

УДК 621.891:621.316

## АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ ПІД ЧАС ВИПРОБУВАНЬ ПАР ТЕРТЯ З ПОКРИТТЯМ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ

С. Ф. Філоненко, д-р техн. наук, проф., О. П. Космач

Національний авіаційний університет  
fils01@mail.ru

*Розглянуто результати експериментальних досліджень результуючих сигналів акустичної емісії, які зареєстровані при терті поверхонь з покриттям. Показано, що зі зростанням осьового навантаження на пару тертя відбувається зростання середнього рівня потужності результуючого сигналу акустичної емісії, його дисперсії та стандартного відхилення. Визначено, що таке зростання аналізованих параметрів результуючих сигналів акустичної емісії відбувається за нелінійним законом.*

**Ключові слова:** акустична емісія, тертя, покриття, навантаження, потужність, рівень, дисперсія, стандартне відхилення.

*The results of experimental studies of acoustic emission signal, which are registered in the friction surfaces of specimens with coating is conducted. Was shown that with increasing axial load on the friction pair occurs the growth of the average power of the resulting acoustic emission signal and its variance and standard deviation. It was determined that growth of this parameters by nonlinear law.*

**Keywords:** acoustic emission, friction, coating, loading, power, level, variance, standard deviation.

### Постановка проблеми

Для забезпечення надійності вузлів тертя, які працюють у складних умовах, особливий інтерес становить використання високоміцних та зносостійких матеріалів.

До таких матеріалів належать матеріали з покриттям. При дослідженні процесів руйнування таких матеріалів використовуються різноманітні високочутливі методи, одним з яких є метод акустичної емісії (АЕ).

Аналіз і обробка отриманих результатів з АЕ спрямовані на розробку методів діагностики стану вузлів тертя та прогнозування їх ресурсу.

У дослідженнях з використанням методу АЕ значну увагу приділяють теоретичним розробкам, зокрема опису формованих сигналів АЕ та визначенню закономірностей акустичного випромінювання, яке виникає при руйнуванні поверхонь фрикційного контакту.

При цьому значний інтерес становить співставлення теоретичних та експериментальних результатів.

Таке співставлення дає змогу не тільки отримувати закономірності зміни акустичного випромінювання в процесі тертя при дії різних чинників, але й підвищити достовірність розроблених методів АЕ діагностики.

### Аналіз

© С.Ф. Філоненко, О.П. Космач, 2011

### останніх досліджень та публікацій

Дослідженню сигналів АЕ при зношуванні поверхневих шарів матеріалів присвячено багато праць [1; 2; 3]. Отримані результати показують, що процеси випромінювання АЕ, на відміну від

статичних видів навантаження матеріалів, реєструються у вигляді безперервного сигналу, який має достатньо складну структуру. Тому основний напрям теоретичних досліджень присвячений пошуку закономірностей зміни параметрів сигналів АЕ при зміні навантаження або параметрів зношування поверхонь тертя. Як правило, для опису сигналів АЕ при динамічному навантаженні використовують підходи, які застосовують у разі статичних видів випробувань матеріалів. Основним з них є представлення сигналу АЕ у вигляді стохастичної моделі [4]. Вважається, що сигнал АЕ є результатом протікання в матеріалі великої кількості випадкових подій, кожна з яких відбувається протягом малого проміжку часу з випадковою появою.

У реальних умовах роботи пари тертя відбувається послідовна зміна плям контакту вздовж твірної поверхні зразків, що призводить до послідовного руйнування вторинних структур (I-го та II-го типу) в плямах контакту, тобто коли відбувається послідовна зміна плям контактної взаємодії. В цьому випадку, при формуванні результуючого сигналу АЕ, важливим чинником стає швидкість руйнування або час між послідовними актами руйнування. З урахуванням динамічної зміни плям контакту і зменшення часу руйнування вторинних структур I-го і II-го типу буде відбуватися перехід від результуючого імпульсного до результуючого безперервного процесу випромінювання сигналів АЕ. При цьому результуючий сигнал АЕ, згідно з працями [5–8], подається у вигляді суми сигналів, що виникають у випадкові моменти часу

$$U'(t) = \sum_i U_T(t-t_i) + \sum_j U_d(t-t_j), \quad (1)$$

де  $U_\delta(t)$ ,  $U_d(t)$  — сигнали АЕ під час руйнування вторинних структур II-го і I-го типу відповідно;  $t_i$ ,  $t_j$  — випадкові моменти часу появи сигналів АЕ  $U_\delta(t)$  і  $U_d(t)$  при руйнуванні вторинних структур II-го і I-го типу відповідно.

З урахуванням виразів для імпульсних сигналів АЕ [5–8], які виникають при руйнуванні вторинних структур II-го і I-го типу, вираз (1) можна подати у вигляді

$$U'(t) = \sum_i U_0 \delta_0 \sigma_{0e}^3 e^{4z(t-t_i)} e^{-b\sigma_{0e}} e^{z(t-t_i)} + \sum_j U_{0d} \varepsilon_{0d} e^{r(t-t_j)} e^{-B\varepsilon_{0d}} e^{r(t-t_j)}, \quad (2)$$

де  $U_0$ ,  $b$ ,  $\sigma_{0e}$ ,  $z$ ,  $\delta_0$ ,  $U_{0d}$ ,  $\varepsilon_{0d}$ ,  $r$  — параметри моделі.

З виразу (2) випливає, що при заданих фізико-механічних характеристиках матеріалів поверхонь тертя, постійному розмірі плями контакту (площі контактної взаємодії) результируючий сигнал АЕ, який формується в процесі тертя, та його параметри будуть залежати від початкового напружено-деформованого стану ( $\sigma_{0e}$ ,  $\varepsilon_{0d}$ ), часу початку руйнування вторинних структур II-го і I-го типу ( $t_i$ ,  $t_j$ ) або швидкості обертання пари тертя, а також об'єму матеріалу, що вступає в пластичну деформацію та площі руйнування ( $V_d \sim U_{0d}$ ,  $S_T \sim U_0$ ). Це підтверджується результатами моделювання сигналів АЕ. Водночас, інтерес становить співставлення теоретичних та експериментальних результатів.

#### Задачі досліджень

У статті розглядатимуться результати експериментальних досліджень усередненої потужності результируючих сигналів АЕ, які формуються при терті поверхонь з покриттям. Буде показано, що результируючі сигнали АЕ є неперервними сигналами з деяким середнім рівнем усередненої потужності та певною величиною його розкиду. Також буде показано, що при постійній швидкості обертання зразків тертя, зміна осьового навантаження приводить до зростання середнього рівня усередненої потужності результируючих сигналів АЕ, збільшення його дисперсії та стандартного відхилення. Також буде показано, що зростання аналізованих параметрів відбувається за нелінійним законом.

#### Методика досліджень

Як об'єкт дослідження використаємо матеріали аксіально-поршневої гідромашини з рухомих блоком циліндрів, яка є найпоширенішою серед

поршневих гідромашин. Така гідромашина містить максимальну кількість пар тертя з різними схемами навантаження і може бути узагальненою для дослідження гідромашин такого класу.

Експериментальні дослідження тертя та зношення зразків проводилися на модернізованій серійній машині тертя 2070 СМТ-1 [9]. Випробування зразків проводили за схемою «диск-диск».

Для проведення досліджень були виготовлені зразки з алюмінієвого сплаву Д16 з покриттям ВК-95 з міддю, а також зразки з легованої сталі 30ХГСА.

Товщина покриття становила 2...2,5 мкм. Зразки являли собою втулки, контактна взаємодія яких відбувалася за всією їх торцевою поверхнею. Шорсткість поверхонь фрикційного контакту доводилася до  $Ra \leq 0,20$ . Шорсткість поверхонь тертя до і після випробувань визначалася згідно з працею [10] на приладі «профілограф-профілометр».

Відповідно до обраної схеми випробувань, зразок з покриттям залишався нерухомим, а інший зразок був установлений у патрон, розташований на шпинделі машини тертя.

Швидкість обертання рухомого зразка протягом усіх дослідів залишалася постійною та становила  $400 \text{ хв}^{-1}$ . При проведенні експериментів до пари тертя прикладалося осьове навантаження, величина якого змінювалася в межах від 200 до 1100 Н. Управління електроприводами, які забезпечують обертання зразків та їх навантаження, здійснювалося за допомогою комп'ютерної системи управління. Як мастильне середовище під час проведення експериментів використовувалося мастило типу М10Г2 [11], витрати якого були 1,2 л/год.

У процесі проведення випробувань зразків здійснювалася реєстрація та обробка сигналів АЕ. Для цього на нерухомому зразку був встановлений датчик АЕ. Його поверхня змащувалася акустопрозою речовиною «Рамзай». Сигнал АЕ з виходу датчика підсилювався в підсилювальному тракті та надходив в акустоемісійний діагностичний комплекс (АЕДК). Оброблення та аналіз реєстрованої інформації здійснювалися з використанням спеціального програмного математичного забезпечення. Програмне забезпечення АЕДК дає змогу проводити зберігання інформації з аналізом основних параметрів сигналів АЕ.

#### Результати досліджень

У процесі проведення експериментів реєстрація сигналів АЕ здійснювалася на стадії нормального зношення після закінчення стадії повного припрацювання пар тертя.

Результати фрактографічних досліджень (рис. 1) зразків після випробувань показали відсутність пошкоджень поверхонь фрикційного контакту (задирів), що свідчить про нормальне механохімічне зношення поверхонь тертя.

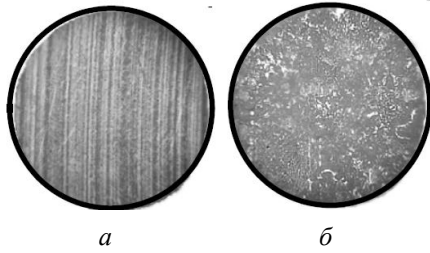


Рис. 1. Фрактографія середньої частини поверхонь по лінії контакту зразка 30XГСА (а) та зразка Д16 з покриттям ВК-95 та міддю (б)

Оброблення АЕ інформації здійснювалося з усередненням. При проведенні випробувань інтервал дискретизації та інтервал усереднення залишалися постійними протягом усіх дослідів. Їх величини становили: 12 мкс та 20 мс відповідно.

Результати досліджень показали, що при заданих значеннях осьового навантаження та постійній швидкості обертання пари тертя реєстрований результуючий сигнал АЕ являє собою неперервний сигнал з деяким середнім рівнем усередненої потужності та величиною його розкиду (рис. 2). При цьому визначено, що зі збільшенням осьового навантаження на пару тертя на стадії нормального зношення відбувається зростання середнього рівня усередненої потужності результуючого сигналу АЕ та величини її розкиду.

Статистична обробка АЕ даних показала, що для всіх проведених випробувань розподіл усередненої потужності результуючих сигналів АЕ з імовірністю 0,95 описується нормальним законом розподілу. Величина вибірки для проведення аналізу була незмінною, а кількість інтервалів аналізу на довжині вибірки дорівнювала 9000. За результатами аналізу були визначені величини медіан  $W_{md}$  усередненої потужності сигналів АЕ, а також величини їх дисперсії  $s_{Wmd}^2$  та стандартного відхилення  $s_{Wmd}$ .

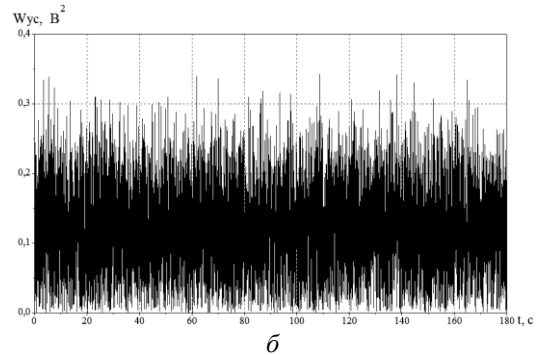
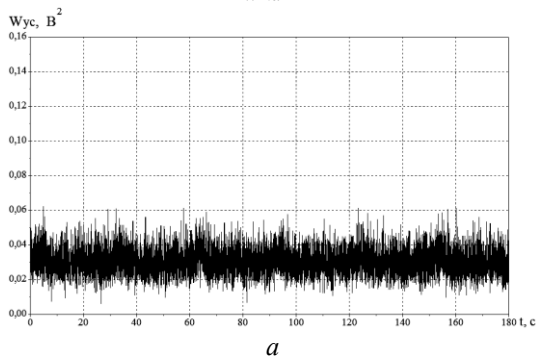


Рис. 2. Графіки зміни усередненої потужності сигналів АЕ, які зареєстровані при випробуваннях на зношення досліджуваної пари тертя при різних значеннях осьового навантаження.

Значення осьового навантаження:

а — 200 Н; б — 1100 Н (швидкість обертання пари тертя  $400 \text{ хв}^{-1}$ , інтервал усереднення 20 мс)

Отримані результати показали, що при осьовому навантаженні на пару тертя  $P = 200 \text{ Н}$  середній рівень усередненої потужності результуючого сигналу АЕ дорівнює  $W_{md2} = 0,03 \text{ В}^2$ , а дисперсія та стандартне відхилення дорівнюють  $s_{Wmd2}^2 = 5,7894 \cdot 10^{-5} \text{ В}^4$  та  $s_{Wmd2} = 0,00761 \text{ В}$  відповідно. Подальший аналіз даних будемо проводити відносно до осьового навантаження 200 Н. Збільшення осьового навантаження на пару тертя у два рази (до 400 Н) приводить до збільшення  $W_{md}$  у 1,05 рази ( $W_{md4} = 0,0315 \text{ В}^2$ ). При цьому дисперсія середнього рівня усередненої потужності результуючого сигналу АЕ збільшується в 1,2 рази, а стандартне відхилення в 1,096 рази. Збільшення осьового навантаження на пару тертя в три рази (до 600 Н) приводить до зростання  $W_{md}$  у 1,13 рази ( $W_{md6} = 0,034 \text{ В}^2$ ), а його дисперсії та стандартного відхилення в 1,9 та 1,38 рази відповідно. Подальше збільшення осьового навантаження на пару тертя до 800 Н, тобто в чотири рази, приводить до зростання  $W_{md}$  в 1,23 рази ( $W_{md8} = 0,037 \text{ В}^2$ ). При цьому його дисперсія та стандартне відхилення збільшуються в 3,35 та 1,83 рази відповідно. Збільшення осьового навантаження на пару тертя до 1100 Н, тобто у 5,5 рази, приводить до зростання  $W_{md}$  у 3,66 рази ( $W_{md11} = 0,11 \text{ В}^2$ ). Отже, дисперсія та стандартне відхилення зростають в 69,09 та 8,87 рази відповідно. На рис. 3 подано результати обробки параметрів усередненої потужності результуючих сигналів АЕ, які показані на рис. 2, залежно від прикладеного осьового навантаження на пару тертя.

З рис. 3 видно, що зі зростанням осьового навантаження на пару тертя при постійній швидкості її обертання відбувається збільшення середнього рівня усередненої потужності резуль-

туючих сигналів АЕ, а також його дисперсії та стандартного відхилення.

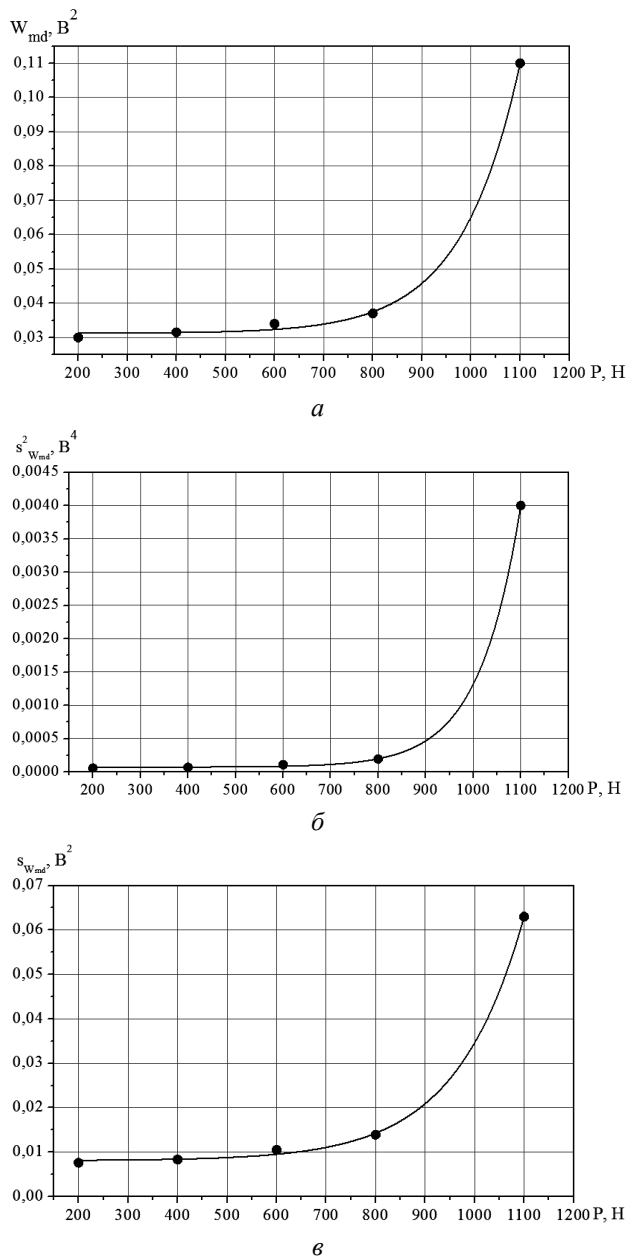


Рис. 3. Графіки зміни величин медіани усередненої потужності результуючого сигналу АЕ (а), її дисперсії (б) та стандартного відхилення (в) залежно від прикладеного осьового навантаження на пару тертя

Аналіз графічних даних (рис. 3) показав, що залежності зміни медіан усередненої потужності результуючих сигналів АЕ, її дисперсії та стандартного відхилення добре описуються нелінійною експоненційною функцією вигляду

$$D = ae^{bP} + c, \quad (3)$$

де  $D$  — аналізований параметр результуючого сигналу АЕ;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — коефіцієнти апроксимуючого виразу;  $P$  — величина прикладеного осьового навантаження.

Коефіцієнти апроксимуючого виразу (3) для досліджуваних параметрів АЕ становлять: для медіани усередненої потужності результуючого сигналу АЕ —  $a = 7,411 \cdot 10^{-6}$ ,  $b = 0,00843$ ,  $c = 0,0312$ ; для дисперсії усередненої потужності результуючого сигналу АЕ —  $a = 0,0115$ ,  $b = 1,25723 \cdot 10^{-8}$ ,  $c = 7,32641 \cdot 10^{-5}$ ; для стандартного відхилення медіани усередненої потужності результуючого сигналу АЕ —  $a = 0,00728$ ,  $b = 1,83449 \cdot 10^{-5}$ ,  $c = 0,00808$ .

При цьому ймовірність  $p$  опису отриманих залежностей для зміни усередненої потужності результуючих сигналів АЕ, її дисперсії та стандартного відхилення:  $p = 0,99953$ ;  $p = 0,99996$ ;  $p = 0,9997$ .

### Висновки

Проведені експериментальні дослідження усередненої потужності результуючих сигналів АЕ, які зареєстровані при терті поверхонь спряжених елементів з покриттям для різних осьових навантажень.

Отримані результати показали, що результуючий сигнал АЕ являє собою неперервний сигнал з деяким середнім рівнем усередненої потужності, а також величиною його розкиду.

Статистична обробка отриманих даних показала, що для всіх досліджуваних осьових навантажень на вибраному інтервалі аналізу (на заданому об'ємі вибірки) розподіл усередненої потужності результуючих сигналів АЕ з високою ймовірністю описується нормальним законом.

Аналіз отриманих результатів дав змогу встановити, що зі зростанням осьового навантаження на пару тертя при постійній швидкості обертання зразків відбувається зростання середнього рівня усередненої потужності результуючих сигналів АЕ, його дисперсії та стандартного відхилення.

Зростання вказаних параметрів результуючих сигналів АЕ відбувається за нелінійним законом та описуються експоненційною функцією.

При цьому результати проведених експериментальних досліджень мають добру узгодженість з результатами теоретичних досліджень.

Отримані закономірності зміни середнього рівня усередненої потужності результуючого сигналу АЕ, її дисперсія та стандартне відхилення можуть бути використані як інформативні параметри під час контролю процесів тертя.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Babak V. P. Mechanism of transition of friction pairs to “quasiwearless” mode of operation / V. P. Babak, S. F. Filonenko, V. N. Stadnychenko // Aviation. — 2006. — Vol. X. — № 4. — P. 8–13.
2. Корреляционная связь акустической эмиссии с размерами частиц износа при сухом трении /

[Ю. Ф. Фадин, Ю. П. Козирев, О. В. Полевая, В. П. Булатов] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2001. — Т. 67. — № 3. — С. 43–47.

3. Babak V. P. Application of revitalisants for extension of resource and restoring of worn-out friction units of aviation axial-piston hydromachines / V. P. Babak, V. N. Stadnychenko // Aviation. — 2004. — Vol. VIII. — № 1. — P. 8–12.

4. *Акустические* и электрические методы в триботехнике / под ред. В. А. Белого. — Минск : Наука и техника, 1987. — 280 с.

5. Filonenko S. F. Modelling of acoustic emission signals at friction of materials' surface layers / S. F. Filonenko, V. M. Stadnychenko, A. P. Stahova // Aviation. — 2008. — Vol. 12. — № 3. — P. 87–94.

6. Филоненко С. Ф. Моделирование сигналов акустической эмиссии при изменении объема материала, вступившего в пластическую деформацию / С. Ф. Филоненко, А. П. Стахова, В. Г. Кравченко // Технологические системы. — 2008. — № 1(41). — С. 22–27

7. Filonenko S. F. Modeling of the acoustic emission signals for the case of material's surface layers distraction in the process of friction / S. F. Filonenko, A. P. Stakhova, T. N. Kositskaya // Вісник НАУ. — 2008. — № 2. — С. 24–28.

8. *Моделі* сигналів акустичної емісії при руйнуванні поверхневих шарів пар тертя / [В. П. Бабак, С. Ф. Филоненко, В. М. Стадниченко, А. П. Стахова] // Проблеми тертя та зношування. — 2007. — Вип. 47. — С. 1–8.

9. Филоненко С. Ф. Обработка сигналов акустической эмиссии при трении поверхностей из композиционных материалов / С. Ф. Филоненко, А. П. Космач, Т. Н. Косицкая // Технологические системы. — 2010. — № 2 (51). — С. 45–53.

10. *ГОСТ 2789-77*. Шероховатость поверхности, параметры, характеристики и обозначения. Технические условия. — М. : ИПК Издательство стандартов, 1973. — 6 с.

11. *ГОСТ 8581-78* Масла моторные для авто-тракторных дизелей. Технические условия. — М. : ИПК Издательство стандартов, 2004. — 6 с.

Стаття надійшла до редакції 04.07.2011.