

УДК 620.179:534.6

МОДЕЛЬ СИГНАЛУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ТЕРТІ ПОВЕРХОНЬ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Філоненко С. Ф., д-р техн. наук, проф., Косицька Т. М., канд. хім. наук, Космач О. П.

Національний авіаційний університет

fls01@mail.ru

Представлена модель результуючого сигналу акустичної емісії, який формується на етапі нормального зношування поверхонь тертя з композиційного матеріалу. Проведено моделювання результуючого сигналу акустичної емісії при постійному осьовому навантаженні та зміні швидкості обертання пари тертя, варіації часу початку руйнування елементів на площадці контактної взаємодії за заданою швидкістю обертання, а також варіації кількості зруйнованих елементів за заданою швидкістю обертання.

Ключові слова: модель, акустична емісія, сигнал, тертя, амплітуда, навантаження, зношення, композиційний матеріал.

The model of the resulting AE signal, which is formed at the stage of normal wear of the friction surfaces based on composite material, is conducted. The modeling of resulting AE signal at the constant axial load and change of the friction pair speed, variations start time destruction of elements in contact interaction platform at given speed and variation of damaged elements number at given speed are showed.

Keywords: model, acoustic emission, friction, signal, amplitude, load, wear, composite material.

Постановка проблеми

Оцінка технічного стану і продовження ресурсу складних трибосистем є важливою науково-технічною проблемою. Для її вирішення використовуються як розрахункові, так і експериментальні методи. Одним з таких методів, який відображає кінетики процесів, що протікають в твердих тілах під навантаженням, є метод акустичної емісії (АЕ). Метод АЕ має високу чутливість до процесів пластичного деформування і руйнування матеріалів на субмікро-, мікро- і макрорівнях. Однак значна кількість експериментальних залежностей, які отримано для конкретних умов випробувань різноманітних матеріалів і конструкцій, не дають змоги узагальнити і однозначно інтерпретувати отриману інформацію. З даної точки зору, важливим є теоретичні дослідження процесів акустичного випромінювання і формованих сигналів АЕ. Це відноситься не тільки до умов статичних, але й і динамічних випробувань матеріалів. Зокрема, до аналізу АЕ під час тертя.

Обробка та аналіз АЕ під час тертя направлени на отримання взаємозв'язку параметрів реєстрованого акустичного випромінювання з фізико-хімічними процесами, які відбуваються в поверхневих шарах матеріалів під час їх контактної взаємодії.

Отримані залежності переважно є емпіричними, а теоретичні роботи практично відсутні. Безумовно, що розробка моделей сигналів АЕ, які формуються при зношуванні поверхневих шарів матеріалів, і моделювання закономірностей їх зміни під час дії різноманітних чинників, є основою в розробці методів технічної діагностики вузів тертя.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідженням АЕ під час тертя і зношування поверхневих шарів матеріалів приділяється значна увага. Однак більшість опублікованих робіт мають експериментальний характер [1—7]. При цьому розглядаються закономірності зміни акустичного випромінювання (усередненої амплітуди сигналів АЕ) залежно від матеріалів, які використовуються в елементах контактної взаємодії і технологічних режимів роботи вузів тертя (навантаження, швидкості обертання, температури та ін.). Робіт, які відносяться до теоретичних досліджень АЕ під час тертя та зношення, практично немає. Мова йде про роботи, які присвячені аналітичному опису сигналів АЕ, які формуються під час тертя та зношування.

У працях [8—10] розглянуто модель і результати моделювання результуючого сигналу АЕ при зношуванні поверхневих шарів матеріалів. Модель результуючого сигналу основана на моделях сигналів АЕ, що формуються при руйнуванні вторинних структур I і II типу, які розглянуто у праці [11]. Результати моделювання результуючих сигналів АЕ [8—10] дали змогу встановити закономірності зміни їх параметрів на стадії нормального і катастрофічного зношування. При цьому було досліджено вплив різноманітних факторів: навантаження, яке прикладено до вузла тертя; швидкості обертання; об'єму матеріалу, який вступив в пластичну деформацію. Також було показано, що результати теоретичних досліджень мають добре узгодження з експериментальними даними. Слід зазначити, що модель формованого результуючого сигналу АЕ під час тертя сполучених поверхонь стосується

матеріалів з традиційною структурою. Однак існує значна кількість вузлів тертя, елементами яких є більш складні матеріали — композиційні матеріали. Руйнування таких матеріалів має свою специфіку, яка обумовлена специфікою їх структури.

Однією з концепцій, яка використовується під час дослідження руйнування композиційних матеріалів в умовах дії напружень розтягу і поперечного (зсувного) навантаження, є концепція представлення композиційного матеріалу у вигляді пучка волокон — *fiber bundle model* (FBM) [12—17]. Згідно з концепцією FBM передбачається, що матеріал складається з заданої кількості волокон (зв'язки), руйнування яких відбувається послідовно при досягненні певного граничного значення міцності. При цьому вплив матриці, поверхні розділу матриця-волокно, а також взаємодія між окремими волокнами на процес руйнування матеріалу не враховуються.

Згідно з концепцією FBM, у працях [18—20] розглянуто модель і результати моделювання сигналів АЕ під час руйнування композиційного матеріалу в умовах розтягу. При цьому досліджено основні закономірності зміни форми і параметрів сигналів АЕ залежно від швидкості руйнування композиційного матеріалу та його фізико-механічних властивостей. Модель сигналу АЕ, який формується під час руйнування композиційного матеріалу в умовах дії поперечної сили та результати його моделювання розглянуто у працях [21—23]. При цьому показано вплив швидкості руйнування та фізико-механічних характеристик композиційного матеріалу на сигнали АЕ. В основі побудови моделі використано концепцію FBM, а також «правило або» (OR), згідно з яким у разі досягнення певного рівня міцності руйнування волокон (елементів) відбувається або згин або розтяг. При цьому враховано закономірності зміни еквівалентного осьового напруження при розвитку процесу руйнування волокон композиційного матеріалу за умови [0, 1] рівномірного розподілу щільності ймовірності елементів за міцністю, а також кінетичні закономірності процесу їх руйнування.

Концепція FBM, як зазначено у праці [15], також може бути використана як проста модель при зношуванні композиційних матеріалів у вузлах тертя, де їх елементи (волокна) можна розглядати у вигляді шорсткостей (виступів) контактуючих поверхонь. При цьому необхідно враховувати напрям дії сил або еквівалентних напружень. Безумовно, що модель руйнування композиційного матеріалу під час дії поперечної сили і модель формованого сигналу АЕ, які розглянуті у працях [21—23], можуть бути основою моделі

результуючого сигналу АЕ, який формується під час тертя поверхневих шарів композиційного матеріалу. При цьому необхідно здійснити перехід від статичного до неперервного динамічного виду навантаження композиційного матеріалу (його поверхневих шарів). Опис результуючого сигналу АЕ під час тертя поверхневих шарів композиційних матеріалів є важливим з погляду розробки методів технічної діагностики їх стану, тобто технічної діагностики вузлів тертя на основі композиційних матеріалів.

Задачі дослідження

У роботі розглянуто модель результуючого сигналу АЕ, який формується на етапі нормального зношування поверхонь тертя на основі композиційного матеріалу. Проведено моделювання результуючого сигналу АЕ за постійного осьового навантаження та зміни швидкості обертання пари тертя, варіації часу початку руйнування елементів на площадці контактної взаємодії при заданій швидкості обертання, а також варіації кількості зруйнованих елементів за заданої швидкості обертання. Буде показано, що результуючий сигнал АЕ є неперервним сигналом з визначеним середнім рівнем амплітуди та певним її розкидом. Формований сигнал АЕ має порізану форму. Також буде показано, що збільшення швидкості обертання пари тертя, варіація місця положення площадки руйнування на площадці контактної взаємодії, а також зменшення кількості зруйнованих елементів приводять до зростання середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ та збільшення величини її розкиду.

Модель сигналу акустичної емісії, який формується під час зношування поверхонь тертя

Припустимо, що маємо вузол тертя, який являє собою кінематичну схему із зразків композиційного матеріалу у вигляді роликів (рис. 1, а). При цьому поверхня фрикційного контакту такої трибосистеми обмежена деякою площею S , яка являє собою лінію малої ширини. Будемо вважати, що поверхні фрикційного контакту пройшли припрацювання, а режим роботи вузла тертя відповідає стадії нормального зношення.

Будемо вважати, що поверхні сполучення в площі контакту S складаються з виступів. Оскільки розглядаємо композиційний матеріал, для якого будемо використовувати концепцію FBM, то в ідеалізованому випадку ці виступи будуть представляти собою волокна (елементи) однакового геометричного розміру. Вони є площадками контакту (рис. 1, б). Будемо вважати, що всі елементи мають однакові фізико-механічними властивості. Припустимо, що кількість елементів у

сполученні дорівнює N_0 . Вони рівномірно розподілені по поверхнях сполучення. Матеріали контактних поверхонь тертя мають однакові фізико-механічні властивості та структурний стан.

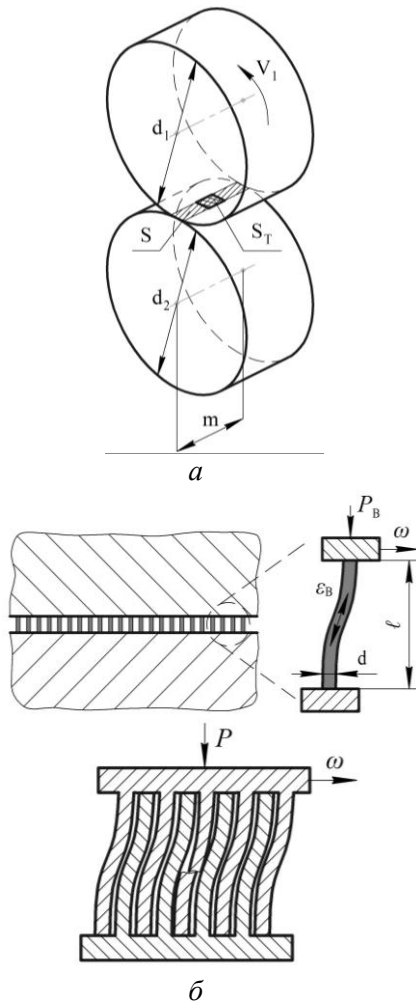


Рис. 1. Кінематична схема вузла тертя у вигляді роликів (а), схема взаємодії площадок контактної взаємодії та ідеалізована схема руйнування елементів поверхонь з використанням концепції FBM (б): d_1, d_2 — відповідно, діаметральні розміри першого та другого зразків; m — товщина зразка; V_1 — швидкість обертання зразка; S — площадка контактної взаємодії; S_T — площа контакту в площадці контактної взаємодії; d — розмір сторони елемента композиційного матеріалу (зв'язки); l — довжина елемента; D_B, D — відповідно, зусилля стиснення елемента та контактуючих поверхонь; ω — поперечна сила

Кількість елементів сполучення N_0 буде визначатися виходячи з їх геометричних розмірів та площі контактної взаємодії. Відповідно до цього, можна розглядати і деяку малу область контактної взаємодії S_T в площі S (рис. 1, а). У цьому випадку буде змінюватися лише вихідна кількість елементів N_0 .

Припустимо, що до вузла тертя прикладене певне осьове навантаження P , яке забезпечує постійну силу контактної взаємодії, а також поперечна сила, яка забезпечується обертанням вузла тертя (рис. 1, б). Поперечна сила перпендикулярна елементам на поверхнях контактної взаємодії (рис. 1, б). Руйнування елементів при дії поперечної сили, згідно «правила OR» [16; 17], відбувається або за рахунок згину або за рахунок розтягу. При цьому елементи деформуються пружно до руйнування, а їх руйнування відбувається послідовним чином. Взаємну механічну дію елементів, а також матриці не будемо враховувати, що обумовлено допущеннями, які розглянуто в роботах [21—23]. Безумовно, що поперечна сила ω пов'язана з осьовим навантаженням, величина якої буде впливати на граничне напруження руйнування елементів. При цьому, чим більше P , тим буде більше значення граничного напруження руйнування. Будемо вважати, що для деякого заданого значення P прикладається така поперечна сила, при якій граничне напруження руйнування складає величину σ_0 .

З урахуванням прийнятих умов, під час руйнування N_0 елементів на площадці контактної взаємодії S у разі дії поперечної сили, згідно з працею [22], буде формуватися результуючий сигнал АЕ вигляду

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

де N_0 — вихідна (початкова) кількість елементів; v_0, r — константи, які залежать від фізико-механічних характеристик матеріалу; α — швидкість навантаження елементів; t, t_0 — відповідно, поточний час та час початку руйнування елементів; g — коефіцієнт, який залежить від геометричних розмірів елементів; $U_0 = N_0 \beta \delta_s$ — максимально можливе зміщення при миттєвому руйнуванні елементів на площадці контактної взаємодії; β — коефіцієнт пропорційності; δ_s — параметр, чисельне значення якого визначається формою одиничного імпульсу збурення під час руйнування одиночного елемента.

Сигнал АЕ, згідно з виразом (1), який формується під час руйнування елементів на даній (одиночній) площадці контактної взаємодії, є імпульсним сигналом. Однак, відповідно з прийнятими умовами навантаження вузла тертя, за

заданої швидкості обертання V_1 буде відбуватися неперервна, послідовна зміна площадок контактної взаємодії у часі.

У цьому випадку результуючий сигнал АЕ буде являти собою суму імпульсних сигналів, які формуються на кожній площадці контактної взаємодії, тобто для результуючого сигналу АЕ можна записати

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

де j — порядковий номер j -ї площадки контактної взаємодії (реєстрованого j -го інтервалу часу); $U_j(t_j)$ — j -й імпульсний сигнал АЕ, який формується на j -й площадці контактної взаємодії, згідно виразу (1).

Якщо припустити, що руйнування елементів композиційного матеріалу охоплює всю площадку контактної взаємодії поверхонь вузла тертя (кількість зруйнованих елементів на кожній площадці S (рис. 1, а) дорівнює N_0), тоді інтервал часу $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ між початком формування чергового та попереднього імпульсного сигналу АЕ буде постійною величиною. При цьому формовані імпульсні сигнали АЕ будуть однакові. Якщо руйнування елементів композиційного матеріалу охоплює деяку змінну площу S_T на площадці S , то буде змінюватися не тільки інтервал часу Δt_i , але й амплітуда чергового імпульсного сигналу АЕ.

В обох випадках формований результуючий сигнал АЕ може бути як імпульсним, так і неперервним. Це буде обумовлено тільки динамікою зміни площадок контактної взаємодії.

Відзначимо, що як показує практика, результуючий сигнал АЕ, що формується під час тертя різноманітних матеріалів, являє собою неперервний сигнал з деяким середнім значенням амплітуди і різною величиною її розкиду.

Проведемо моделювання результуючого сигналу АЕ для двох розглянутих умов або в два етапи.

На першому етапі, розглянемо випадок, коли руйнування елементів композиційного матеріалу охоплює всю площадку контактної взаємодії поверхонь вузла тертя ($N_0 = \text{const}$) при заданому постійному інтервалі часу Δt_i зміни площадок. Це означає, що для кожного наступного j -го сигналу АЕ час початку руйнування t_{0j} буде становити

$$t_{0j} = t_0 + j \cdot \Delta t_i, \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad j = 0, 1, \dots, m.$$

На другому етапі, будемо розглядати випадок, коли руйнування елементів композиційного матеріалу охоплює деяку площу на площадці контактної взаємодії поверхонь вузла тертя ($N'_0 = \text{const}$) при змінному часі t_{0j} руйнування площадок, що обумовлено зміною місця положення площадки руйнування. Іншими словами, моделювання будемо проводити при варіюванні величини Δt_i .

Крім того, розглянемо випадок, коли відбувається зміна N_0 при постійному інтервалі Δt_i .

Результати першого етапу моделювання результуючого сигналу АЕ, згідно з формулою (2), показані на рис. 2 у відносних одиницях. При побудові графіків рис. 2 всі параметри, які входять у вираз (1) приведені до безрозмірних величин, а час подано у нормованих одиницях.

Моделювання проводили за умови, що площадки контактної взаємодії i , відповідно, кількість зруйнованих елементів, є постійними величинами. При цьому параметри ν_0 , r та g , які входять у вираз (1), були прийняті рівними: $\nu_0 = 100000$; $r = 10000$; $g = 0,1$.

Зміна значення Δt_i означає зміну швидкості обертання пари тертя і, як наслідок, зміну швидкості навантаження і часу початку руйнування [22; 23].

Збільшення швидкості навантаження здійснювалося пропорційно зменшенню значення Δt_i .

При моделюванні проміжки часу Δt_i між змінами площадок контактної взаємодії знаходилися в діапазоні величин від $4 \cdot 10^{-7}$ до $2,63 \cdot 10^{-7}$. Значення $\Delta \tilde{t}_i$ у межах одного експерименту залишалося постійною величиною.

Для заданих умов граничне напруження початку руйнування елементів не змінюється і дорівнює $\tilde{\sigma}_0 = 0,087153950$, а величини α і t_0 для рис. 2, відповідно, становили: a — $\alpha = 500$, $\tilde{t}_0 = 0,0002$; b — $\alpha = 575$, $\tilde{t}_0 = 0,000174$; v — $\alpha = 661,25$, $\tilde{t}_0 = 0,000151$; z — $\alpha = 760,44$, $\tilde{t}_0 = 0,000131$.

З рис. 2 видно, що для заданих умов моделювання результуючий сигнал АЕ являє собою неперервний сигнал з деяким середнім значенням амплітуди та певною величиною її розкиду.

При зменшенні часу $\Delta \tilde{t}_i$ зміни площадок контактної взаємодії характеру зміни результуючого сигналу АЕ не спостерігається.

Однак, відбувається зростання середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ та збільшення величини її розкиду. Такі закономірності зміни параметрів результуючого сигналу АЕ обумовлені змінами умов перекриття імпульсних сигналів, які формуються при руйнуванні елементів на площадці контактної взаємодії.

Так, для деякого початкового значення $\Delta \tilde{t}_1$ існує визначене перекриття попереднього та наступного імпульсного сигналів АЕ (рис. 3).

Таке перекриття призводить до збільшення нижнього та верхнього рівнів амплітуди результуючого сигналу АЕ.

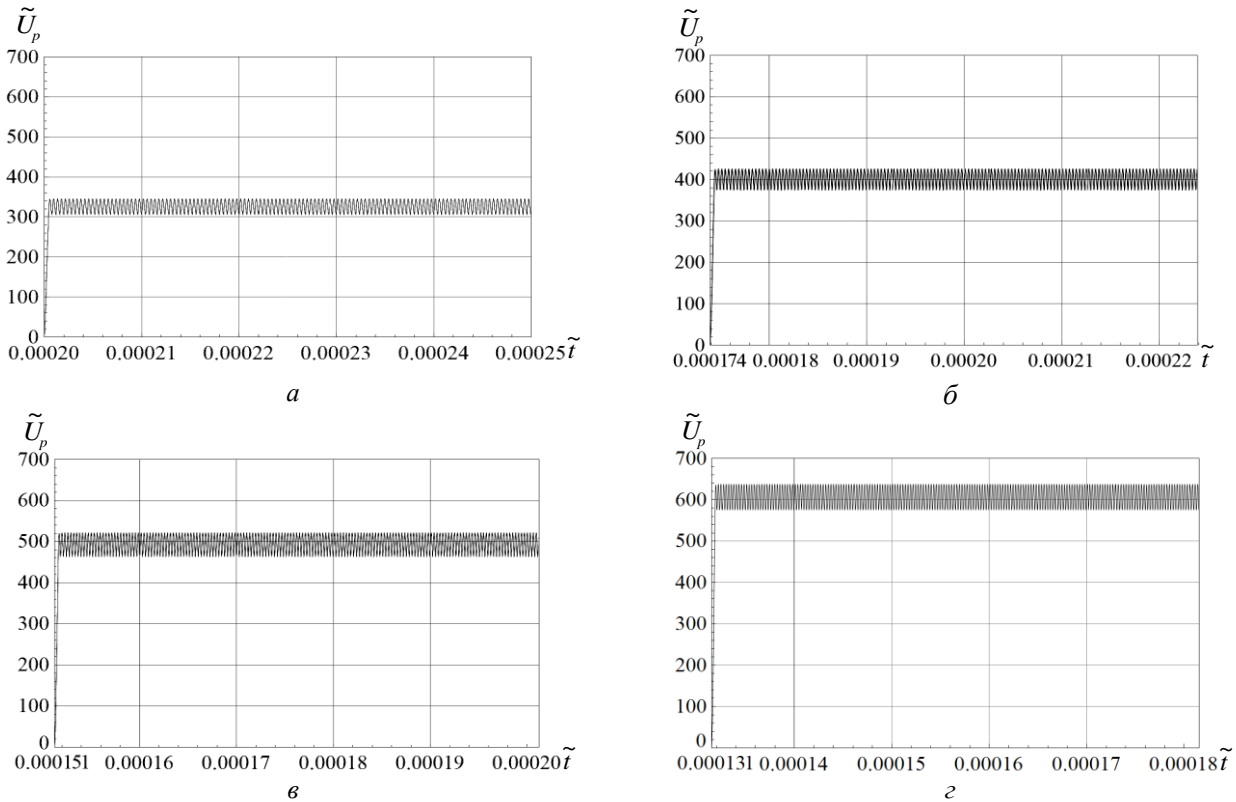


Рис. 2. Графіки зміни амплітуди результуючого сигналу АЕ в часі, згідно виразу (2), у відносних одиницях при зміні часового інтервалу руйнування площадок контактної взаємодії Δt_i .

Значення Δt_i : $a - 4 \cdot 10^{-7}$; $b - 3,48 \cdot 10^{-7}$; $v - 3,02 \cdot 10^{-7}$; $z - 2,63 \cdot 10^{-7}$.
 Значення α : $a - \alpha = 500$; $b - \alpha = 575$; $v - \alpha = 661,25$; $z - \alpha = 760,44$;
 $\nu_0 = 100\,000$, $r = 10\,000$, $g = 0,1$; $\tilde{\sigma}_0 = 0,08715395$.

Час початку руйнування \tilde{t}_0 : $a - \tilde{t}_0 = 0,0002$; $b - \tilde{t}_0 = 0,000174$; $v - \tilde{t}_0 = 0,000151$; $z - \tilde{t}_0 = 0,000131$

При меншому значенні часу $\Delta \tilde{t}_2$ появи наступного імпульсного сигналу АЕ (зростання швидкості зміни площадок контактної взаємодії), якщо ступінь перекриття сигналів в часі зростає (рис. 3), то буде відбуватися подальше збільшення нижнього та верхнього рівнів результуючого сигналу. При цьому величина нижнього рівня буде наближатися до величини верхнього рівня формованого сигналу АЕ. Тому буде відбуватися зростання середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ та зменшення величини його розкиду.

Однак при збільшенні швидкості навантаження, згідно [22; 23], відбувається зростання

амплітуди імпульсних сигналів АЕ та зменшення їх тривалості.

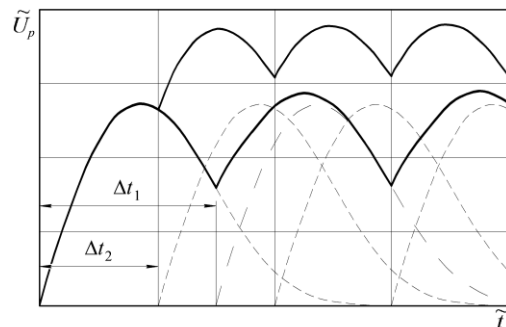


Рис. 3. Формування результуючого сигналу АЕ, згідно (2), у відносних одиницях під час тертя поверхонь сполучення

Такі зміни параметрів імпульсних сигналів АЕ змінюють умови їх перекриття, а саме зменшують їх перекриття. За рахунок зростання амплітуди імпульсних сигналів відбувається зростання середнього рівня амплітуди результуючих сигналів, а за рахунок зменшення їх перекриття — збільшення величини її розкиду.

З рис. 2 також видно, що для прийнятих умов (сценарію) моделювання результуючий сигнал АЕ являє собою практично синусоїдальний сигнал з деяким середнім рівнем амплітуди, значення якої не дорівнює нулю. Однак реальні результуючі сигнали АЕ, які реєструються при терті різноманітних матеріалів, мають більш порізану завадоподібну форму з різними інтервалами часу між викидами та падіннями амплітуди, а також різними їх величинами. Це, очевидно, обумовлено двома причинами.

По-перше, різним розміщенням локальних площадок руйнування S_T на площі контактної взаємодії S (рис. 1, *a*), що впливає на інтервали часу між початком руйнування елементів на площадках контакту.

По-друге, різною кількістю зруйнованих елементів на площадці S_T , що впливає на амплітуду формованого імпульсного сигналу АЕ.

Виходячи з цього, на другому етапі моделювання будемо розглядати випадок, коли руйнування елементів композиційного матеріалу охоплює деяку постійну площу на площадці контактної взаємодії поверхонь вузла тертя ($N_0 = \text{const}$) та змінному інтервалу часу Δt_i , що пов'язано із різним місцем положення площі S_T на площадці S . Також розглянемо випадок, коли інтервал часу Δt_i є постійною величиною, а відбувається зміна тільки кількості зруйнованих елементів, тобто $N_0 \neq \text{const}$.

Результати другого етапу моделювання результуючого сигналу АЕ, згідно з формулою (2), показані на рис. 4 та 5 у відносних одиницях. При побудові графіків рис. 4 і 5 усі параметри, які входять у вираз (1), зведені до без розмірних величин, а час подано в нормованих одиницях.

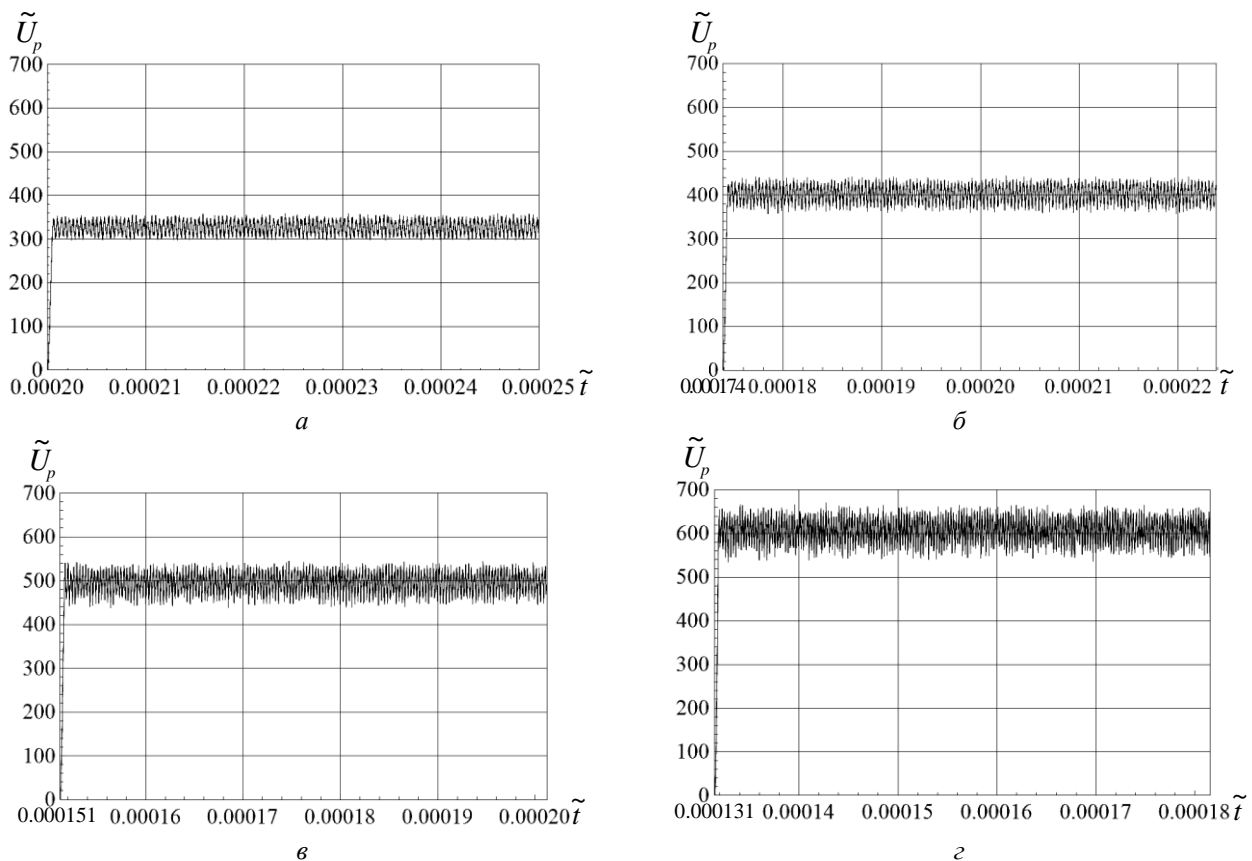


Рис. 4. Результуючі сигнали АЕ, згідно з формулою (2), у відносних одиницях при зміні інтервалу часу руйнування площадок контактної взаємодії.

Значення Δt_i : *a* — $4 \cdot 10^{-7}$; *b* — $3,48 \cdot 10^{-7}$; *v* — $3,02 \cdot 10^{-7}$; *z* — $2,63 \cdot 10^{-7}$.

Значення α : *a* — $\alpha = 500$; *b* — $\alpha = 575$; *v* — $\alpha = 661,25$; *z* — $\alpha = 760,44$;

$v_0 = 100\,000$; $r = 10\,000$; $g = 0,1$; $\tilde{\sigma}_0 = 0,08715395$.

Варіація Δt_i на величину δ у діапазоні значень від 0 до 2×10^{-8}

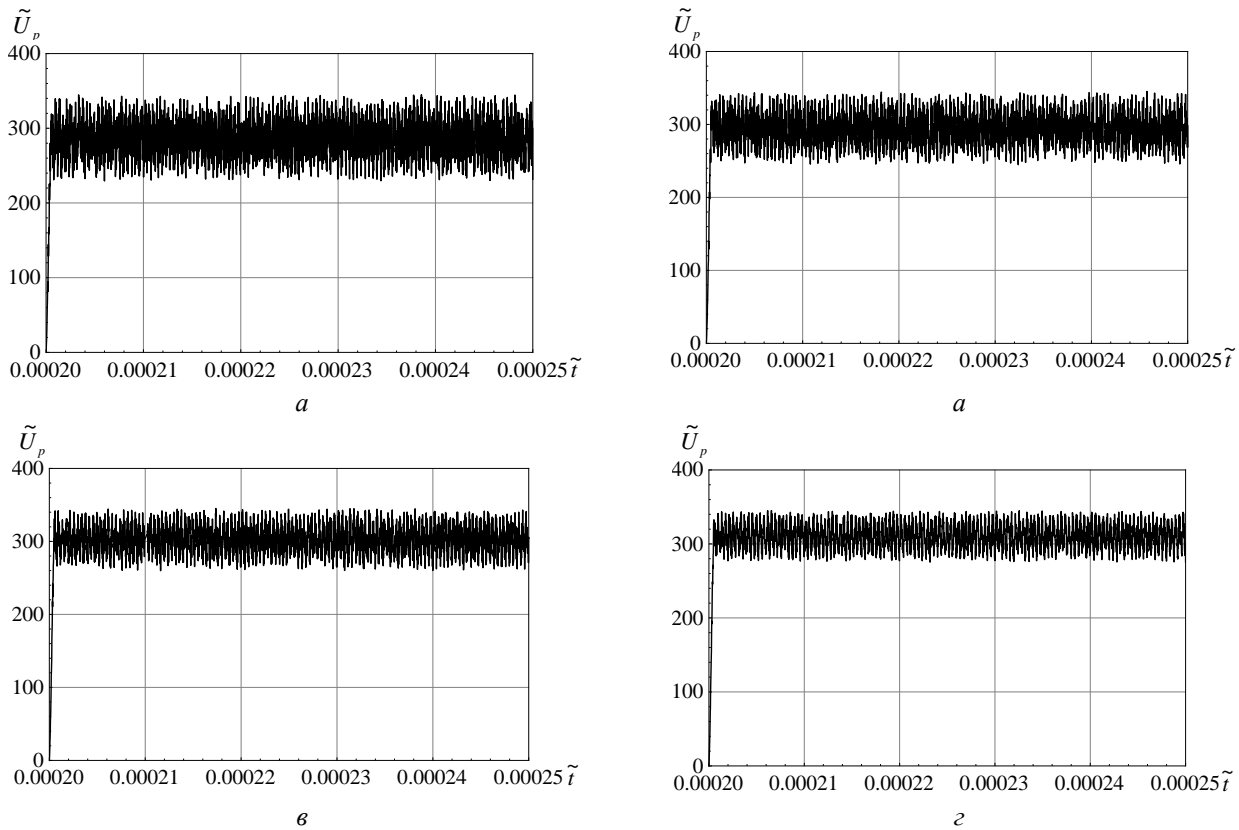


Рис. 5. Результуючі сигнали АЕ, згідно з формулою (2), у відносних одиницях при зміні кількості зруйнованих елементів, $N'_0 = q N_0$.

Значення q : a — від 0,75 до 1; $б$ — від 0,8 до 1; $в$ — від 0,85 до 1; $г$ — від 0,9 до 1.

$$\Delta t = 4 \cdot 10^{-7}; \nu_0 = 100\,000; r = 10\,000; g = 0,1; \alpha = 500;$$

$$\tilde{\sigma}_0 = 0,08715395. \text{ Час початку руйнування } \tilde{t}_0 = 0,0002$$

Моделювання результуючих сигналів АЕ, які показані на рис. 4, проводили за умови, що площа S_T на площадці контактної взаємодії і, відповідно, кількість зруйнованих елементів, є постійними величинами. Однак, ці площі можуть розміщуватися в довільному місці площадки S , що буде приводити до зміни часу початку появи наступного сигналу АЕ. При моделюванні параметри ν_0 , r та g , які входять у вираз (1), були прийняті рівними: $\nu_0 = 10\,0000$; $r = 10\,000$; $g = 0,1$. Граничне напруження початку руйнування елементів не змінюється і дорівнює $\tilde{\sigma}_0 = 0,087153950$. Величини α і t_0 для рис. 3 становили: $a - \alpha = 500$, $\tilde{t}_0 = 0,0002$; $б - \alpha = 575$, $\tilde{t}_0 = 0,000174$; $в - \alpha = 661,25$, $\tilde{t}_0 = 0,000151$; $г - \alpha = 760,44$, $\tilde{t}_0 = 0,000131$.

Проміжки часу $\Delta \tilde{t}_i$ між змінами площадок дорівнювали: $\Delta \tilde{t}_1 = 4 \cdot 10^{-7}$; $\Delta \tilde{t}_2 = 3,48 \cdot 10^{-7}$; $\Delta \tilde{t}_3 = 3,02 \cdot 10^{-7}$; $\Delta \tilde{t}_4 = 2,63 \cdot 10^{-7}$. Час початку появи

наступного сигналу АЕ задавався у вигляді $\tilde{t}_{0j} = \tilde{t}_0 + j\Delta \tilde{t}_i + \delta$. Значення δ змінювалося в діапазоні величин від 0 до 2×10^{-8} . Величина δ задавалася довільним чином.

Моделювання результуючих сигналів АЕ, показаних на рис.5, проводили за умови, що проміжки часу $\Delta \tilde{t}_i$ між змінами площадок контактної взаємодії і кількість зруйнованих елементів змінювалися. Така зміна N_0 буде впливати на амплітуду імпульсних сигналів АЕ. При моделюванні результуючого сигналу АЕ значення кількості зруйнованих елементів задавалося у вигляді $N'_0 = q N_0$, де q — коефіцієнт. Значення коефіцієнту q знаходилося в діапазоні величин: для рис. 5, a — від 0,75 до 1; для рис. 5, $б$ — від 0,8 до 1; для рис. 5, $в$ — від 0,85 до 1; для рис. 5, $г$ — від 0,9 до 1.

При побудові графіків рис. 5 значення параметра q в указаних діапазонах величин змінювалося довільним чином. Параметри ν_0 та r , які входять у вираз (1), були прийняті рівними:

$v_0 = 100\ 000$; $r = 10\ 000$. Величини g та α були прийняті рівними: $g = 0,1$; $\alpha = 500$. Час початку руйнування елементів на площадці контактної взаємодії i , відповідно, граничне напруження початку руйнування були прийняті рівними: $\tilde{\sigma}_0 = 0,087153950$; $\tilde{t}_0 = 0,0002$. Час зміни площадок контактної взаємодії був постійним і становив $\Delta t_i = \Delta t = 4 \cdot 10^{-7}$.

Із рис. 4 видно, що для прийнятих умов моделювання результуючі сигнали АЕ являють собою неперервні сигнали з деяким середнім значенням амплітуди і різною величиною її розкиду. При зменшенні часу $\Delta \tilde{t}_i$ зміни площадок контактної взаємодії характер результуючих сигналів АЕ не змінюється. Відбувається зростання середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ і збільшення величини її розкиду. У той же час, спостерігається значна порізаність амплітуди формованого сигналу АЕ. Це обумовлено варіацією інтервалів часу появи імпульсних сигналів АЕ, згідно з прийнятим сценарієм протікання процесу руйнування елементів, тобто варіацією умов перекриття імпульсних сигналів. У випадку змінної кількості зруйнованих елементів на кожній площадці контактної взаємодії, як видно з рис. 5, закономірності зміни результуючого сигналу АЕ зберігаються. Для прийнятих умов моделювання при постійному інтервалі часу початку руйнування елементів на площадці контактної взаємодії зі зменшенням розкиду амплітуди імпульсних сигналів АЕ (зменшення розкиду кількості зруйнованих елементів) спостерігається зростання середнього рівня амплітуди результуючого сигналу і зменшення величини її розкиду. Результуючий сигнал АЕ має значну порізаність форми. Подібні закономірності зміни параметрів результуючого сигналу також обумовлені варіацією умов перекриття імпульсних сигналів АЕ, які формуються при руйнуванні елементів в площадці контактної взаємодії.

Висновки

Розроблено модель результуючого сигналу АЕ, який формується при руйнуванні елементів композиційного матеріалу на площадці контактної взаємодії пари тертя. Проведено моделювання результуючого сигналу АЕ при зміні факторів, що впливають. Показано, що в процесі тертя формується неперервний сигнал АЕ з деяким середнім значенням амплітуди і величиною її розкиду. При постійному осьовому навантаженні, що діє на пару тертя, і постійній кількості зруйнованих елементів композиційного матеріалу в площадці контактної взаємодії зменшення часу зміни площадок (зростання швидкості обер-

тання пари тертя) призводить до зростання середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ та збільшення величини її розкиду. Якщо площа руйнування елементів охоплює частину площадки контактної взаємодії, то при зміні її місця положення, що приводить до варіації інтервалу часу початку руйнування елементів, зі зменшенням значення даного інтервалу (зменшенням часу зміни площадок контактної взаємодії) відбувається зростання середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ і збільшення величини її розкиду. Формований сигнал АЕ має порізану форму. Розглянуто й третій випадок, коли місце положення площі руйнування постійне (інтервал часу зміни площадок контактної взаємодії є постійною величиною), а зростає кількість зруйнованих елементів. У цьому випадку відбувається зростання середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ і зменшення величини її розкиду. Сигнал АЕ також має порізану форму. Отримані закономірності зміни параметрів результуючого сигналу АЕ та порізаність їх форми обумовлені формуванням відповідних умов перекриття імпульсних сигналів АЕ, які виникають при руйнуванні елементів композиційного матеріалу на кожній площадці контактної взаємодії. У той же час, інтерес представляє дослідження впливу осьового навантаження на закономірності зміни параметрів результуючого сигналу АЕ, який формується при руйнуванні поверхневих шарів композиційного матеріалу.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Benabdallah H. S.* Tribological behaviour and acoustic emissions of alumina, silicon nitride and SAE52100 under dry sliding / H. S. Benabdallah, R. J. Boness // *J. of Materials Science*. — 1999. — № 34. — P. 4995—5004.
2. *Mechefske C. K.* Using acoustic emission to monitor sliding wear / C. K. Mechefske, G. Sun, J. Sheasby // *Insight*. — 2002. — V. 44. — № 8. — P. 1—8.
3. *Skare T.* Wear and frictional behavior of high strength steel in stamping monitored by AE technique / T. Skare, F. Krantz // *Wear*. — 2003. — V. 255. — P. 1471—1479.
4. *Tan C. K.* Correlation between Acoustic Emission activity and asperity contact during meshing of spur gears under partial elastohydrodynamic lubrication / C. K. Tan, D. Mba // *Tribology Letter*. — 2005. — V. 20. — Issue 1. — P. 63—67.
5. *Gitis N.* CMP consumables characterization / N. Gitis, M. Vinogradov, S. Kuiry // *Proceedings of the Ninth international conference "Chemical-mechanical planarization for ulsi multilevel interconnection"* (February 23—25, Fremont, CA, 2005). — P. 82—86.
6. *Hase A.* Acoustic emission in elementary processes of friction and wear: In-situ observation of friction surface and AE signals / A. Hase, M. Wada,

H. Mishina // *J. of advanced mechanical desing, items and manufacturing*, 2009. — V. 3. — № 4. — P. 333—344.

7. *Cao D.* Investigation of acoustic emission and surface treatment to improve tool materials and metal forming process / *D. Cao* // *Dissertation the Degree Doctor of Philosophy in Materials Engineering. University of Dayton, Ohio.* — 2010. — 116 p.

8. *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. — V. 12. — № 3. — P. 87—94.

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

10. *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.

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

12. *Coleman B. D.* Time dependence of mechanical breakdown phenomena / *B. D. Coleman* // *J. Ap. Phys.* — 1956. — № 27. — P. 862—866.

13. *Coleman B. D.* Statistics and time dependence of mechanical break-down in fibers/ *B.D. Coleman* // *J. Ap. Phys.* — 1958. — № 29. — P. 968—983.

14. *Turcotte D. L.* Micro and macroscopic models of rock fracture / *D. L. Turcotte, W. I. Newman, R. Shcherbakov* // *Geophes. J. Intern.* — 2003. — V. 152. — № 3. — P. 718—728.

15. *Shcherbakov R.* On modeling of geophysical problems: A dissertation for degree of doctor of

philosophy/*R. Shcherbakov.* — Cornell university. — 2002. — 196 p.

16. *Raischel F.* Simple beam model for the shear failure of interfaces / *F. Raischel, F. Kun, H. J. Herrmann* // *Phys. Rev. E.* — 2005. — Vol. 72. — № 4. — P. 11.

17. *Raischel F.* Local load sharing fiber bundles with a lower cutoff of strength disorder / *F. Raischel, F. Kun, H. J. Herrmann* // *Phys. Rev. E.* — 2006. — Vol. 74(2). — № 3. — P. 4.

18. *Філоненко С. Ф.* Модель формирования сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционных материалов / *С. Ф. Філоненко, В. М. Калита, Т. В. Нимченко* // *Технологические системы.* — 2009. — № 2(46). — С. 17—25.

19. *Філоненко С. Ф.* Моделирование акустической эмиссии при разрушении композиционных материалов растяжением / *С. Ф. Філоненко, Т. В. Нимченко, Т. Н. Косицкая* // *Вісник інженерної академії України.* — 2010. — № 1. — С. 128—133.

20. *Filonenko S. F.* Model of acoustic emission signal at the prevailing mechanism of composite material mechanical destruction / *S. F. Filonenko, T. V. Nimchenko, A. P. Kosmach* // *Aviation.* — 2010. — V. 14. — № 4. — P. 95—103.

21. *Філоненко С. Ф.* Акустична емісія при навантаженні композиційних матеріалів / *С. Ф. Філоненко, В. М. Каліта, О. П. Космач* // *Вісник НАУ.* — 2010. — № 1. — С. 133—142.

22. *Філоненко С. Ф.* Модель сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала под действием поперечной силы / *С. Ф. Філоненко, В. М. Каліта, А. П. Космач, Т. Н. Косицкая* // *Технологические системы.* — 2010. — № 2 (51). — С. 45—53.

23. *Філоненко С. Ф.* Моделирование сигналов акустической эмиссии при руйнуванні композиційних матеріалів під дією поперечної сили / *С. Ф. Філоненко, О. П. Космач, Т. М. Косицька* // *Вісник НАУ.* — 2010. — № 2. — С. 85—93.

Стаття надійшла до редакції 23.12.2010.