

УДК 620.179:534.6

О.П. Космач, канд. техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МОДЕЛЬНИХ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПІД ЧАС ЗМІНИ НАВАНТАЖЕННЯ ПАРИ ТЕРТЯ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

А.П. Космач, канд. техн. наук

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ ПАРЫ ТРЕНИЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Oleksandr Kosmach, PhD in Technical Sciences

Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

SPECTRAL ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION MODEL SIGNALS UNDER LOAD CHANGES OF FRICTION UNITS FROM COMPOSITE MATERIALS

Проведено моделювання результуючих сигналів акустичної емісії під час зміни величини контактної навантаження поверхонь фрикційного контакту із композиційних матеріалів з їх подальшим спектральним аналізом. Показано, що у разі збільшення навантаження на пару тертя із композиційних матеріалів відбувається зміна амплітуди та частоти спектральної складової результуючих сигналів акустичної емісії. Визначено, що контактне навантаження по-різному впливає на зміну амплітуди та частоти спектральної складової результуючих сигналів акустичної емісії. Встановлено, що зростання навантаження приводить до нелінійного зростання амплітуди спектральної складової результуючого сигналу акустичної емісії з одночасним лінійним падінням його відповідного частотного значення. З'ясовано, що під час зміни величини контактної навантаження поверхонь фрикційного контакту із композиційних матеріалів приріст амплітудного значення спектральної складової перевищує відповідне значення частотної складової сигналу акустичної емісії.

Ключові слова: акустична емісія, амплітуда, аналіз, композиційний матеріал, навантаження, перетворення.

Проведено моделирование результирующих сигналов акустической эмиссии при изменении величины контактной нагрузки на поверхности фрикционного контакта из композиционных материалов с их последующим спектральным анализом. Показано, что при увеличении нагрузки на пару трения из композиционных материалов происходит изменение амплитуды и частоты спектральной составляющей результирующих сигналов акустической эмиссии. Определено, что приложенная нагрузка по-разному влияет на изменение амплитуды и частоты спектральной составляющей результирующих сигналов акустической эмиссии. Установлено, что возрастание нагрузки приводит к нелинейному росту амплитуды спектральной составляющей результирующего сигнала акустической эмиссии с одновременным линейным падением ее частотного значения. Выяснено, что при изменении величины нагрузки поверхностей фрикционного контакта из композиционных материалов прирост амплитудного значения спектральной составляющей превышает значение частотной составляющей сигнала акустической эмиссии.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, амплитуда, анализ, композиционный материал, нагрузка, преобразование.

The simulation of resultant acoustic emission signals at change of contact load of frictional contact with composite materials and their subsequent spectral analysis were conducted. Was shown what increasing of load on the friction pair with composite materials occurs changes of amplitude and frequency of spectral component of resultant acoustic emission signals. Was determined that contact load differently affects on amplitude and frequency of the spectral component of resultant acoustic emission signals. Was determined that the increase in load leads to nonlinear increase in amplitude of spectral component of resultant acoustic emission signals with simultaneous linear fall of their frequency values. Was determined that at change of contact load of frictional contact surfaces of the composite materials occurs increase of amplitude spectral component which exceeds corresponding values of frequency spectral component of acoustic emission signals.

Key words: *acoustic emission, amplitude, analysis, composite material, tension, transformation.*

Постановка проблеми. За останні десятиріччя одним із перспективних напрямків підвищення довговічності рухомих з'єднань є утворення зносостійких покриттів на основному матеріалі робочих поверхонь елементів вузла. Широке використання в цьому напрямку знайшли композиційні матеріали (КМ) завдяки варіації своїх фізико-механічних властивостей, а також технології їх виготовлення та нанесення на основний матеріал. До найбільш розповсюджених груп таких матеріалів відносять мінералокерамічні, металокерамічні та полімерні матеріали. Слід зазначити, що для кожної групи КМ характерні деякі відмінності у застосуванні. Так, наприклад, мінералокерамічні матеріали частіше використовуються в рухомих високонавантажених з'єднаннях в умовах агресивного середовища. У свою чергу, полімерні КМ знайшли своє широке використання в медицині.

Питанню використання КМ як робочих поверхонь вузла тертя приділяється підвищена увага в науково-технічній літературі. При цьому основні дослідження спрямовані на оптимізацію вибору контактуючих типів КМ, оптимізацію режимів роботи самого вузла тертя, дослідження мікроструктурних змін поверхневих шарів КМ, виявлення та ідентифікація дефектів поверхневих шарів та ін. Водночас з цим є проблема контролю та діагностики стану таких вузлів тертя, що обумовлено як специфікою будови, так і особливостями зношування та руйнування поверхневих шарів КМ. Експериментальні дослідження показують, що використання традиційних лабораторних методів, в основі яких лежить аналіз традиційних механічних показників, дозволяє достовірно аналізувати лише повільні макропроцеси зношування та руйнування поверхневих шарів КМ. Проте з погляду контролю та діагностики поверхневих шарів вузлів тертя важливим завданням є фіксація мікропроцесів, які розвиваються на поверхнях фрикційного контакту і є початковими етапами зародження необоротного руйнування поверхневих шарів КМ. Слід зазначити, що такий аналіз процесів тертя та зношування першочергово повинен ґрунтуватися на методах, які дозволяють отримати великі об'єми інформації про процеси контактної взаємодії поверхонь фрикційного контакту.

Останніми роками під час дослідження процесів тертя та зношування поверхневих шарів фрикційного контакту з традиційних матеріалів та КМ використовуються методи неруйнівного контролю, які мають високу чутливість до мікропроцесів, що постійно змінюються та розвиваються. До таких методів можна віднести вихрострумний метод, вібраційний метод, а також метод акустичної емісії (АЕ). Слід зазначити, що до основних переваг методу АЕ можна віднести його високу чутливість до процесів зношування та руйнування матеріалів, які відбуваються на мікрорівні; відсутність впливу власних вібрацій елементів вузла тертя на формований сигнал; інформування в режимі реального часу; інтегральність; велика проникаюча здатність; можливість автоматизації. Результати багатьох експериментальних досліджень показують, що формовані сигнали АЕ є відображенням кінетики процесів, які розвиваються на субмікро-, мікро- та макрорівнях. Така особливість може бути використана під час розроблення методів контролю та діагностики робочих поверхонь вузлів тертя, включаючи і вузли тертя з КМ. Проте низька інерційність та висока чутливість методу АЕ потребує визначення залежностей між параметрами акустичного випромінювання та параметрами процесів, які утворюються або розвиваються. Вирішення цього завдання повинно ґрунтуватися, передусім, на результатах теоретичних досліджень, які пов'язані з моделюванням акусти-

чного випромінювання під час зміни зовнішніх чинників. Такі дослідження дозволяють інтерпретувати акустичне випромінювання, визначити закономірності основних параметрів акустичного випромінювання при дії різних факторів, зокрема зміні неоднорідності фізико-механічних властивостей, зміні схильності до крихкого або пластичного руйнування та ін. Подібні закономірності є основою під час розроблення та вдосконалення методів контролю та діагностики вузлів тертя із КМ. Як показують результати багатьох досліджень, експлуатаційні показники вузла тертя, зокрема, контактне навантаження є одним із факторів, який впливає на характер процесу тертя та зношування, а отже, як результат, і на формований сигнал АЕ та його параметри. При цьому рівень напружень, який виникає в поверхневих шарах КМ, безпосередньо пов'язаний з межею його міцності. Це дозволяє проводити дослідження поверхневого шару КМ до стадії його необоротного руйнування та зношування. Однією з ключових проблем при цьому також залишається забезпечення завадостійкості діагностичного обладнання АЕ.

З урахуванням викладеного і з метою подальшого розвитку методу АЕ в контролі та діагностиці вузлів тертя із КМ, а також для теоретичного обґрунтування процесів формування акустичного випромінювання перспективним напрямком теоретичного дослідження є спектральний аналіз модельних результуючих сигналів АЕ під час зміни величини контактної навантаження поверхонь фрикційного контакту вузла тертя із КМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метод АЕ широко використовується під час дослідження процесів тертя та зношування поверхонь, які виготовлені з матеріалів із кристалічною структурою та КМ [1–4]. Результати досліджень показують складний характер зміни параметрів реєстрованих сигналів АЕ на різних стадіях розвитку процесу тертя та зношування поверхонь фрикційного контакту. Така видозміна акустичного випромінювання свідчить про низьку інерційність цього методу та його високу чутливість до мікропроцесів, які розвиваються в поверхневих шарах традиційних матеріалів та КМ. Однак на сьогодні інтерпретація цих процесів є ключовою проблемою, яка суттєво обмежує широке використання методу АЕ в діагностуванні фрикційних вузлів з традиційних матеріалів та КМ. При цьому таке завдання є достатньо складним через великий обсяг теоретичних та експериментальних досліджень, а також особливості використовуваного обладнання. Ця проблема знаходить своє часткове вирішення завдяки розробленню стохастичних моделей сигналів АЕ, проте істотні результати, а також встановлення узагальнених та об'єктивно наявних зв'язків між фізичними процесами, які відбуваються під час тертя поверхонь, ці моделі не дозволяють отримати.

Теоретичне дослідження акустичного випромінювання, яке формується під час тертя поверхонь матеріалів з традиційною структурою, розглянуто в роботах [5; 6]. Для дослідження акустичного випромінювання були використані моделі сигналів АЕ, які формуються у разі руйнування вторинних структур I та II типів, що характеризують схильність поверхневого шару матеріалу до крихкого та пластичного руйнування. Також було проведено моделювання сигналів АЕ, які формуються в умовах дії різних факторів. При цьому було показано, що сформовані результуючі сигнали АЕ є неперервними сигналами, які мають постійний середній рівень на стадії нормального зношування поверхонь фрикційного контакту. Результати проведених теоретичних досліджень дозволили визначити основні закономірності зміни амплітудних параметрів сигналів АЕ під час зміни факторів, що впливають.

У працях [7–9] були розглянуті результати моделювання імпульсних сигналів АЕ, які формуються у разі руйнування зразка КМ під дією статичної поперечної сили. За таких умов навантаження КМ формований сигнал АЕ було представлено виразом виду

$$U(t) = U_0 v_0 [\sigma(t) - \sigma_0] \cdot e^{r[\sigma(t) - \sigma_0] - v_0 \int_0^t e^{r[\sigma(t) - \sigma_0]} dt} \quad (1)$$

де $U_0 = N_0 \epsilon \partial_s$ – максимально можливе зміщення при миттєвому руйнуванні всіх елементів КМ; N_0 – вихідна загальна кількість елементів КМ; ϵ – коефіцієнт пропорційності; ∂_s – параметр, чисельне значення якого визначається формою одиночного імпульсу збурення у разі руйнування одиночного елемента КМ; $\sigma(t) = \alpha t(1 - \alpha t)(1 - g\sqrt{\alpha t})$ – еквівалентне напруження, яке виникає під час навантаження КМ; α – швидкість прикладення навантаження елементів КМ; t – поточне значення часу; g – коефіцієнт, який характеризує залежить від геометричних розмірів елементів КМ; σ_0 – порогове (граничне) напруження, яке відповідає часу початку руйнування t_0 елементів КМ; r, v_0 – змінні, які залежать від фізико-механічних характеристик елементів КМ.

Розроблена модель сигналу АЕ (1) була використана як модель результуючого сигналу АЕ, який формується під час тертя поверхонь з КМ. При цьому результуючий сигнал АЕ [10] був представлений як сума імпульсних сигналів АЕ, які формуються на окремих площадках контактної взаємодії у вигляді виразу виду

$$U_p(t) = \sum_j U_j(t - t_j), \tag{2}$$

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

Вихідними даними під час моделювання сигналів АЕ згідно з (2) є наступне. Вузол тертя представляє собою сукупність двох поверхонь фрикційного контакту, одна з яких здійснює переміщення або обертання відносно іншої з постійною швидкістю (рис. 1, а). Площадка контактної взаємодії представляє собою певну малу та змінну в часі площадку S_T або площу, яка рівномірно заповнена виступами та впадинами в загальній площі S перекриття поверхонь із КМ (рис. 1, б). Слід зазначити, що незалежно від схеми випробування зразків тертя при рівномірно навантаженому з'єднанні по довжині контакту між поверхнями фрикційної взаємодії завжди будуть утворюватися площадки контактної взаємодії S_T , які будуть залежати лише від кількості елементів КМ.

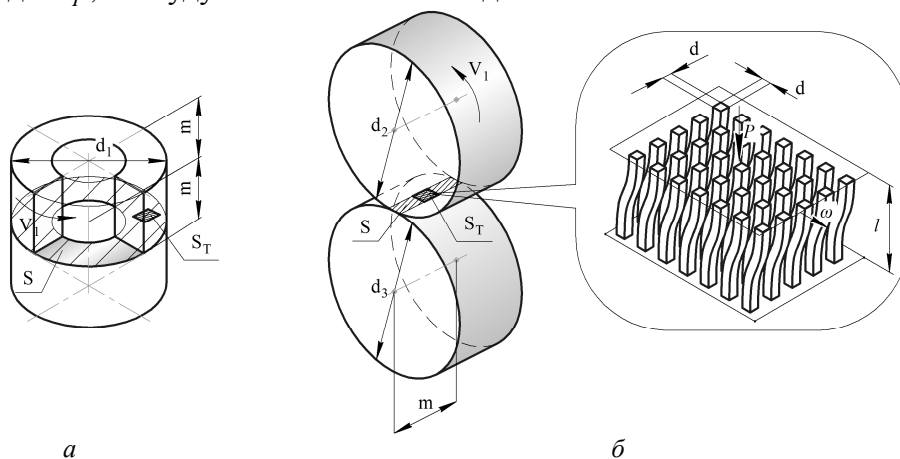


Рис. 1. Кінематичні схеми вузлів тертя у вигляді роликів із взаємодією по торцевим (а) та циліндричним поверхням (б): V_1 – швидкість обертання вузла тертя; S – загальна площа перекриття поверхонь фрикційного контакту; S_T – елементарна площадка контакту S_T у загальній площі перекриття поверхонь S пари тертя; m, d_1, d_2, d_3 – лінійні розміри зразків; d, l – лінійні розміри одиночного елемента композиційного матеріалу; P, ω – відповідно, осьове та поперечне навантаження, яке виникає при поперечному навантаженні елементів композиційних матеріалів

Під час зміни відносного розташування поверхонь фрикційного контакту в межах визначеної площадки контактної взаємодії S_T відбувається руйнування деякої визначеної кількості N_0 елементів КМ, які мають певні фізико-механічні характеристики та розміри, які відповідно визначаються параметрами моделі v_0 , r та g , що входять до виразу (1).

Зміна положення площадки контактної взаємодії в часі забезпечується відповідною швидкістю обертання вузла тертя, а величина контактної взаємодії поверхонь фрикційного контакту визначається відповідною швидкістю їх навантаження. Задана швидкість обертання та прикладене навантаження на вузол тертя, з урахуванням розмірів елементів, визначають закономірність зміни еквівалентних напружень та порогового напруження σ_0 в часі при початку руйнування елементів КМ. Слід зазначити, що в розробленій моделі не враховуються крайові ефекти, які можуть бути пов'язані з нерівномірністю навантаження поверхонь фрикційного контакту. При цьому значною мірою не враховується нерівномірність навантаження поверхонь, відхилення форми поверхонь, а також вплив мастильного шару на рівномірність взаємодії поверхонь фрикційного контакту.

Момент часу t_j появи окремого імпульсного сигналу АЕ можна представити у вигляді суми стаціонарної та випадкової складових процесу

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

де Δt_j – інтервал часу між початком появи наступного та попереднього імпульсного сигналу АЕ; δ – випадкова складова в момент часу появи кожного наступного сигналу АЕ.

Введення складової δ обумовлено варіацією властивостей елементів КМ, а також нестабільністю положення площадки S_T у загальній площі перекриття S (рис. 1).

Згідно з рівнянням (2), з урахуванням (3), можна провести моделювання результуючих сигналів АЕ, які формуються в умовах тертя поверхонь із КМ під час зміни величини навантаження поверхонь фрикційного контакту з подальшим їх спектральним аналізом.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. У сучасній науковій літературі найчастіше проводиться спектральний аналіз лише експериментальних даних, наприклад [11; 12], що викликано відсутністю фізичних моделей сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь. Наявні спектральні дослідження модельних сигналів АЕ проводилися лише для тестового гармонічного сигналу, який не пов'язаний із процесами тертя та зношування [13], а також для розробленої спрощеної стохастичної моделі сигналу АЕ [14].

Формулювання мети статті. У роботі проведено спектральний аналіз модельних результуючих сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь із КМ, з урахуванням зміни величини їх контактного навантаження. Показано, що для прийнятої швидкості обертання пари тертя зростання навантаження приводить до нелінійного зростання амплітуди спектральної складової результуючого сигналу АЕ з одночасним лінійним зменшенням її частотного значення. При цьому показано, що під час зміни величини контактного навантаження поверхонь фрикційного контакту із КМ значення приросту амплітудного значення спектральної складової перевищує відповідне значення частотної складової результуючого сигналу АЕ на стадії нормального зношування вузла тертя.

Виклад основного матеріалу. Результати багатьох експериментальних досліджень показують, що зміна величини прикладеного навантаження до поверхонь вузла тертя з КМ приводить до зміни еквівалентних напружень, а також взаємопов'язаних механіч-

них параметрів, таких як момент обертання, момент тертя та сила тертя. Для навантаженої поверхні фрикційного контакту з КМ це означає, що під час збільшення порогової та кінетичної сил, внаслідок зростання прикладеного навантаження, відбувається зростання локальної швидкості зміни еквівалентних напружень. На рис. 2 представлено фактори, які враховуються під час моделювання сигналів АЕ та які впливають на результуючий сигнал АЕ, а, отже, і на характер тертя та зношування поверхонь фрикційного контакту із КМ.

У представлений роботі проводився спектральний аналіз амплітуди результуючого сигналу АЕ при величині навантаження (швидкості навантаження) та варіації положення площадки контактної взаємодії за умови постійності дії всіх інших перерахованих факторів. При цьому спектральний аналіз результуючих сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь із КМ в умовах зміни величини контактного навантаження, полягав у наступному. Спочатку проводилося моделювання чотирьох результуючих сигналів АЕ на стадії нормального зношування поверхонь тертя при різних значеннях величини контактного навантаження. Об'єм вибірки для всіх досліджуваних сигналів АЕ був однаковим та становив 1000 значення. На наступному етапі проводилося оброблення отриманих результуючих сигналів АЕ, яка полягала у прямому дискретному перетворенні Фур'є згідно із загальноприйнятими методиками цифрового оброблення сигналів [15]. При цьому був прийнятий прямокутний тип вагового (згладжуючого) вікна, тобто розглядався спектр дискретного амплітудного сигналу без додаткового згладжування. Слід зазначити, що вибір типу вагового вікна є окремим завданням, яке полягає в більш точному перетворенні амплітудних та частотних спектральних складових результуючого сигналу АЕ. В подальшому проводився спектральний аналіз результуючих сигналів АЕ з побудовою залежностей (спектрограм), які показують зміну амплітуди та частоти спектральних складових дискретного сигналу АЕ під час зміни величини контактного навантаження поверхонь фрикційного контакту із КМ. Після цього проводилася апроксимація отриманих залежностей з подальшим аналізом та узагальненням результатів дослідження.

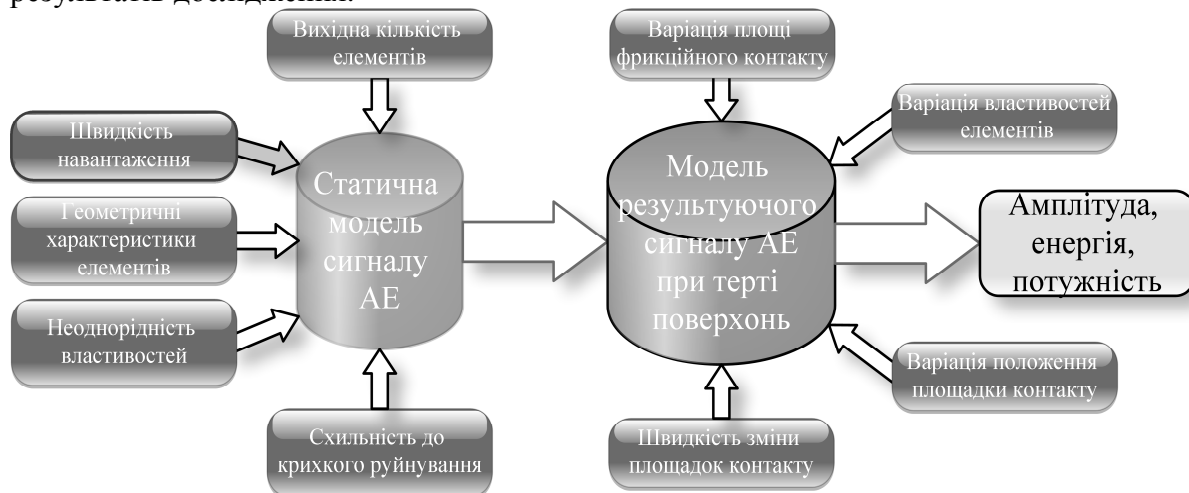


Рис. 2. Фактори, які впливають на результуючий сигнал акустичної емісії під час тертя поверхонь із композиційних матеріалів згідно з розробленими статичною та динамічною моделями сигналів акустичної емісії

Дослідження показують, що під час збільшення величин прикладеного навантаження [10] відбувається зменшення тривалості формованого імпульсного сигналу АЕ, а також зменшення величини випадкової складової його появи. Тому під час моделювання сигналів АЕ зі збільшенням значень контактного навантаження пари тертя пропорційно зменшувалися значення параметра δ для виразу (3).

З урахуванням прийнятих умов було проведено моделювання результуючих сигналів АЕ згідно з виразами (1–3) під час зміни величини прикладеного навантаження до пари тертя із КМ. Вважали, що для заданої початкової швидкості навантаження α величина прикладеного осьового навантаження змінювалася пропорційно, тобто $P = k \cdot \alpha$, а також, що зі зростанням навантаження P буде збільшувалася швидкість руйнування елементів КМ відносно її початкового значення α , тобто швидкість руйнування була такою: $\alpha_i = \alpha + \Delta\alpha_i$, де i – порядковий номер приросту навантаження. Під час моделювання всі параметри, які входили до виразів (1–3), були приведені до безрозмірних величин. Початкове мінімальне значення швидкості навантаження $\tilde{\alpha}$ прийняли рівним $\tilde{\alpha} = 200$, а значення прикладеного навантаження \tilde{P} дорівнювало $\tilde{P} = 200$ для $k = 1$. За цих умов час початку руйнування \tilde{t}_0 першої площадки контактної взаємодії у відносних одиницях при $\tilde{\sigma}_0 = 0,1019419$ згідно з [8] становив $\tilde{t}_0 = 0,0006$. Значення параметрів v_0 , g і r , які входили до виразу (1), приймали рівними: $\tilde{v}_0 = 10^6$; $\tilde{g} = 0,1$; $\tilde{r} = 10^4$. Моделювання проводилося у відносних одиницях для обмеження впливу чутливості вимірювального обладнання під час реєстрації сигналів АЕ. Слід зазначити, що контактне навантаження P не входило в явному вигляді до виразу (2). Його вплив визначався через зміну граничного напруження, величину якого розраховували у вигляді еквівалентного напруження, з урахуванням взаємозв'язку дотичного та нормального напружень. Для виконання розрахунків було визначено, що коефіцієнт тертя $f = 1$, а осьове навантаження зростало від 200 до 260 з кроком 20. При цьому час \tilde{t}_0 початку руйнування елементів КМ зі зростанням значень \tilde{P} залишався постійним. За отриманими значеннями $\tilde{\sigma}_0$ згідно з [8] за умови постійності \tilde{t}_0 визначали швидкість руйнування α_i .

Значення інтервалу часу $\Delta\tilde{t}_j$, який характеризує швидкість зміни площадок контактної взаємодії, а, отже, і швидкість обертання вузла тертя, для $\tilde{\alpha} = 200$ та $\tilde{P} = 200$ був прийнятий рівним $\Delta\tilde{t}_j = 1,1 \cdot 10^{-6}$ з урахуванням тривалості імпульсного сигналу АЕ, величина якої була визначена згідно з рівнянням (1). При цьому для прийнятого значення $\tilde{\alpha}$ величина δ змінювалася в межах $\tilde{\delta} = 0 \dots 5 \cdot 10^{-7}$ псевдовипадковим способом. При постійності значення порогового напруження $\tilde{\sigma}_0$ час початку руйнування елементів КМ для прийнятих значень $\tilde{\alpha}$ визначався згідно з рівнянням, яке описує зміну еквівалентного напруження в часі та входить в (1). Виходячи з проведених розрахунків, час початку руйнування елементів КМ для інших швидкостей $\tilde{\alpha}$ при заданому значенні $\tilde{\sigma}_0$ дорівнював: для $\tilde{\alpha} = 220$ – $\tilde{t}_0 = 0,000545$; для $\tilde{\alpha} = 240$ – $\tilde{t}_0 = 0,0005$; для $\tilde{\alpha} = 260$ – $\tilde{t}_0 = 0,00046154$. Під час моделювання вважали, що розміри та форма елементарної площадки контактної взаємодії S_T не змінюється в часі під час випробування зразків тертя із КМ. При цьому було прийнято, що поверхні фрикційного контакту повністю перекривалися між собою, тобто вважали, що $\tilde{S}_T = 1$. Слід зазначити, що розміри та форма елементарних площадок контактної взаємодії впливає на параметри формованого результуючого сигналу АЕ. При цьому зі зростанням величини навантаження поверхонь фрикційного контакту розміри елементарної площадки контактної взаємодії повинні змінюватися, починаючи з певного порогового значення. Проте в умовах динамічності процесу тертя математичний опис цих процесів є окремим та достатньо складним завданням. Тому під час моделювання вважалось, що у разі зростання величини навантаження поверхонь фрикційного контакту із КМ розміри та форма елементарної площадки контактної взаємодії не змінюються.

Результат моделювання сигналу АЕ для прийнятого мінімального значення контактної навантаженні $\tilde{P} = 200$ у вигляді графіка зміни амплітуди \tilde{U} у часі \tilde{t} у відносних одиницях згідно з рівнянням (2) показано на рис. 3.

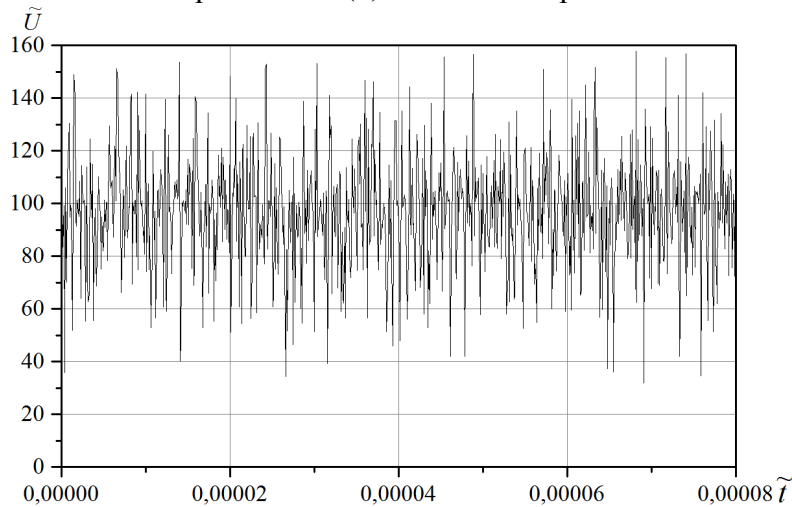


Рис. 3. Зміна амплітуди сигналу акустичної емісії у часі під час випробування дослідного вузла тертя із композиційних матеріалів на стадії його нормального зношування. Величина прикладеного навантаження $\tilde{P} = 200$, швидкість обертання вузла тертя обернено пропорційна величині $\Delta\tilde{t}_j = 1,1 \cdot 10^{-6}$

Результати перетворення формованих сигналів АЕ для прийнятих значень прикладеного навантаження у вигляді спектрограм у нормалізованих одиницях показано на рис. 4. Нормування значень досліджуваних спектральних характеристик сигналу АЕ проводилася згідно з виразами $\tilde{U} = \tilde{U}_i / \tilde{U}_{\max}$ та $\tilde{f} = \tilde{f}_i / \tilde{f}_{\max}$, де \tilde{U}_i, \tilde{f}_i – відповідно поточне значення амплітуди та частоти спектральних складових сигналу АЕ; \tilde{U}_{\max} – максимальне значення амплітуди нульової гармоніки формованого результуючого сигналу АЕ за результатами серії експериментів; \tilde{f}_{\max} – максимальне значення частоти спектра формованого результуючого сигналу АЕ за результатами програми випробування вузла.

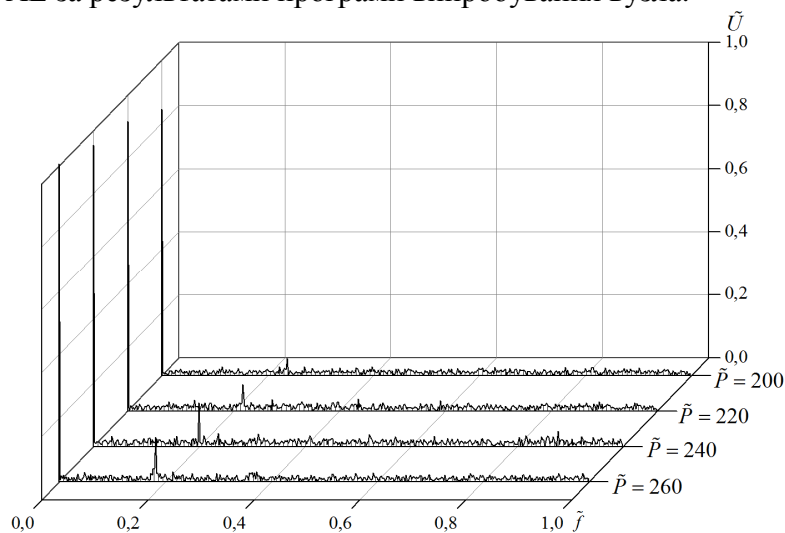


Рис. 4. Нормовані спектри результуючих сигналів акустичної емісії при різних значеннях величини прикладеного навантаження до поверхонь тертя із композиційних матеріалів на стадії їх нормального зношування

З отриманих результатів видно, що для прийнятої швидкості обертання пари тертя зростання навантаження приводить до зростання амплітуди спектральної складової результуючого сигналу АЕ (рис. 5, а).

У свою чергу, зростання величини навантаження поверхонь фрикційного контакту приводить до зменшення частотного значення спектральної складової результуючого сигналу АЕ, який формується на стадії нормального зношування поверхонь. Нормування значень досліджуваних спектральних складових проводилося аналогічно результатам, які представлені на рис. 4. З рис. 5, *a* видно, що зростання амплітуди спектральної складової результуючого сигналу АЕ під час зміни величини навантаження поверхонь відбувається нелінійно. Тоді зростання навантаження на поверхнях приводить до лінійного зменшення частоти спектральної складової результуючого сигналу АЕ. Слід також зазначити, що найбільший приріст значень у разі збільшення величини прикладеного навантаження спостерігається саме в амплітуді спектральної складової результуючого сигналу АЕ (рис. 5, *б*).

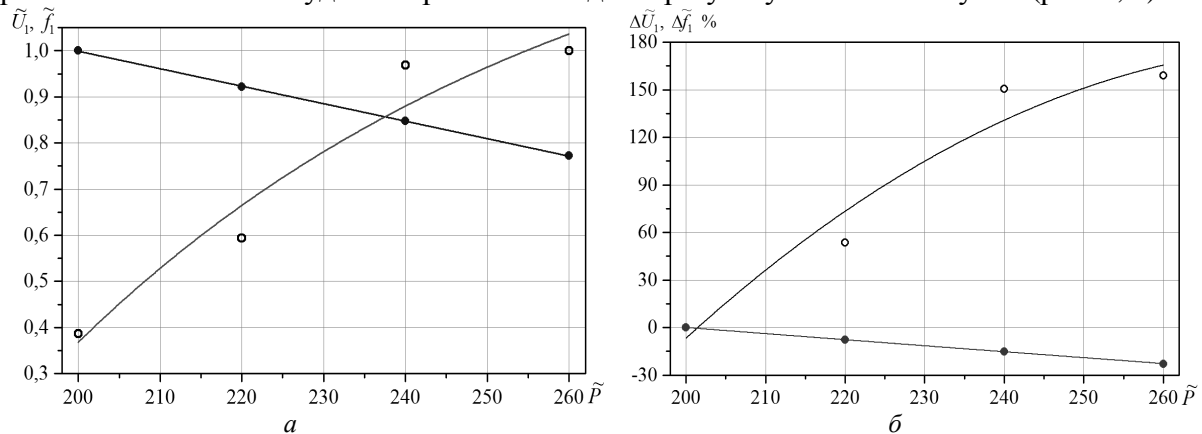


Рис. 5. Закономірності зміни амплітудної та частотної спектральних характеристик сигналу акустичної емісії під час зміни прикладеного навантаження поверхонь (*a*) та зміна їх відсоткового приросту (*б*): \circ – амплітудна характеристика спектра сигналу акустичної емісії (\tilde{U}_1);

\bullet – частотна характеристика спектра сигналу акустичної емісії (\tilde{f}_1)

Аналіз отриманих залежностей (рис. 5) з проведенням їх апроксимації показав, що закономірність амплітудної характеристики спектральної складової та контактного навантаження гарно описується нелінійною функцією (поліномом другого порядку). Коефіцієнт детермінації R^2 при цьому становив $R^2=0,95$. У свою чергу, закономірність частотної характеристики спектральної складової та контактного навантаження гарно описується лінійною функцією. При цьому коефіцієнт кореляції R при цьому становив $R=0,99$.

Висновки і пропозиції. Проведено моделювання результуючих сигналів АЕ під час зміни величини контактного навантаження поверхонь фрикційного контакту із КМ з їх подальшим спектральним аналізом. Отримані результати показали, що у разі збільшення навантаження на пару тертя із КМ відбувається зміна амплітудних та частотних характеристик спектральних складових результуючих сигналів АЕ. Слід зазначити, що контактне навантаження по-різному впливає на закономірності зміни амплітудних та частотних характеристик спектральних складових результуючих сигналів АЕ. Так під час зростання величини прикладеного навантаження до поверхонь фрикційного контакту із КМ відбувається нелінійне зростання амплітуди спектральної складової результуючого сигналу АЕ. У свою чергу, зростання величини навантаження поверхонь фрикційного контакту із КМ також приводить до зменшення частотного значення спектральної складової результуючого сигналу АЕ, який формується на стадії нормального зношування поверхонь. Аналіз отриманих результатів показав, що в області низьких навантажень приріст амплітуди спектральної складової більший у порівнянні з відповідними значеннями амплітуди в області з великими навантаженнями.

Найбільший приріст значень у разі збільшення величини прикладеного навантаження спостерігається в амплітуді спектральної складової результуючого сигналу АЕ. Під

час експериментальних досліджень з використанням спектрального аналізу сигналів АЕ під час збільшення величини контактної навантаження поверхонь фрикційного контакту із КМ найбільшого зростання та прирощення значень спектральних складових слід очікувати саме для амплітудних значень. При цьому спектральні складові знаходяться в низькочастотній області результуючого сигналу АЕ. Тому в реальному експерименті необхідно використовувати низькочастотні фільтри. Результати досліджень також показують, що в межах низьких контактних навантажень виникатиме складність у виявленні корисного сигналу з використанням спектрального аналізу сигналів АЕ.

Перспективним напрямком досліджень є спектральний аналіз сигналу АЕ, який формується на стадії нормального зношування поверхонь в умовах зміни швидкості обертання вузла тертя із КМ, а також при його переході зі стадії нормального зношування до стадії катастрофічного необоротного зношування та руйнування.

Список використаних джерел

1. *Liao C., Suo S., Wang Y., Huang W., Liu Y.* Study on stick-slip friction of reciprocating o-ring seals using acoustic emission techniques // *Tribology transactions.* – 2012. – Vol. 55. – № 1. – P. 43–51.
2. *Hong E., Kaplin, B., You T., Suh M., Kim Y.S., Choe H.* Tribological properties of copper alloy-based composites reinforced with tungsten carbide particles // *Wear.* – 2010. – Vol. 270. – P. 591–597.
3. *Rubtsov V. E.* The use of acoustic emission analysis for the wear in sliding friction / *V. E. Rubtsov, A. V. Kolubaev, V. L. Popov* // *Letters to ZHTF.* – 2013. – Vol. 4. – P. 79–86.
4. *Стадниченко В. Н.* Диагностика процессов изнашивания фрикционных узлов трансмиссий авиационных ГТД методом акустической эмиссии / *В. Н. Стадниченко* // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр.* – 2010. – №1 (61). – С. 108–117.
5. *Колубаев Е. А.* Анализ акустической эмиссии при трении скольжения высокомарганцовистой стали / *Е. А. Колубаев, А. В. Колубаев, О. В. Сизова* // *Письма в ЖТФ.* – 2010. – № 16. – С. 55–61.
6. *Filonenko S. F.* Modeling of acoustic emission signals at the amount of material that came in plastic deformation / *S. F. Filonenko, A. P. Stakhova, V. G. Kravchenko* // *Technological systems.* – 2008. – № 1 (41). – P. 22–27.
7. *Filonenko S.* Destruction of composite material by shear load and formation of acoustic radiation / *S. Filonenko, V. Kalita, A. Kosmach* // *Aviation.* – 2012. – Vol. 16. – № 1. – P. 5–13.
8. *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.
9. *Filonenko S. F.* Laws of change of time signal parameters of acoustic emission at destruction of composite material / *S. F. Filonenko, O. P. Kosmach* // *Proceedings of Chernihiv State Technological University.* – 2012. – № 2 (57). – P. 114–122.
10. *Filonenko S.* Impact of rotational speed of composite friction pair on energy accumulation in acoustic emission signal formation / *S. Filonenko, O. Kosmach* // *Aviation.* – 2013. – Vol. 17 (4). – P. 129–136.
11. *Деев А. А.* Акустические колебания в фрикционном контакте как способ контроля поверхностей трения на этапе приработки двигателей внутреннего сгорания / *А. А. Деев* // *Вестник Рязанского государственного университета им. С. А. Есенина.* – 2010. – № 29. – С. 1–16.
12. *Исследование* процессов разрушения поверхностей, деформируемых трением, методом акустической эмиссии / *Д. Л. Мерсон, В. И. Полунин, Б. А. Чудинов и др.* // *Трение и смазка в машинах и механизмах.* – 2007. – № 8. – С. 9–13.
13. *Овчарук В. Н.* Спектральный анализ сигналов акустической эмиссии / *В. Н. Овчарук* // *Ученые заметки ТОГУ.* – 2013. – № 4. – С. 974–986.
14. *Маленко П. И.* Исследование методом акустической эмиссии поверхностей трения в условиях смазывания / *П. И. Маленко* // *Конденсированные среды и межфазные границы.* – 2011. – № 2. – С. 164–171.
15. *Сергиенко А. Б.* Цифровая обработка сигналов / *А. Б. Сергиенко.* – СПб., 2006. – 751 с.