

УДК 621.891:621.316

**С.Ф. Філоненко**, д-р техн. наук

**О.П. Космач**, канд. техн. наук

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

### МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ТЕРТІ ТА ЗНОШУВАННІ ПОВЕРХОНЬ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

**С.Ф. Филоненко**, д-р техн. наук

**А.П. Космач**, канд. техн. наук

Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ТРЕНИИ И ИЗНОСЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**S.F. Filonenko**, Doctor of Technical Sciences

**O.P. Kosmach**, PhD in Technical Sciences

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

### SIMULATION OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS AT FRICTION AND WEARING OF SURFACES FROM COMPOSITE MATERIALS

*Проведено моделювання результуючого сигналу акустичної емісії, який формується при терті та зношуванні поверхонь із композиційних матеріалів. Встановлено закономірності зміни амплітудних параметрів формованого результуючого сигналу акустичної емісії. Визначено процентний приріст параметрів результуючого сигналу акустичної емісії. Проаналізовано інформативність амплітудних параметрів формованого результуючого сигналу акустичної емісії.*

**Ключові слова:** акустична емісія, сигнал, закономірності зміни, зношування, композиційні матеріали, сталі зношування, катастрофічне руйнування, процентний приріст параметрів сигналів, акустичне випромінювання.

*Проведено моделирование результующего сигнала акустической эмиссии, который формируется при трении и износе поверхностей из композиционных материалов. Установлены закономерности изменения амплитудных параметров формируемого результующего сигнала акустической эмиссии. Определен процентный прирост параметров формируемого сигнала акустической эмиссии. Проанализировано информативность амплитудных параметров формируемого результующего сигнала акустической эмиссии.*

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, сигнал, закономерности изменения, износ, композиционные материалы, стабильный износ, катастрофическое разрушение, процентный прирост параметров сигналов, акустическое излучение.

*In the article the simulation of acoustic emission resultant signal is conducted, which one is reshaped at friction and wearing of surfaces of composite materials. Are established of regularity of change of amplitude parameters of acoustic emission resultant signal. The percentage increment of parameters of acoustic emission resultant signal is determined. The analysis of self descriptiveness amplitude parameters of reshaped acoustic emission resultant signal is conducted.*

**Key words:** acoustic emission, signal, regularity of change, wearing, composite materials, stable wearing, disastrous destruction, percentage increment of signals parameters, acoustic radiation.

**Постановка завдання.** Питанням використання, випробування та дослідження композиційних матеріалів (КМ) у вузлах тертя приділяється підвищена увага в науково-технічній літературі. Дослідження, що проводяться, спрямовані на оптимізацію вибору типу КМ, а також на оптимізацію режимів роботи самого вузла тертя. Отримані результати показують, що використання традиційних методів досліджень, які ґрунтуються на аналізі механічних величин (момент тертя, коефіцієнт тертя тощо), дозволяє виявляти розвиток макропроцесів зношування поверхневих шарів фрикційного контакту. Однак з погляду контролю та діагностики вузлів тертя важливою задачею є фіксація мікропроцесів руйнування, що починають розвиватися в поверхневих шарах фрикційного контакту. Такі процеси є початковими етапами зародження необоротного руйнування поверхневих шарів, які поступово призводять до катастрофічного руйнування вузла тертя. Це повною мірою відноситься і до вузлів тертя з КМ.

При дослідженні процесів тертя та зношування поверхонь фрикційного контакту з традиційних матеріалів (з кристалічною структурою) та КМ використовуються і нетрадиційні методи, які мають високу чутливість до мікропроцесів руйнування. Одним з таких методів є метод акустичної емісії (АЕ). Результати досліджень з використанням методу АЕ показують, що реєстровані сигнали АЕ є відображенням кінетики процесів, що розвиваються в поверхневих шарах матеріалів на субмікро-, мікро- і макрорівнях. Це може бути викорис-

тано під час розроблення методів контролю та діагностики стану вузлів тертя, включаючи і вузли тертя з КМ. Мала інерційність і висока чутливість методу АЕ дозволяє отримувати значні обсяги інформації про процеси в зоні фрикційного контакту. Однак інтерпретація отриманої інформації потребує встановлення однозначних зв'язків між параметрами акустичного випромінювання та параметрами процесів, що розвиваються. Такі дослідження дозволяють визначати закономірності зміни параметрів акустичного випромінювання при дії різних факторів, що є основою в розробленні методів контролю та діагностики вузлів тертя з КМ. Безумовно, що інтерес представляють і дослідження зміни основних параметрів акустичного випромінювання при переході зі стадії сталого до стадії катастрофічного зношування поверхонь фрикційного контакту вузлів тертя з КМ.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Метод АЕ широко використовується при дослідженні процесів тертя та зношування поверхонь, які виготовлені з матеріалів з кристалічною структурою та КМ [1-2]. Отримані результати показують, що протягом всього процесу тертя відбувається видозміна реєстрованого акустичного випромінювання. Це свідчить про малу інерційність методу та високу його чутливість до мікропроцесів, які розвиваються в поверхневих шарах матеріалів, тобто високу чутливість методу до зміни механізмів тертя та зношування. Однак інтерпретація цих процесів за сигналами АЕ є достатньо складним завданням, що обумовлено складністю теоретичних досліджень, а також складністю проведення спрямованих експериментальних досліджень.

У роботах [3-5] були розглянуті результати моделювання сигналів АЕ, які формуються при руйнуванні КМ під дією статичної поперечної сили. Результати проведених досліджень дозволили провести опис сигналу АЕ, що формується при руйнуванні КМ, у вигляді

$$U(t) = U_0 v_0 [\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})] \times \\ \times e^{r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})]} \times \\ \times e^{-v_0 \int_{t_0}^t r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})] dt} \quad (1)$$

де  $U_0 = N_0 \beta \delta_s$  – максимально можливе зміщення, що виникає при миттєвому руйнуванні всіх елементів КМ;  $N_0$  – вихідна кількість елементів КМ;  $\beta$  – коефіцієнт пропорційності;  $\delta_s$  – параметр, числове значення якого визначається формою одиночного імпульсу збурення, що виникає при руйнуванні одного елемента КМ;  $\alpha$  – швидкість навантажування елементів КМ;  $t$ ,  $t_0$  – відповідно поточний час та час початку руйнування елементів КМ;  $g$  – коефіцієнт, що залежить від геометричних розмірів елементів КМ;  $r$ ,  $v_0$  – константи, які залежать від фізико-механічних характеристик КМ.

Модель сигналу АЕ, що описується виразом (1), була застосована при опису результуючого сигналу АЕ, який формується при терті поверхонь із КМ. У роботі [5] результуючий сигнал АЕ представлено у вигляді суми імпульсних сигналів АЕ, які формуються на площадках контактної взаємодії поверхонь вузла тертя

$$U_p(t) = \sum_j U_j(t-t_j), \quad (2)$$

де  $j$  – порядковий номер площадки контактної взаємодії ( $j = 1, 2, 3, \dots, m$ );  $U_j(t_j)$  –  $j$ -ий імпульсний сигнал АЕ, згідно з виразом (1), який формується на  $j$  площадці контактної взаємодії;  $t_j$  – момент часу появи  $j$ -го сигналу АЕ;  $m$  – загальна кількість імпульсних сигналів АЕ, які формуються на довжині реалізації (часу роботи вузла тертя).

Згідно з (2), у роботі [5] проведено моделювання результуючих сигналів АЕ залежно від параметра  $v_0$ , що входить до виразу (1) і який характеризує властивості КМ. Початковими умовами при моделюванні результуючих сигналів АЕ, згідно з (2), були наступні. Вузол тертя являє собою сукупність поверхонь фрикційного контакту у вигляді роликів або циліндрів (рис. 1). Одна з поверхня фрикційного контакту здійснює неперервне переміщення відносно іншої. Площадка контактної взаємодії являє собою деяку малу ділянку  $S_T$  у площині перекриття  $S$  поверхонь (рис. 1), яка змінює своє положення у часі. При обертанні вузла тертя в межах цієї площадки контактної взаємодії  $S_T$  відбувається руйнування визначеної кількості  $N_0$  елементів КМ. Елементи КМ мають певні фізико-механічні характеристики та розміри, які визначаються параметрами  $v_0$ ,  $r$  та  $g$ , що входять у вираз (1).

За таких умов момент часу  $t_j$  появи імпульсного сигналу АЕ, згідно з виразом (2), можна представити у вигляді суми стаціонарної та випадкової складових

$$t_j = j\Delta t_j \pm \delta, \quad (3)$$

де  $\Delta t_j$  – інтервал часу між початком появи наступного та попереднього імпульсного сигналу АЕ;  $\delta$  – випадкова складова в моменті часу появи кожного наступного сигналу АЕ.

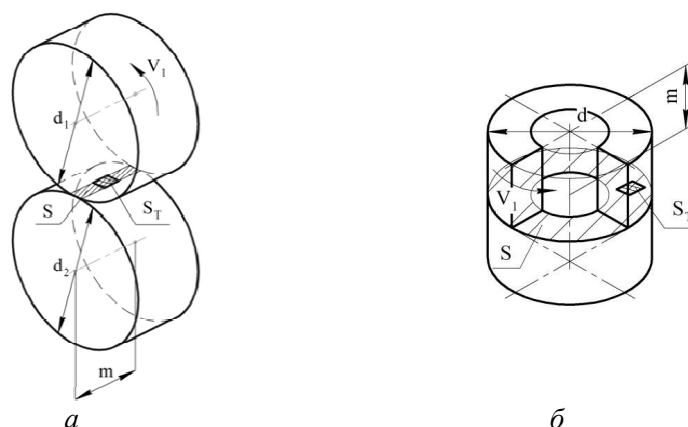


Рис. 1. Кінематичні схеми вузлів тертя у вигляді роликів (а) та циліндрів (б):  $V_1$  – швидкість обертання пари тертя;  $S$  – площа перекриття поверхонь пари тертя;  $S_T$  – площадка контакту в площі перекриття поверхонь пари тертя;  $m$ ,  $d$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  – розміри елементів пари тертя

Введення складової  $\delta$  обумовлено існуванням неоднорідності властивостей елементів КМ, нестабільністю положення площадки  $S_T$ , що руйнується в площі перекриття  $S$  (рис. 1), нестабільністю швидкості обертання вузла тертя тощо.

Результати проведених досліджень показали, що результуючі сигнали АЕ, згідно з (2), з урахуванням (3), являють собою неперервні сигнали. Вони характеризуються деяким середнім рівнем амплітуди та величиною її розкиду. Моделювання результуючих сигналів АЕ дозволило визначити закономірності зміни їх параметрів при зміні властивостей КМ.

Згідно з рівнянням (2), з урахуванням (3), можна провести моделювання результуючих сигналів АЕ, які формуються при переході вузла тертя із КМ зі стадії сталого зношування до стадії катастрофічного руйнування його поверхонь.

**Мета статті.** В роботі буде проведено моделювання результуючих сигналів АЕ, які формуються на стадії сталого зношування та при переході зі стадії сталого до стадії катастрофічного зношування поверхонь вузла тертя із КМ. Буде проведено аналіз амплі-

тудних параметрів формованих сигналів АЕ. Також буде проведено аналіз інформативності параметрів формованих сигналів АЕ та визначено найбільш чутливі параметри до зміни процесів тертя поверхонь фрикційного контакту.

**Результати досліджень.** При моделюванні акустичного випромінювання, що формується під час руйнування поверхонь фрикційного контакту, приймемо умови роботи вузла тертя такими, як і в роботі [5], що розглянуто вище (рис. 1). Моделювання результуючих сигналів АЕ будемо проводити у відносних одиницях, а всі параметри, які входять у вирази (1), (2) та (3), будуть приведені до безрозмірних величин.

При моделювання акустичного випромінювання будемо розглядати різні стадії тертя та зношування поверхонь фрикційного контакту. Кожна з цих стадій буде характеризуватися зміною умов роботи вузла тертя і, відповідно, зміною параметрів моделювання. Це обумовлено тим, що у процесі тертя відбувається поступовий перехід зі стадії сталого до стадії катастрофічного зношування. При цьому, згідно з існуючим уявленням про тертя та зношування поверхонь фрикційного контакту, можна виділити такі стадії: стале зношування, зародження катастрофічного зношування, перехід зі стадії сталого до стадії катастрофічного зношування і стадія сталого катастрофічного зношування.

Тому при розрахунках параметрів результуючих сигналів АЕ визначимо такі етапи моделювання:

– перший етап – стадія сталого зношування поверхонь фрикційного контакту з КМ. Цю стадію будемо характеризувати постійністю умов навантаження, постійністю фізико-механічних характеристик КМ, постійністю геометричних розмірів елементів КМ, а також постійною площею контактної взаємодії, тобто постійністю кількості елементів КМ, що руйнуються;

– другий етап – стадія передруйнування, яка передує стадії переходу до катастрофічного руйнування поверхонь фрикційного контакту. На цій стадії будемо враховувати зростання контактної навантаження, а також величини граничного напруження руйнування елементів КМ при постійній площі фрикційного контакту (кількості елементів, що руйнуються), постійності фізико-механічних характеристик КМ, а також постійності геометричних розмірів елементів КМ;

– третій етап – стадія катастрофічного руйнування поверхонь фрикційного контакту. Ця стадія буде характеризуватися подальшим зростанням контактної навантаження, а також величиною порогового напруження руйнування елементів КМ. При цьому будемо враховувати зростання площі фрикційного контакту КМ при постійності фізико-механічних характеристик КМ, а також постійності геометричних розмірів елементів КМ;

– четвертий етап – стадія сталого катастрофічного зношування поверхонь фрикційного контакту. Цю стадію будемо характеризувати сталістю контактної навантаження, а також величиною порогового напруження руйнування поверхонь при зростанні площі фрикційного контакту із КМ. При цьому постійними будуть фізико-механічні характеристики КМ, а також геометричні розміри його елементів.

З урахуванням визначених умов проведемо моделювання результуючих сигналів АЕ на кожній стадії тертя та зношування поверхонь з врахуванням зростання граничного рівня руйнування та площі контактної взаємодії поверхонь пари тертя із КМ при постійності інших параметрів, що входять до виразу (1).

При проведенні розрахунків результуючих сигналів АЕ будемо вважати, що на всіх стадіях зношування поверхонь фрикційного контакту із КМ коефіцієнт тертя  $f$  буде дорівнювати одиниці, тобто  $f=1$ . Також будемо вважати, що для заданої початкової швидкості  $\alpha$  величина навантаження  $P$  дорівнює одиниці, тобто  $P=1$ . При цьому зростання величини  $P$  приводить до додаткового миттєвого зростання швидкості руйнування

елементів КМ відносно початкової швидкості  $\alpha$ . Це означає, що при початковій швидкості  $\alpha$  руйнування елементів КМ із збільшенням величини  $P$  відбувається миттєве зростання  $\alpha$  до величини  $\alpha_i = \alpha + \Delta\alpha_i$ , де  $i$  – номер приросту навантаження.

При моделюванні приймемо, що початкове значення  $\tilde{\alpha}$  на стадії сталого зношування становить  $\tilde{\alpha}=200$ , а величина  $\tilde{P}$  дорівнює одиниці. Вважатимемо, що при переході зі стадії сталого зношування до стадії передруйнування, яка передує стадії катастрофічного зношування, відбувається лінійне зростання величини  $\tilde{P}$  від  $\tilde{P}=1$  до  $\tilde{P}=2$ . При цьому миттєва швидкість руйнування буде зростати від  $\tilde{\alpha}=200$  до  $\tilde{\alpha}=400$ , тобто зі зростанням  $P$  руйнування буде починатися при  $\tilde{\alpha}=200$  і миттєво переходити до  $\tilde{\alpha}=400$ . Таке зростання  $\tilde{\alpha}$  буде приводити і до зростання граничного напруження руйнування.

При моделюванні приймемо, що час початку руйнування  $\tilde{t}_0$  першої площадки контактної взаємодії у відносних одиницях буде становити  $\tilde{t}_0=0,0006$ . При цьому зі зростанням  $\tilde{\alpha}$  час початку руйнування елементів КМ не змінюється. Для заданих значень  $\tilde{\alpha}$  і  $\tilde{t}_0$  проведемо розрахунки залежностей зміни еквівалентних напружень  $\tilde{\sigma}$  при руйнуванні елементів КМ, згідно з [6], за результатами яких визначимо граничні напруження руйнування  $\tilde{\sigma}_0$ . Результати проведених розрахунків показали, що для  $\tilde{\alpha}=200$  і  $\tilde{t}_0=0,0006$  граничне напруження  $\tilde{\sigma}_0$  руйнування дорівнює  $\tilde{\sigma}_0=0,10194191$ , а для  $\tilde{\alpha}=400$  і  $\tilde{t}_0=0,0006$  граничне напруження  $\tilde{\sigma}_0$  руйнування становить  $\tilde{\sigma}_0=0,173464261$ . Значення параметрів  $v_0$ ,  $g$  і  $r$ , що входять до виразу (1), приймемо рівними:  $\tilde{v}_0 = 10^6$ ;  $\tilde{g} = 0,1$ ;  $\tilde{r} = 10^4$ . Також будемо вважати, що час  $\tilde{t}_0$  початку руйнування елементів КМ зі зростанням  $\tilde{P}$  залишається незмінним. При моделюванні результуючого сигналу АЕ на стадії сталого зношування і стадії передруйнування, тобто стадії, яка передує стадії катастрофічного зношування, будемо вважати, що площа контактної взаємодії залишається постійною величиною и дорівнює  $\tilde{S}=1$ .

Згідно з моделлю формування результуючого сигналу АЕ (2) вважається, що руйнування площадок контактної взаємодії відбувається послідовним чином. Тому значення інтервалу часу між руйнуванням площадок контактної взаємодії або інтервал часу між появами імпульсних сигналів АЕ для прийнятих умов навантаження пари тертя, згідно з (3), буде незмінним. Його величину приймемо рівною  $\Delta\tilde{t}_j=1,1 \cdot 10^{-6}$ . Значення  $\Delta\tilde{t}_j$  вибрано з урахуванням тривалості сигналу АЕ, який формується при  $\tilde{\alpha}=200$ . Тривалість імпульсного сигналу АЕ визначалася при розрахунках зміни його амплітуди в часі, згідно з (1), для прийнятих умов моделювання.

При розрахунках результуючого сигналу АЕ, що формується під час руйнування поверхонь фрикційного контакту, значення  $\tilde{\delta}$  будемо змінювати в діапазоні величин від  $\tilde{\delta} = 0$  до  $\tilde{\delta} = 5,0 \cdot 10^{-7}$  випадковим чином. Для прийнятих умов моделювання на стадії, що передує стадії катастрофічного руйнування поверхонь фрикційного контакту, відбувається поступове зростанням  $\tilde{P}$ . Це приводить до миттєвого зростання  $\tilde{\alpha}$ , і, як наслідок, згідно з (1) відбувається зменшення тривалості формованих імпульсних сигналів АЕ. Тому при моделюванні результуючого сигналу АЕ на цій стадії тертя, з урахуванням зростання  $\tilde{P}$  і  $\tilde{\alpha}$ , значення  $\Delta\tilde{t}_j$  і  $\tilde{\delta}$  будемо зменшувати пропорційно зменшенню тривалості формованих імпульсних сигналів АЕ.

При моделюванні результуючого сигналу АЕ на стадії катастрофічного руйнування поверхонь тертя, з урахуванням переходу зі стадії передруйнування, початкове значення швидкості  $\tilde{\alpha}$  приймемо рівним  $\tilde{\alpha}=400$ . Значення  $\tilde{P}$  будемо лінійно змінювати у ді-

апазоні величин від  $\tilde{P}=2$  до  $\tilde{P}=2,5$ . При цьому миттєва швидкість руйнування буде зростати від  $\tilde{\alpha}=400$  до  $\tilde{\alpha}=500$ , тобто зі зростанням  $P$  руйнування буде починатися при  $\tilde{\alpha}=400$  і миттєво переходити до  $\tilde{\alpha}=500$ . Таке зростання  $\tilde{\alpha}$  буде приводити і до зростання граничного напруження руйнування. Як і у попередньому випадку, час початку руйнування  $\tilde{t}_0$  першої площадки контактної взаємодії у відносних одиницях буде залишатися незмінним. Його величина буде становити  $\tilde{t}_0=0,0006$ . Для заданих значень  $\tilde{\alpha}$  і  $\tilde{t}_0$  проведемо розрахунки залежностей зміни еквівалентних напружень  $\tilde{\sigma}$  при руйнуванні елементів КМ, згідно з [6], за результатами яких визначимо граничні напруження руйнування  $\tilde{\sigma}_0$ . Результати проведених розрахунків показали, що для  $\tilde{\alpha}=400$  і  $\tilde{t}_0=0,0006$  граничне напруження  $\tilde{\sigma}_0$  руйнування дорівнює  $\tilde{\sigma}_0=0,173464261$ , а для  $\tilde{\alpha}=500$  і  $\tilde{t}_0=0,0006$  граничне напруження  $\tilde{\sigma}_0$  руйнування становить  $\tilde{\sigma}_0=0,198498$ . Значення параметрів  $v_0$ ,  $g$  і  $r$ , що входять до виразу (1), приймемо рівними:  $\tilde{v}_0=10^6$ ;  $\tilde{g}=0,1$ ;  $\tilde{r}=10^4$ . Також будемо вважати, що час  $\tilde{t}_0$  початку руйнування елементів КМ зі зростанням  $\tilde{P}$  залишається незмінним. Як показують розрахунки залежностей зміни амплітуди імпульсних сигналів АЕ, зростання  $\tilde{\alpha}$  приводить до зменшення їх тривалості. Тому величині  $\Delta\tilde{t}_j$  та  $\tilde{\delta}$  будемо змінювати пропорційно зменшенню тривалості імпульсних сигналів АЕ відносно їх початкових значень на стадії, яка передує стадії катастрофічного руйнування поверхонь фрикційного контакту. При моделюванні результуючих сигналів АЕ на стадії катастрофічного руйнування поверхонь також будемо вважати, що при збільшенні  $\tilde{P}$  відбувається лінійне зростання площі контактної взаємодії, тобто відбувається зростання плям фрикційного контакту. Таке зростання площі відбувається у діапазоні величин від  $\tilde{S}=1$  до  $\tilde{S}=1,5$ .

На останній стадії моделювання, тобто стадії стабільного катастрофічного зношування поверхонь фрикційного контакту, будемо вважати, що процес руйнування відбувається з постійною швидкістю  $\tilde{\alpha}$  і постійним значенням навантаження  $\tilde{P}$ . Їх величини приймемо рівними:  $\tilde{\alpha}=500$  та  $\tilde{P}=2,5$ . При моделюванні, як і у попередніх випадках, будемо вважати, що час  $\tilde{t}_0$  початку руйнування першої площадки контактної взаємодії становить  $\tilde{t}_0=0,0006$ . Для  $\tilde{\alpha}=500$  і  $\tilde{t}_0=0,0006$  граничне напруження  $\tilde{\sigma}_0$  руйнування становить  $\tilde{\sigma}_0=0,198498$ . Значення параметрів  $v_0$ ,  $g$  і  $r$ , що входять до виразу (1), приймемо рівними:  $\tilde{v}_0=10^6$ ;  $\tilde{g}=0,1$ ;  $\tilde{r}=10^4$ . При цьому будемо вважати, що у процесі тертя відбувається подальше лінійне зростання площі контактної взаємодії поверхонь КМ. Будемо вважати, що таке зростання площі відбувається у діапазоні величин від  $\tilde{S}=1,5$  до  $\tilde{S}=1,7$ .

Прийняті умови для моделювання результуючих сигналів АЕ на стадіях сталого зношування пари тертя із КМ, стадії передруйнування, стадії катастрофічного зношування та стадії стабільного катастрофічного зношування у вигляді залежностей зміни навантаження  $\tilde{P}$ , а також площі контактної взаємодії  $\tilde{S}$  поверхонь фрикційного контакту в часі наведено на рис. 2. При побудові графіків, що наведено на рис. 2, час представлено у вигляді  $(\tilde{t} - \tilde{t}_0)$ .

При моделюванні загального результуючого сигналу АЕ, який формується при зношуванні поверхонь фрикційного контакту із КМ, на стадії сталого зношування проводилися розрахунки 4000 імпульсних сигналів, а на всіх інших визначених стадіях проводилися розрахунки по 1000 імпульсних сигналів.

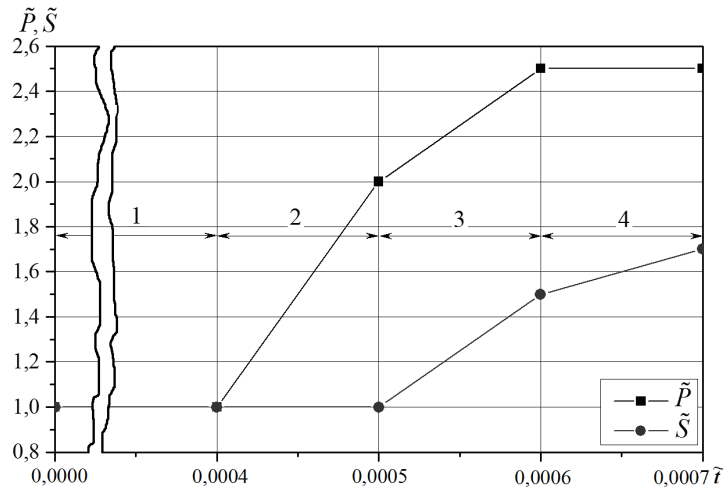


Рис. 2. Графік зміни навантаження  $\tilde{P}$  та площі контактної взаємодії  $\tilde{S}$  поверхонь фрикційного контакту в часі у відносних одиницях при моделюванні результуючого сигналу АЕ у процесі тертя поверхонь із композиційного матеріалу: 1 – стадія сталого зношування поверхонь фрикційного контакту; 2 – стадія, яка передує катастрофічному руйнуванню поверхонь фрикційного контакту (стадія передруйнування); 3 – стадія катастрофічного руйнування поверхонь фрикційного контакту; 4 – стадія сталого катастрофічного зношування поверхонь фрикційного контакту

Результати проведеного моделювання результуючого сигналу АЕ, який формується при терті поверхонь фрикційного контакту із КМ на стадії сталого зношування, стадії передруйнування, стадії катастрофічного зношування та стадії сталого катастрофічного зношування, у вигляді об'єднаного графіка залежності зміни його амплітуди в часі у відносних одиницях показано на рис. 3. При побудові графіка, що наведено на рис. 3, час представлено у вигляді  $(\tilde{t} - \tilde{t}_0)$ .

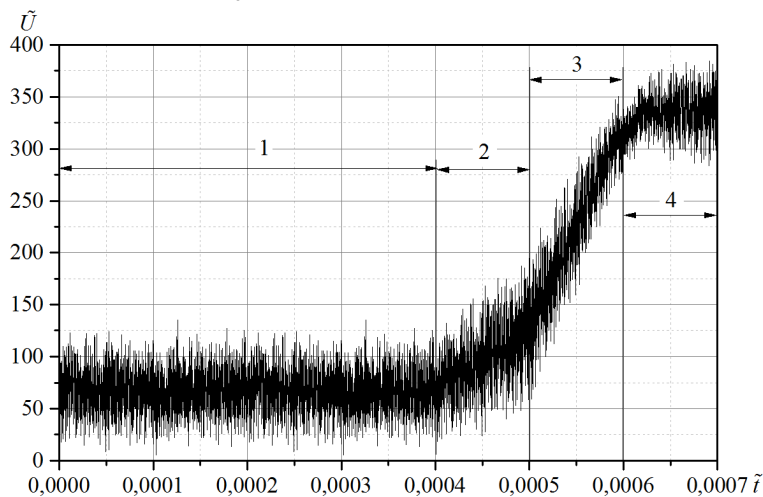


Рис. 3. Графік зміни амплітуди результуючого сигналу АЕ в часі у відносних одиницях при терті поверхонь із композиційного матеріалу: 1 – стадія сталого зношування поверхонь фрикційного контакту; 2 – стадія, яка передує катастрофічному руйнуванню поверхонь фрикційного контакту; 3 – стадія катастрофічного руйнування поверхонь фрикційного контакту; 4 – стадія сталого катастрофічного зношування поверхонь фрикційного контакту

Результати проведеного моделювання показують, що при неперервності процесу тертя та зношування поверхонь фрикційного контакту із КМ відбувається формування неперервного результуючого сигналу АЕ, який має порізану форму. На всіх стадіях тертя такий результуючий сигнал може характеризуватися деяким середнім рівнем амплітуди і величиною його розкиду, тобто стандартним відхиленням середнього рівня амплітуди та його дисперсією.

З отриманих результатів (рис. 3) видно, що при переході пари тертя з однієї стадії зношування поверхонь фрикційного контакту на іншу стадію не відбувається різких змін

у формі формованого результуючого сигналу АЕ. Однак спостерігаються поступові зміни у середньому рівні амплітуди результуючого сигналу АЕ та величинах його розкиду.

Проведемо розрахунки параметрів результуючого сигналу АЕ на окремих ділянках у межах визначених стадій. До таких параметрів будемо відносити середній рівень амплітуди  $\bar{U}$ , а також його стандартне відхилення  $s_{\bar{U}}$  та дисперсію  $s_{\bar{U}}^2$ . За результатами проведених розрахунків визначимо закономірності зміни параметрів результуючого сигналу АЕ та їх інформативність, тобто визначимо параметри, які є найбільш чутливими до зміни стадій процесу тертя та зношування поверхонь фрикційного контакту із КМ. Розрахунки середнього рівня амплітуди  $\bar{U}$  результуючого сигналу АЕ, його стандартне відхилення  $s_{\bar{U}}$  та дисперсію  $s_{\bar{U}}^2$  будемо проводити на послідовних вибірках сигналу АЕ. Довжина кожної вибірки буде становити 250 значень амплітуд результуючого сигналу АЕ.

З позиції контролю та діагностики вузлів тертя із КМ важливе значення має визначення переходу вузла тертя зі стадії сталого зношування до стадії катастрофічного руйнування. Перш за все, це стосується визначення стадії передруйнування, тобто визначення зародження початкової стадії катастрофічного руйнування. Тому розрахунки параметрів результуючого сигналу проведемо для стадій 1 і 2 (рис. 3). Результати проведених розрахунків амплітудних параметрів результуючого сигналу АЕ, що показано на рис. 3, для стадій 1 і 2 у вигляді залежностей зміни середнього рівня його амплітуди, стандартного відхилення та дисперсії в часі у відносних одиницях при розвитку процесу руйнування поверхонь фрикційного контакту із КМ показано на рис. 4.

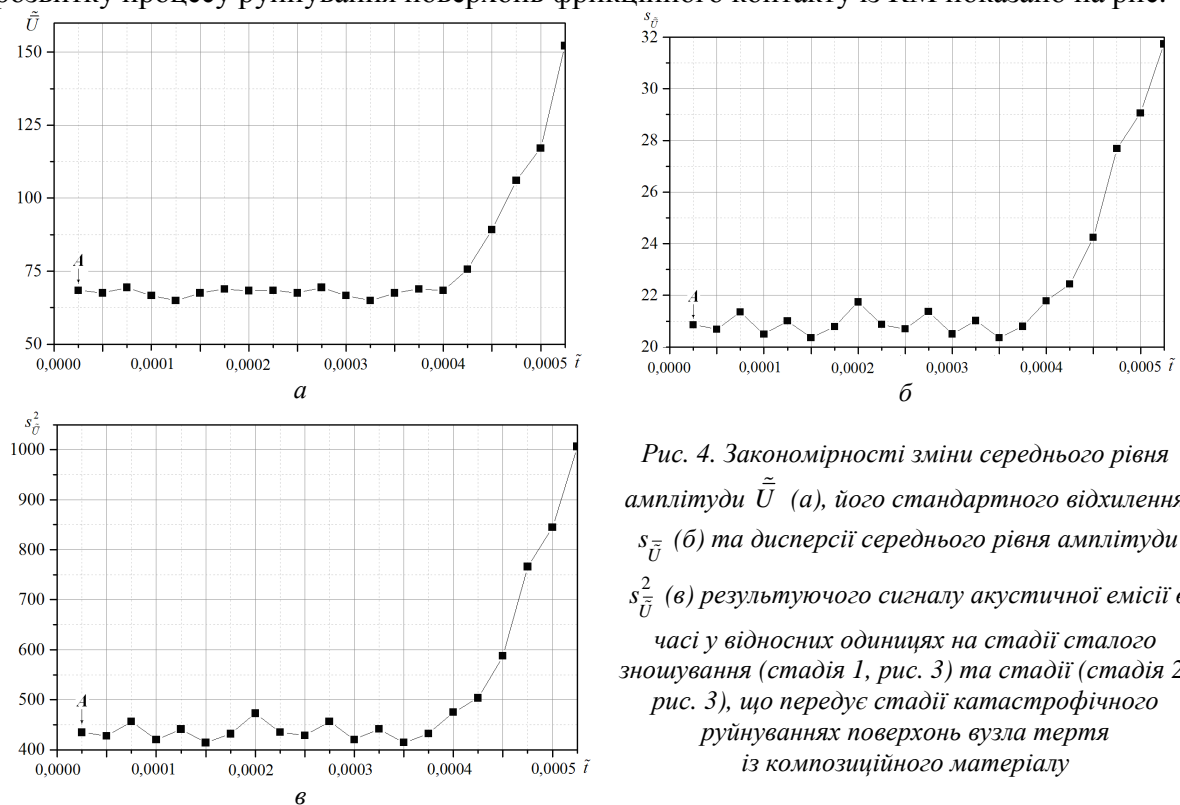


Рис. 4. Закономірності зміни середнього рівня амплітуди  $\bar{U}$  (а), його стандартного відхилення  $s_{\bar{U}}$  (б) та дисперсії середнього рівня амплітуди  $s_{\bar{U}}^2$  (в) результуючого сигналу акустичної емісії в часі у відносних одиницях на стадії сталого зношування (стадія 1, рис. 3) та стадії (стадія 2, рис. 3), що передує стадії катастрофічного руйнування поверхонь вузла тертя із композиційного матеріалу

З отриманих результатів (рис. 4) видно, що закономірності зміни амплітудних параметрів формованих результуючих сигналів АЕ на визначених стадіях подібні між собою. Якщо розглядати стадії 1 і 2 окремо, то закономірності зміни середнього рівня амплітуди  $\bar{U}$ , його стандартного відхилення  $s_{\bar{U}}$  та дисперсії  $s_{\bar{U}}^2$  на цих стадіях описуються лінійними функціями. При цьому на стадії сталого зношування поверхонь КМ (на інтервалі часу  $\tilde{t} =$



0,.....0,0004) практично не спостерігається зростання середнього рівня амплітуди  $\tilde{U}$  результуючого сигналу АЕ. Параметри  $s_{\tilde{U}}$  та  $s_{\tilde{U}}^2$ , без врахування точки переходу до стадії передруйнування при  $\tilde{t} = 0,0004$ , практично також не мають зростання, а з врахуванням точки переходу до стадії передруйнування при  $\tilde{t} = 0,0004$ , мають досить мале зростання. Таке зростання середнього рівня стандартного відхилення і дисперсії не перевищує 4 %. Однак на стадії передруйнування (на інтервалі часу  $\tilde{t} = 0,0004, \dots, 0,0005$ ) спостерігається зростання середнього рівня амплітуди  $\tilde{U}$ , його стандартного відхилення  $s_{\tilde{U}}$  та дисперсії  $s_{\tilde{U}}^2$  (рис. 4). При цьому зростання цих параметрів практично має лінійний характер.

Для визначення інформативності параметрів формованих сигналів АЕ проведемо розрахунки процентного приросту середнього рівня амплітуди  $\tilde{U}$ , його стандартного відхилення  $s_{\tilde{U}}$  та дисперсії  $s_{\tilde{U}}^2$  на стадії сталого зношування (стадія 1, рис. 3) та стадії передруйнування (стадія 2, рис. 3) щодо значень цих параметрів для першої обчислюваної точки на стадії сталого зношування (точка А, рис. 4). Результати проведених розрахунків процентного приросту  $\tilde{U}$ ,  $s_{\tilde{U}}$  та  $s_{\tilde{U}}^2$  наведено на рис. 5, де  $\Delta Q$  – процентний приріст середнього рівня амплітуди  $\tilde{U}$ , або його стандартного відхилення  $s_{\tilde{U}}$ , або дисперсії  $s_{\tilde{U}}^2$ .

З отриманих результатів (рис. 5) видно, що на стадії сталого зношування практично відсутній процентний приріст середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ його стандартного відхилення та дисперсії. Однак на стадії передруйнування (стадії, що передують стадії катастрофічного руйнування), тобто на інтервалі часу  $\tilde{t} = 0,0004, \dots, 0,0005$ , спостерігається зростання процентного приросту досліджуваних параметрів. Зростання середнього рівня амплітуди результуючих сигналів АЕ та його дисперсії значно перевищують зростання стандартного відхилення середнього рівня амплітуди. Оброблення отриманих даних показала, що на кінцевій стадії передруйнування (точка В на рис. 5) процентний приріст середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ перевищує у 1,4 рази процентний приріст його стандартного відхилення, а процентний приріст дисперсії середнього рівня амплітуди перевищує у 1,6 рази процентний приріст його стандартного відхилення. У той же час, на початковій стадії катастрофічного руйнування (точка С на рис. 5) процентний приріст середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ та його дисперсії перевищують у 5 разів процентний приріст стандартного відхилення середнього рівня амплітуди.

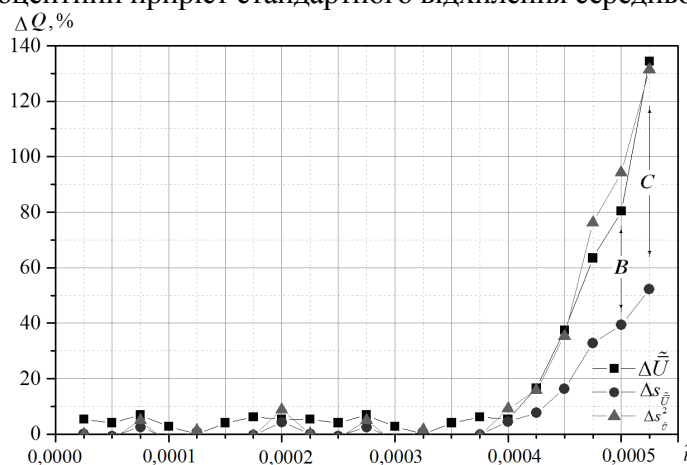


Рис. 5. Процентний приріст середнього рівня амплітуди  $\tilde{U}$ , його стандартних відхилень  $s_{\tilde{U}}$  та дисперсії

$s_{\tilde{U}}^2$  формованого результуючого сигналу акустичної емісії на стадії сталого зношування та стадії, що передують стадії катастрофічного зношування поверхонь фрикційного контакту із композиційного матеріалу

Отримані дані показують, що у реальному експерименті при розвитку процесу зношування поверхонь фрикційного контакту із КМ при переході вузла тертя до стадії, яка передує стадії виникнення катастрофічного зношування, і на початковій стадії катастрофічного зношування слід очікувати зростання середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ, його стандартного відхилення та дисперсії. При цьому найбільш чутливими параметрами до зміни стану поверхонь фрикційного контакту із КМ є середній рівень амплітуди результуючого сигналу АЕ та його дисперсія.

**Висновки і пропозиції.** Проведено моделювання результуючого сигналу АЕ, що формується на стадії сталого зношування, стадії передруйнування, стадії катастрофічного зношування та стадії сталого катастрофічного руйнування поверхонь фрикційного контакту. Отримані результати показали, що формований результуючий сигнал АЕ є неперервним сигналом із порізаною формою. Такий сигнал АЕ можна характеризувати середнім рівнем амплітуди, його стандартним відхиленням та дисперсією. При розвитку процесу зношування поверхонь із КМ відбувається зростання амплітудних параметрів результуючого сигналу АЕ. Закономірності зміни даних параметрів результуючого сигналу АЕ подібні між собою.

Аналіз параметрів результуючого сигналу АЕ з визначенням процентного їх приросту показав, що на стадії сталого зношування практично відсутній процентний приріст середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ його стандартного відхилення та дисперсії. На стадії передруйнування (стадії, що передує стадії катастрофічного руйнування) спостерігається зростання процентного приросту досліджуваних параметрів. Однак процентний приріст середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ та його дисперсії значно перевищують процентний приріст стандартного відхилення середнього рівня амплітуди.

Результати проведених досліджень показують, що в реальному експерименті при розвитку процесу зношування поверхонь фрикційного контакту із КМ при переході вузла тертя до стадії, яка передує стадії виникнення катастрофічного зношування, слід очікувати зростання середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ, його стандартного відхилення та дисперсії. В той же час інтерес представляє дослідження енергетичних параметрів результуючого сигналу АЕ, що формується при терті та зношуванні поверхонь фрикційного контакту з КМ.

#### Список використаних джерел

1. *Cao, D.* 2010. Investigation of acoustic emission and surface treatment to improve tool materials and metal forming process. Dissertation The Degree Doctor of Philosophy in Materials Engineering. University of Dayton (Dayton, Ohio). – 116 p.
2. *Rubtsov, V. E.; Kolubaev, A. V.; Popov, V. L.* 2013. The use of acoustic emission analysis for the wear in sliding friction. Letters to ZHTF. – Vol. 4: 79-86.
3. *Filonenko, S.; Kalita, V.; Kosmach, A.* 2012. Destruction of composite material by shear load and formation of acoustic radiation. Aviation. – Vol. 16, N 1: 5–13.
4. *Філоненко С. Ф.* Вплив швидкості навантаження на амплітудні та енергетичні параметри сигналів акустичної емісії при руйнуванні композиційних матеріалів поперечною силою / С. Ф. Філоненко, О. П. Космач, Т. М. Косицька // Технологические системы. – 2012. – № 1 (58). – С. 46-51.
5. *Filonenko S. F.* Influence of friction surfaces properties of composite materials on acoustic emission/ S.F. Filonenko, O.P. Kosmach // Proceedings of the NAU. – 2013. – No1. – P. 70-77.
6. *Filonenko S. F.* The influence of loading speed on the amplitude and energy parameters of acoustic emission signals at destruction of composite materials under shear load / S. F. Filonenko, O. P. Kosmach, T. M. Kositskaya // Technological systems. – 2012. – № 1 (58). – P. 46-51.