

УДК 621.891:621.316.

В.М. СТАДНІЧЕНКО¹, М.Г. СТАДНІЧЕНКО², Р.М. ДЖУС²¹ *Національний авіаційний університет, Україна*² *Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Україна***МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ РІЗНИХ МЕХАНІЗМАХ РУЙНУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ТРИБОСИСТЕМ**

В статті розглянуті моделі сигналів акустичної емісії при різних видах зношування, а саме: утворення та руйнування вторинних структур I та II типу, пошкоджуваність. Встановлений зв'язок між інформативними параметрами акустичної емісії та характеристиками зношування для різних механізмів руйнування поверхневого шару.

трибодіагностика, акустична емісія, механізми зношування трибосистем**Вступ**

Одним з методів, що дозволяють отримати інформацію про кінетику процесів руйнування поверхонь контакту трибосистем в процесі їх зношування є метод акустичної емісії [1 – 3]. Він має високу чутливість до зміни механізмів зношування трибосистем, що дозволяє використовувати акусто-емісійну інформацію для розробки методів оцінки технічного стану пар тертя на різних стадіях зношування трибосистеми. Встановлено, що при розгляді процесу формування акусто-емісійного відклику трибосистеми свій внесок вносять процеси, що мають місце на поверхнях тертя у процесі їх зношування, а саме утворення та руйнування вторинних структур I та II другого типу, пошкоджуваність. Тому метою даної статті є встановлення зв'язку між параметрами акустичної емісії і характеристиками процесу зношування трибосистем. Це є актуальне завдання, вирішення якого дозволить перейти до створення акусто-емісійних інформаційно-вимірювальних систем трибодіагностики.

Результати досліджень

Механізм утворення часток зносу при нормальному зносі визначається умовами тертя та кінетикою процесів трансформації дефектів в об'ємі контактної взаємодії трибосистеми.

Руйнування вторинних структур I-го роду. В цьому випадку дислокації рухаються під дією сили, що збільшується в часі, і мають можливість виходу на поверхню матеріалу чи границю зерна, імовірність гальмування на перешкодах чи анігіляції. Ці процеси характерні також для стадії пластичної течії матеріалу в макромеханіці.

Розглянемо, як формується імпульс збурення, для якого побудуємо модель сигналу АЕ (рис. 1) при утворенні частинки зносу в умовах повного навантаження трибосистеми.

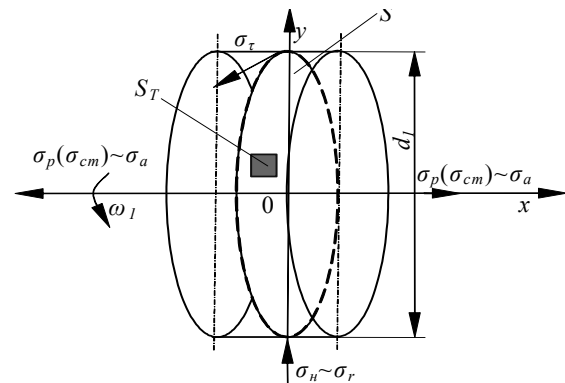


Рис. 1. Напружено-деформований стан зразка («ролик») і утворення тріщини в області неоднорідності, де S – переріз зразка; S_T – область неоднорідності в перерізі S ; $\sigma_r \sim \sigma_n$ – радіальні (герцівські) напруження; σ_τ – тангенційні напруження під дією навантаження; σ_a – осьові напруження (розтягу-стиску)

Матеріал зразка (ролика) – вважається ізотропним за винятком малої області неоднорідності $S_T \ll S$, де утворюється частинка зносу. Область не-

однорідності S_T знаходиться в деякій площині перерізу зразка S , що розміщена перпендикулярно осі x .

НДС зразка визначає набір радіальних σ_r та осьових σ_a напружень.

Користуючись законом парності напружень та IV гіпотезою міцності, знайдемо еквівалентні (інтегральні) напруження, що діють в перерізі S , зокрема, і на область неоднорідності S_T :

$$\sigma_{екв} = \sqrt{(\sigma_r^2 + \sigma_a^2) + 3\sigma_t^2}, \quad (1)$$

де $\sigma_{екв}$ – еквівалентне напруження; σ_r – радіальні напруження; σ_a – осьові напруження.

Дотримуючись умови суцільності речовини, розіб'ємо неоднорідну область S_T на правильні елементарні об'єми V_o кількістю N_o , масштаб яких $m \ll \lambda$, де λ – найменший розмір неоднорідності (дислокації) в середині S_T . Міцність цих об'ємів характеризується умовою $\sigma_{екв} \leq [\sigma]$, де $[\sigma]$ – допустиме значення напружень. Міцність вказаних об'ємів описується розподілом вигляду [4, 5]:

$$p(\sigma_{екв}) = c\sigma_{екв} e^{-b\sigma_{екв}}, \quad (2)$$

де c, b – коефіцієнти, що залежать від фізико-механічних характеристик матеріалу з умовою $c > 1, b \gg 1$; $\sigma_{екв}$ – еквівалентне напруження; $p(\sigma_{екв})$ – розподіл міцності [5].

При механічних випробуваннях і в пружній, і в пластичній областях навантаження зразка збільшують за лінійним законом в часі t :

$$\sigma_{екв} = \alpha t, \quad (3)$$

де $\sigma_{екв}$ – еквівалентне напруження; α – швидкість навантаження, t – час [4].

Вважається, що руйнування кожного елементарного об'єму відбувається не консолідовано, а незалежно при досягненні граничного значення $\sigma_{екв} = [\sigma]$.

Обробка експериментальних даних по дослідженню АЕ випромінювання для різних трибосистем та рекомендації роботи [5] дозволила отримати формулу, що пов'язує швидкість руйнування об'ємів з часом квантування $t_{кв}$:

$$\Phi(t_{кв}) = N_o c \alpha^2 t_{кв} e^{-b\alpha t_{кв}}. \quad (4)$$

де α – швидкість навантаження; $\Phi(t_{кв})$ – швидкість руйнування мікрооб'ємів поверхонь контакту трибосистеми; c, b – коефіцієнти, що залежать від фізико-механічних характеристик матеріалу з умовою $c > 1, b \gg 1$; $t_{кв}$ – час утворення частинки зносу квантування.

Аналіз (3) показує, що швидкість $\Phi(t_{кв})$ цілком визначається розподілом $p(\sigma_{екв})$ та параметром α .

Руйнування кожного елементарного об'єму поверхневого шару трибосистеми призводить до формування одиничного імпульсу збурення АЕ (рис. 2) амплітудою A .

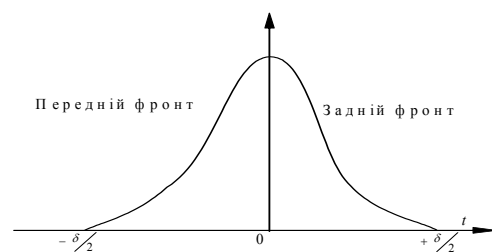


Рис. 2. Параметри одиничного імпульсу збурення

Амплітудне значення імпульсу збурення АЕ, що залежить від напруження $\sigma_{екв}$, може бути знайдено за формулою:

$$A(t, \tau) = A_o(t)h(\tau), \quad (5)$$

де $A_o(t) = K\alpha t$ – амплітудне значення імпульсу збурення, K – коефіцієнт пропорційності [5], $h(\tau)$ – функція, що визначає часовий хід одиничного збурення, є однаковою для всіх об'ємів і має одиничну амплітуду [3], δ – тривалість збурення, що значно менше часу утворення частинки зносу квантування $t_{кв}$.

Так як величина δ мала, то результуюче зміщення буде визначатись сумою збурень АЕ з урахуванням кількості їх утворення в одиницю часу. Тоді, виходячи з (4) та (5), отримаємо амплітудне значення сигналу АЕ, що відповідає відділенню частинки зносу:

$$U_T(t) = U_o \delta_o \alpha^3 t_{кв}^2 e^{-b\alpha t_{кв}}, \quad (6)$$

де $U_o = N_o c K$, δ_o – параметр, числове значення якого визначається формою одиничного імпульсу збурення і має розмірність часу; $t_{кв}$ – час утворення час-

тинки зносу квантування; α – швидкість навантаження; c , b – коефіцієнти, що залежать від фізико-механічних характеристик матеріалу з умовою $c > 1$, $b \gg 1$.

Якщо досліджується область пластичності чи пружно-пластичності, тоді замість допустимих напружень міцності слід скористатись допустимими напруженнями текучості $[\sigma_T]$ чи пропорційності $[\sigma_{пл}]$, а в зоні крихкого руйнування – межею міцності σ_0 . Відрив дислокацій і подолання ними дефектів кристалічної структури при $\sigma_{екв} \approx \sigma_T$ під час руху супроводжується імпульсами збурення. Кількість імпульсів, утворених однією дислокацією (n_1), дорівнює відношенню відстані, що її пройшла дислокація – $l = V_D t$, де V_D – середня швидкість руху дислокації, яку вважатимемо сталою до відстані, що проходить дислокація між двома актами випромінювання l_0 . Тоді кількість імпульсів, створених однією дислокацією в одиницю часу, дорівнює $n_0 = n_1/t = V_D/l_0$; а кількість імпульсів, утворених усіма дислокаціями:

$$n(t) = \frac{V_D}{l_0} N_D(t), \quad (7)$$

де $N_D(t)$ – кількість рухливих дислокацій в залежності від часу, [5]; V_D – середня швидкість руху дислокації; l – відстань, що пройшла дислокація; $n(t)$ – кількість імпульсів, що утворюються усіма дислокаціями.

Зокрема зв'язок між щільністю окремих дислокацій і відносною деформацією $\varepsilon_{екв}$, що відповідає рівню еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$, має вигляд:

$$N_D(\varepsilon_{екв}) = M \varepsilon_{екв} e^{-B \varepsilon_{екв}}, \quad (8)$$

де M і B – постійні, що залежать від фізико-механічних характеристик матеріалів [5], $\varepsilon_{екв}$ – відносна деформація; $N_D(\varepsilon_{екв})$ – щільність дислокацій.

При лінійному зростанні навантаження, а значить, і напруги $\sigma_{екв}$ можна записати, що $\varepsilon_{екв} = \alpha_1 t$, де α_1 – швидкість зміни відносної деформації. Враховуючи (3), (4) і значення $\varepsilon_{екв}$, отримаємо формулу щодо зміни сигналу АЕ в часі, тобто в часі кванту-

вання $t_{кв}$:

$$U_{\frac{D}{(T)}}(t_{кв}) = U_0 \alpha t_{кв} e^{-B \alpha t_{кв}}, \quad (9)$$

де $U_0 = h_0 \delta_D / l_0$; δ_D – середня тривалість імпульсу збурення; $t_{кв}$ – час квантування; B – постійна, що залежать від фізико-механічних характеристик матеріалів.

За один оберт «ролика» відповідно:

$$U_{\frac{D}{(T)}}(t_{кв})^* = \pi U_0 \alpha t_{кв}^* e^{-B \alpha t_{кв}^*} / 30 \omega_1, \quad (10)$$

де α – швидкість зміни відносної деформації; B – постійна, що залежать від фізико-механічних характеристик матеріалів; $t_{кв}$ – час квантування

Слід відзначити, що описаний вище механізм формування сигналу АЕ буде тотожним для кожного з трьох варіантів теорії дислокацій, різниця полягатиме, перш за все, в законі формування переднього і заднього фронтів імпульсу АЕ.

Отже, для першого варіанту форма переднього фронту імпульсу АЕ має вигляд:

$$\sigma(t) = \rho c_t^2 \sin^2 \varphi \sqrt{\frac{a}{l c_1^2}} \cdot \left(\frac{v^*}{2}\right)^{3/2}, \quad (11)$$

де φ і l – координати розміщення джерела ЕАЕ відносно приймача сигналу; v^* – відносна швидкість дислокацій в момент анігіляції; ρ – щільність матеріалу; c_t – швидкість поперечної хвилі в матеріалі.

При різкому завершенні дії джерела випромінювання виникає акселераційний тип сигналу АЕ. Таким чином, при руйнуванні вторинних структур I роду виникає акселераційний тип сигналу АЕ.

Руйнування вторинних структур II-го типу обумовлено поступовим зростанням комплексу невідповідностей між вторинними структурами, що складають поверхневий шар трибосистеми, та основним матеріалом поверхні контакту трибосистеми. Таким чином, має місце прорив рухомою дислокацією перешкод у вигляді дислокаційних скупчень границь зерен, неоднорідностей різного типу [5].

Процес формування сигналу АЕ при цьому механізмі руйнування поверхневого шару має дві

складові: передній фронт формується за рахунок розриву зв'язків і швидкої розгрузки матеріалу в області неоднорідності.

Задній фронт сигналу формується за рахунок релаксації напружень відразу ж після розриву зв'язків.

Форма імпульсу АЕ описується виразом:

$$\sigma(t) = \sigma_{\max} \left(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2} + 1 \right), \quad (12)$$

де τ_1 і τ_2 – постійні часу, що залежать від акустичних властивостей середовища, де виникло джерело сигналу АЕ; σ_{\max} – максимальне напруження в момент розриву зв'язків. При цьому виникає релаксаційний тип сигналу АЕ.

Для акселераційного і релаксаційного процесів допускається, що в момент переходу починає діяти джерело напружень ступінчастої форми:

$$S^*(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t < t'; \\ 0, & \text{при } t > t', \end{cases} \quad (13)$$

де t' – момент часу переходу.

Повний сигнал виражається добутком $S^*(t)\sigma(t)$.

Зокрема для релаксаційного сигналу:

$$\sigma(t) = \sigma_{\max} \left(1 + e^{-t/\tau_1} S^*(t) - e^{-t/\tau_2} \right), \quad (14)$$

де τ_1 і τ_2 – постійні часу, що залежать від акустичних властивостей середовища, де виникло джерело сигналу АЕ; σ_{\max} – максимальне напруження в момент розриву, зв'язків. При цьому виникає релаксаційний тип сигналу АЕ.

Для акселераційного сигналу:

$$\sigma(t) = \begin{cases} \sigma_{\max} a t^k S^*(t), & \text{при } t < t'; \\ \sigma_{\max} e^{-t/\tau}, & \text{при } t > t', \end{cases} \quad (15)$$

де a – множник, що забезпечує необхідну розмірність; k – коефіцієнт, що визначається фізичним процесом, при випромінюванні пружних хвиль $k > 1$; $S^*(t)$ – з (13). Отже, в при руйнуванні вторинних структур II-го типу повний сигнал є стохастичною послідовністю імпульсів релаксаційного чи акселераційного типів. Електро-емісійний образ $U(t)$ цих двох типів показано на рис. 3.

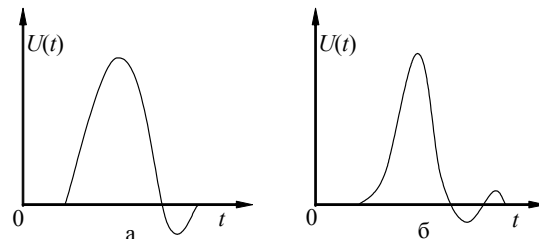


Рис. 3. Типи сигналів АЕ: а – релаксаційний; б – акселераційний

Процес випромінювання АЕ при пошкодженості поверхневого шару. В цьому третьому варіанті повний сигнал АЕ формується із потоку елементарних акустичних імпульсів високої амплітуди, оскільки значно збільшується об'єм, в якому проходять процеси поверхневого руйнування [4]. При когерентному складанні елементарних імпульсів з врахуванням впливу середовища в [6] отримаємо вираз

$$U(t) = a t e^{-\alpha t}, \quad (16)$$

де α – стала затухання потоку акустичних імпульсів, пов'язана з розмірами поля неоднорідності [7]; a – параметр кристалічної решітки; t – час.

Форма сигналу АЕ при пошкодженості поверхні тертя показана на рис. 4.

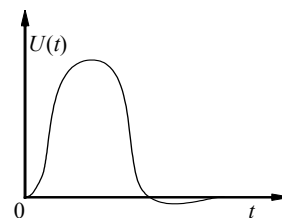


Рис. 4. Форма сигналу АЕ при пошкодженості поверхонь тертя

Однак, характерною особливістю акусто-емісійного випромінювання трибосистем є те, що використання форми сигналу в якості діагностичного критерію можливо тільки при відносно низьких значеннях інтенсивності зношування, коли відокремлення часток зносу проходить дискретно і незалежно одне від одного для різних матеріалів, що використовуються у трибосистемі. Наприклад, на рис. 5 приведена діаграма зміни усередненої потужності сигналів АЕ від часу реєстрації для трибосистеми Сталь 40 – БрАЖ 9-4, мастильно середовище ИГП-18 при навантаженні 100Н.

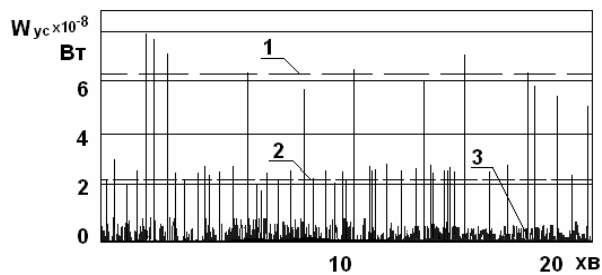


Рис. 5. Діаграма зміни усередненої потужності сигналів АЕ $W_{ус}$ від часу:

1 – середній рівень $W_{ус}$ при відокремленні часток зносу Сталь 40; 2 – середній рівень $W_{ус}$ при відокремленні часток зносу БрАЖ 9-4; 3 – середній рівень $W_{ус}$ від мікрodefектів та пластичної деформації поверхневих шарів

Однак, при значному підвищенні інтенсивності зношування трибосистем має місце енергетичне складання сигналів АЕ від обох елементів трибосистеми, тому для встановлення взаємозв'язку між акусто-емісійним відкликом трибосистеми та величиною її сумарного зносу можливо тільки за умови використання статистичних характеристик акусто-емісійного випромінювання.

Висновки

1. Розроблені теоретичні моделі формування сигналів АЕ при різних механізмах руйнування поверхонь тертя, а саме: нормального механохімічного зношування, окремо для руйнування вторинних структур I-го та II-го типу, а також пошкоджуваності. Розроблені моделі показують, що форма сигналів АЕ в значній степені визначається механізмом руйнування поверхневих шарів трибосистеми. Встановлено, що сигнал АЕ при пошкоджуваності поверхні тертя має більшу амплітуду і більше стискання за часом, ніж сигнал АЕ при нормальному механохімічному зношуванні.

2. Визначено, що при нормальному механохімічному зношуванні поверхонь тертя трибосистеми та протіканні пошкоджуваності поверхневого шару інформативні параметри сигналів АЕ розрізняються між собою. Вияснено, як анізотропія властивостей матеріалу поверхні тертя впливає на швидкість поширення сигналу АЕ, а, значить, і на його енергомісткість. Показані інформаційні можливості основних

інформативних параметрів АЕ випромінювання щодо ідентифікації механізмів дисипації енергії при рівноважному самовпорядкуванні трибосистем та прогнозування основних триботехнічних характеристик фрикційних вузлів за акусто-емісійним випромінюванням. Виявлено і встановлено розрахункові залежності для сигналів АЕ при нормальному механохімічному зношуванні поверхонь тертя трибосистеми та протіканні пошкоджуваності поверхневого шару з оцінкою похибки вимірювання методом АЕ.

Література

1. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учеб. для ВУЗов / Под ред. Д.Г. Громаковского. – Самара: Самар. гос. техн. Ун-т, 2000. – 268 с.
2. S.R. Morris, J.K. Wood, T.J Harvey Use of Electrostatic Charge Monitoring for Early Detection of Adhesive Wear in Oil Lubricated Contacts // ASME Journal of Tribology. – 2002. – № 124(2). – P. 288-296.
3. Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – 454 с.
4. Сарычев Г.А., Шахновский М.К., Щавелин В.М. Влияние внешних факторов на ультразвуковое излучение при трении // В кн.: Методы и средства исследования материалов и конструкций в радиационных полях. – М.: Энергоиздат. – 1982. – С. 56-64.
5. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Под общ. ред. Н.А. Семашко. – М.: Машиностроение, 2002. – 240 с.
6. Stadnychenko V.M. The analysis of temperature and shrinkage – rheological stress in two-dimensional systems with an external ceramic-metal layer // Вісник НАУ. – 2006. – № 3. – P. 1-4.
7. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

Надійшла до редакції 14.02.2007

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