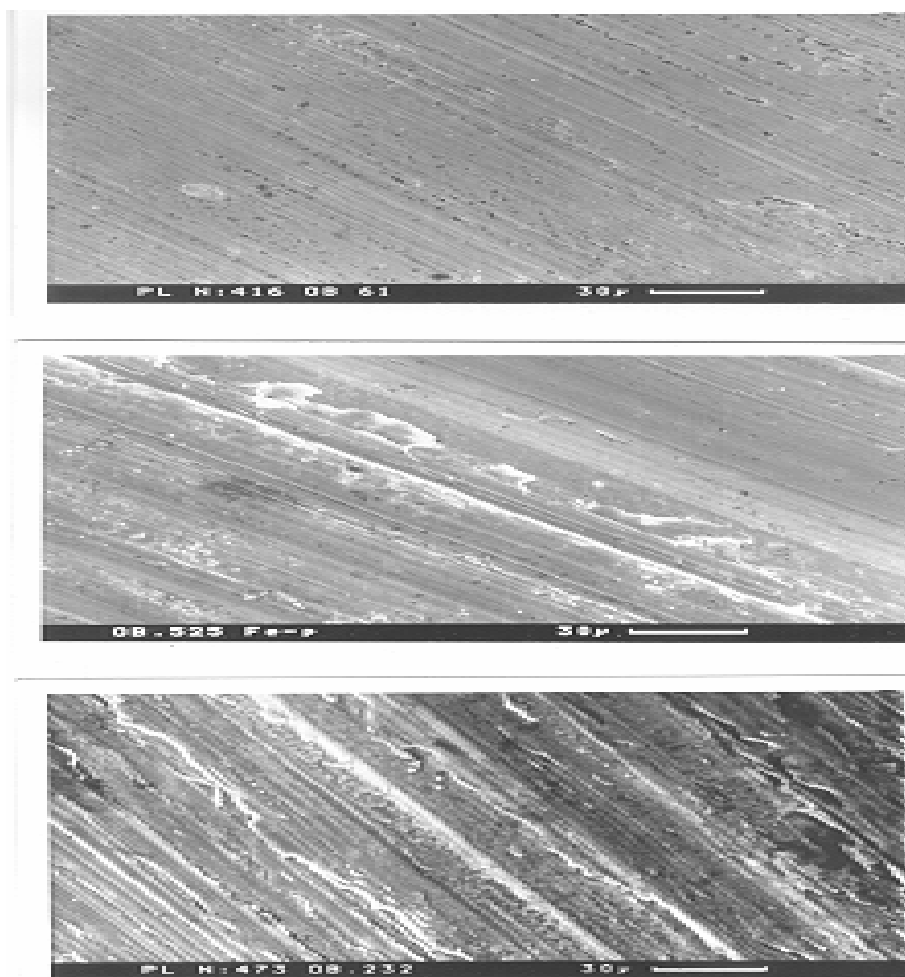


Рисунок 3. Мікрофотографії поверхонь тертя зразків зі сталі 45, випробуваних в умовах граничного змащування мастилом MS-20: а) нормальне зношування; б) початкова пошкодженість; в) пошкодженість

Зміну значень інтенсивності зношування найближче відображає інформаційна ентропія і швидкість рахунку сигналів АЕ. Що стосується швидкості рахунку, то деякі

дослідники наголошують на слабкий фізичний взаємозв'язок її з процесами, що відбуваються в трибосистемі [1]. Тому при розроленні критеріїв оцінювання стану трибосистеми з використанням методу АЕ за основу було взято ентропійно-енергетичний підхід до процесів поверхневого руйнування матеріалів [7].

Оскільки вихідний амплітудний розподіл визначається у вигляді дискретного розподілу пікових значень амплітуд сигналів АЕ по каналах аналого-цифрового перетворювача (АИ-4096), то в роботі запропоновано наступне: використовуючи вихідний розподіл амплітуд сигналів АЕ, що зареєстрований у процесі експерименту, і переходячи до розподілу густини вірогідності амплітуд сигналів АЕ, за формулою Шеннона [6] розраховувати інформаційну ентропію як міру невизначеності стану трибосистеми, яка отримала назву ентропійного параметра трибосистеми:

$$H(AE) = - \sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_2 p_i, \quad (1)$$

де $p_i = N_i / N_s$ – вірогідність появи амплітуд сигналів АЕ в i -му каналі аналізатора; n – кількість каналів аналізатора, в яких зареєстрований сигнали; N_i – число зареєстрованих сигналів в i -му каналі аналізатора; N_s – сумарна кількість зареєстрованих сигналів у розподілі.

Вибір інформаційної ентропії як ентропійного параметра тртбосистеми також можна пояснити її тісним зв'язком з термодинамічною ентропією. А враховуючи властивості інформаційної ентропії [6], можна зробити такі припущення. По-перше, інформаційна ентропія розподілу прагне нуля, коли один із станів системи достовірний, а інші – неможливі. Це відповідає нормальному виду зношування, коли вірогідність появи малих амплітуд велика, а великих – мала. По-друге, при заданому числі станів ентропія обертається в максимум, коли ці стани рівноймовірні, тобто вірогідність появи малих і великих амплітуд однакова, що відповідає виникненню мікропошкоджень у поверхневих шарах і збільшенню інтенсивності зношування. По-третє, ентропії притаманна властивість адитивності, тобто коли кілька незалежних систем об'єднуються в одну, їх ентропії складаються.

Регресійний аналіз результатів досліджень показав, що взаємозв'язок інформаційної ентропії з інтенсивністю зношування матеріалів є лінійним і може бути представлений у вигляді

$$I = A + B \cdot H(AE), \quad (2)$$

де A і B – коефіцієнти, що залежать від вибору матеріалу елементів трибосистеми та схеми контакту. Для наведених досліджень значення коефіцієнтів дорівнюють: $A = 0,147$; $B = -0,254$.

Похибка визначення інтенсивності зношування матеріалів при терті по ентропійному параметру трибосистеми не перевищувала 10 %.

Висновок. Запропонована методика дозволяє проводити дослідження процесів тертя і зношування матеріалів із використанням методу АЕ та визначати стан трибосистеми у будь-який момент часу її функціонування, тобто отримувати кількісну оцінку інтенсивності зношування матеріалу за значенням ентропійного параметра, а за параметром стану трибосистеми визначати момент виникнення мікропошкоджень у

поверхневих шарах матеріалів, що труться, а це свідчить про перехід трибосистеми від нормального до патологічного виду зношування.

Література

1. Акустические и электрические методы в триботехнике [Текст] / А.И. Свириденко, Н.К. Мышкин, Т.Ф. Калмыкова, О.В. Холодилов. – Минск: 1987. – 280 с.
2. Грешников, В.А. Акустическая эмиссия [Текст] / В.А. Грешников, Ю.В. Дробот. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
3. Кирякин, А.В. Акустическая диагностика узлов и блоков РЭА [Текст] / А.В. Кирякин, И.Л. Железная. – М.: Радио и связь, 1984. – 192 с.
4. Баранов, В.М. Акустико-эмиссионные приборы ядерной энергетики [Текст] / В.М. Баранов, К.И. Молодцов. – М.: Атомиздат, 1980. – 144 с.
5. Буйло, С.И. О связи амплитудного распределения импульсов акустической эмиссии с особенностями повреждения в структуре материала [Текст] / С.И. Буйло, А.С. Трипалин // Автоматическая сварка. – 1984. – № 5. – С. 16–21.
6. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
7. Бершадский, Л.И. Физическая надежность механических трибосистем [Текст] / Л.И. Бершадский. – К.: Общ-во “Знание”, 1978. – 44 с.