

УДК 620.179:534.6

С.Ф. Филоненко, д-р техн. наук

А.П. Космач, аспирант

Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ НА АКУСТИЧЕСКУЮ ЭМИССИЮ ПРИ ТРЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных при трении поверхностей образцов из композиционного материала. Показано, что с возрастанием осевой нагрузки на пару трения происходит возрастание среднего уровня результирующего сигнала акустической эмиссии, а также его дисперсии и стандартного отклонения. Определено, что такое возрастание анализируемых параметров сигнала акустической эмиссии происходит по нелинейному закону.

Постановка проблемы

Техническая диагностика трибосистем охватывает широкий круг вопросов, связанных как с теоретическими, так и с экспериментальными исследованиями. В основе проводимых исследований лежат методы, которые позволяют регистрировать и обрабатывать различную физическую информацию. Однако наибольший интерес представляют методы, обладающие высокой чувствительностью к процессам, протекающим в структуре материалов при действии различных факторов. Например, таких как механические нагрузки, температура, а также поля различной природы. Одним из таких методов является метод акустической эмиссии (АЭ).

Регистрируемое акустическое излучение, которое порождается внутренними процессами в материалах на субмикро-, микро- и макроуровнях, делает метод АЭ востребованным в диагностике технических систем. При этом, проблема интерпретации и идентификации АЭ информации, например, при трении, усложняется наличием ряда влияющих факторов – нагрузка на пару трения, скорость вращения, температура, состав смазки, физико-механические свойства используемых материалов. Кроме того, важное значение имеет и специфика строения материалов – материалы с традиционной структурой, композиционных материалы, материалы с покрытиями и другие. Поэтому теоретические и экспериментальные исследования АЭ при трении представляют значительный интерес. В первую очередь, это относится к сопоставлению теоретических и экспериментальных результатов. Такое сопоставление позволяет получать взаимосвязанные закономерности изменения акустического излучения в процессе трения при действии различных факторов, что является основой повышения достоверности разрабатываемых методов АЭ контроля и диагностики узлов трения.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время в узлах трения используется широкий спектр материалов, которые подбираются исходя из назначения и условий работы трибосистем. АЭ излучение, регистрируемое при исследовании трибосистем, обусловлено процессами, которые развиваются в зоне поверхностей контактного взаимодействия. Результаты теоретических исследований АЭ при трении поверхностных слоев материалов с традиционной структурой рассмотрены в работах ученых [1–3]. В основе построения модели результирующего сигнала АЭ, формируемого при трении поверхностей из таких материалов, положены модели импульсных сигналов АЭ, возникающих при разрушении вторичных структур I и II типа [4]. Математическое описание результирующего сигнала АЭ позволило провести его моделирование при действии различных факторов – скорости вращения поверхностей трения, внешней (осевой) приложенной нагрузки, объема материала, вступившего в пластическую деформацию. При этом были определены основные

закономерности изменения параметров результирующего сигнала АЭ на стадиях нормального и катастрофического изнашивания. Было также показано, что при увеличении величины осевой нагрузки, приложенной к паре трения, происходит возрастание среднего уровня результирующего сигнала АЭ и величины ее разброса. В тоже время, возрастание скорости вращения поверхностей фрикционного контакта приводит только к сжатию результирующего сигнала АЭ во времени без изменения среднего уровня амплитуды и величины ее разброса. При преобладающем механизме разрушения поверхностных слоев возрастание эксплуатационной нагрузки не влияет на характер изменения результирующего сигнала АЭ. Однако с увеличением скорости вращения происходит возрастание среднего уровня результирующего сигнала АЭ и уменьшение величины ее разброса.

Модель результирующего сигнала АЭ, формируемого при трении поверхностей из композиционных материалов, рассмотрена в работе Филоненко С.Ф. [5]. В основе построения модели результирующего сигнала АЭ использована модель импульсного сигнала, формируемого при разрушении композиционного материала под действием поперечной силы [6–8]. Для описания модели использована концепция разрушения FBM (fibre bundle model) [9–11] и кинетические закономерности разрушения [12; 13]. Выражение для результирующего сигнала АЭ, формируемого при разрушении поверхности композиционного материала, представлено в виде

$$U_p(t) = \sum_j U_j(t_j), \quad (1)$$

где j – порядковый номер j -ой разрушаемой площадки контактного взаимодействия; $U_j(t_j)$ – j -ый импульсный сигнал АЭ, формируемый на j -ой площадке контактного взаимодействия.

Согласно модели, результирующий сигнал АЭ при трении поверхностей композиционного материала представляет собой сумму импульсных сигналов, формируемых при разрушении элементарных площадок, состоящих из заданного количества элементов. При этом импульсный сигнал, описывается выражением вида [7]

$$U(t) = U_0 v_0 [\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})] \times \\ \times e^{r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})]} \times \\ \times e^{-v_0 \int_{t_0}^t r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})] dt} \quad (2)$$

где N_0 – исходное количество элементов на площадке контактного взаимодействия; v_0 , r – постоянные, зависящие от физико-механических характеристик композиционного материала; α – скорость нагружения материала; t , t_0 – соответственно, текущее время и время начала разрушения элементов; g – коэффициент, зависящий от геометрических размеров элементов; $U_0 = N_0 \beta \delta_s$ – максимально возможное смещение при мгновенном разрушении элементов на площадке контактного взаимодействия; β – коэффициент пропорциональности; δ_s – параметр, численное значение которого определяется формой одиночного импульса возмущения при разрушении одного элемента (имеет размерность времени).

Согласно модели результирующего сигнала АЭ, формируемого при износе поверхностей из композиционного материала, в работе Филоненко С.Ф. [5] проведено исследование закономерностей изменения его параметров при изменении скорости вращения пары трения. Показано, что при трении композиционного материала формируется непрерывный сигнал АЭ изрезанной формы с некоторым средним уровнем амплитуды и величин-

ной ее разброса. При постоянной эксплуатационной нагрузке и постоянной площади разрушения возрастание скорости вращения пары трения приводит к возрастанию среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ и величины ее разброса. Если площадь разрушения элементов композиционного материала охватывает часть площадки контактного взаимодействия, то при изменении ее места положения происходит возрастание среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, а также величины ее разброса. При уменьшении количества разрушаемых элементов происходит уменьшение среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ и уменьшение величины ее разброса. При этом сигнал АЭ также имеет изрезанную форму. Показано, что такие закономерности изменения параметров результирующего сигнала АЭ и изрезанность их формы обусловлены условиями перекрытия импульсных сигналов АЭ.

Экспериментальные исследования сигналов АЭ при трении поверхностей из композиционных материалов рассмотрены в работах ученых [14]. Результаты исследований показали, что регистрируемые результирующие сигналы АЭ имеют сильно изрезанную форму при различных скоростях вращения пары трения. При этом введение усреднения, ведущее к сглаживанию результирующего сигнала АЭ, приводит к потере вклада составляющих процессов, протекающих в поверхностных слоях материалов, в результирующий сигнал АЭ. Был определен интервал времени усреднения, при котором необходимо проводить обработку регистрируемой информации. Также показано, что с возрастанием скорости вращения пары трения происходит возрастание как среднего уровня результирующих сигналов АЭ (медианы в распределении), так и величин их дисперсии и стандартного отклонения.

В отличие от амплитудных параметров регистрируемых сигналов АЭ, значения которых изменяются по линейным законам [14], зависимости изменения медиан усредненной и суммарной энергий, их дисперсий и стандартного отклонения при одинаковых условиях испытаний описываются степенными функциями.

Задачи исследования

В работе будут рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований результирующих сигналов АЭ, формируемых при трении и износе поверхностей с покрытием из композиционного материала. Будет показано, что результирующие сигналы АЭ являются непрерывными сигналами изрезанной формы с некоторым средним уровнем амплитуды и определенной величиной ее разброса. Будет проведена статистическая обработка регистрируемых сигналов АЭ. Также будет показано, что при постоянной скорости вращения образцов увеличение осевой нагрузки на пару трения приводит к возрастанию среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, увеличению величины ее дисперсии и стандартного отклонения. При этом возрастание анализируемых параметров происходит по нелинейному закону.

Методика исследований

Для проведения теоретических исследований влияния внешней осевой нагрузки на сигналы АЭ, формируемые при трении поверхностей из композиционных материалов, проведем их моделирование, используя выражение (1). При этом значения параметров, входящих в выражение (1), будут приняты в соответствии с результатами моделирования, рассмотренными в работах Филоненко С.Ф., Космач А.П., Косицкой Т.Н. [7; 8].

Для экспериментальных исследований сигналов АЭ при трении были изготовлены образцы из алюминиевого сплава Д16 с твердосплавным покрытием ВК6 и стали 30ХГСА. Образцы представляли собой детали типа втулка. Поверхность контактного взаимодействия образцов охватывала все их торцевые площади (коэффициент перекрытия $K_p=1$). Выбор материалов изготовленных образцов был обусловлен их широким использованием в трансмиссиях автомобилей и тормозных системах.

Испытания образцов на износ осуществляли с использованием конструктивной схемы взаимодействия “диск-диск” (рис.1) на модернизированной испытательной машине СМТ-1, в соответствии с методикой, описанной вышеуказанными авторами [14].



Рис. 1. Схема взаимодействия образцов при испытании на износ

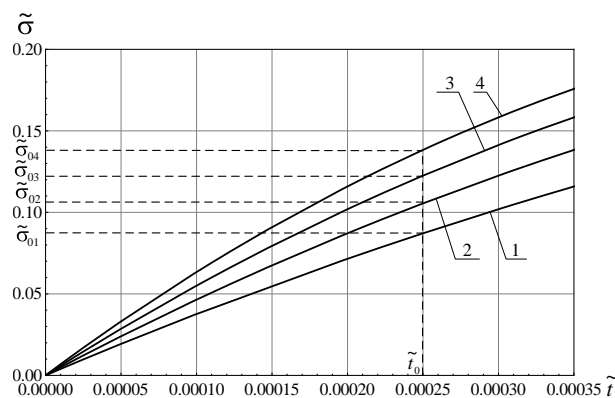
Осевая нагрузка P на пару трения изменялась в диапазоне величин от 300 Н до 750 Н с приращением по 150 Н. Один из образцов пары трения был подвижным, а другой образец вращался с заданной скоростью. При проведении экспериментов скорость вращения подвижного образца была постоянной и составляла $n=600 \text{ мин}^{-1}$. В качестве смазывающей среды использовалось масло типа М10Г2К [15], расход которого составлял 1,2 л/час.

В процессе испытаний образцов осуществлялась регистрация сигналов АЭ. Их обработка и анализ проводились с использованием специального программного математического

обеспечения. Обработка АЭ информации осуществлялась с усреднением. Выбор значения времени усреднения основывался на анализе ранее полученных экспериментальных данных [14]. Время усреднения составляло $t_u=15 \text{ мс}$.

Результаты исследований

Моделирование результирующего сигнала АЭ при возрастании осевой нагрузки на узел трения будем проводить при следующих условиях. Предположим, что имеется узел трения из композиционного материала, площадка контактного взаимодействия которого ограничена некоторой площадью S . Поверхность сопряжения такого узла состоит из выступов или элементов, количество которых равно N_0 . Элементы (наполнитель композиционного



Значения α : 1 - $\alpha=400$; 2 - $\alpha=500$; 3 - $\alpha=600$; 4 - $\alpha=700$. Значения $\tilde{\sigma}_0$: 1 - $\tilde{\sigma}_{01}=0,087154$; 2 - $\tilde{\sigma}_{02}=0,105508$; 3 - $\tilde{\sigma}_{03}=0,122562$; 4 - $\tilde{\sigma}_{04}=0,138335$. $\nu_0=100000$, $r=10000$, $g=0,1$. Время начала разрушения $\tilde{t}_0=0,00025$

Рис. 2. Зависимости изменения напряжений в относительных единицах во времени при деформировании композиционного материала поперечной силой

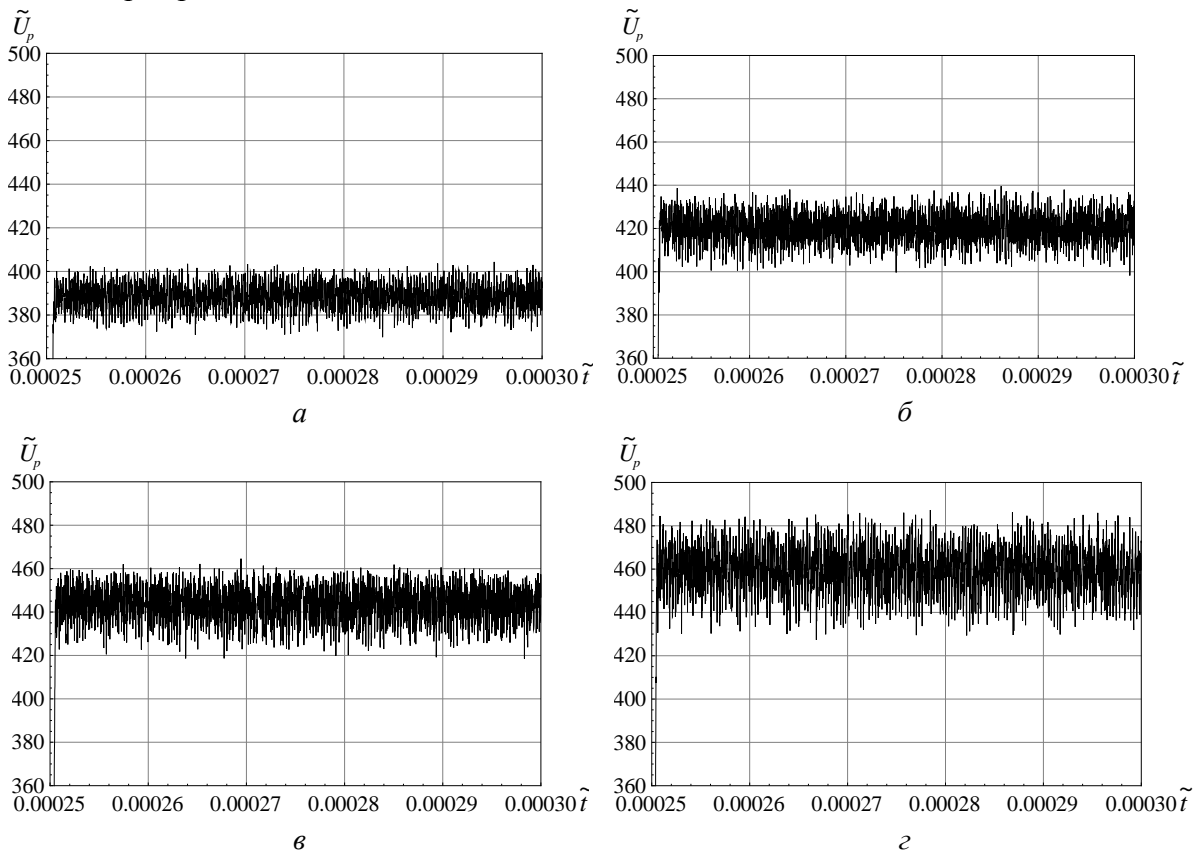
материала) имеют одинаковые размеры, физико-механические характеристики и равномерно распределены по площади контактного взаимодействия. Их разрушение, согласно модели FBM (fiber bundle model), происходит при достижении некоторого порогового напряжения разрушения σ_0 [7].

Будем считать, что к поверхностям контактного взаимодействия последовательно прикладывается возрастающая осевая нагрузка. Согласно существующим представлениям [16], возрастание осевой нагрузки, приложенной к узлу трения, приводит к возрастанию поперечной силы, необходимой для перемещения поверхности контактного взаимодействия и, как следствие, к возрастанию порогового напряжения разрушения элементов σ_0 в площадках контакта. Их значения соответственно равны σ_{01} ,

σ_{02} , σ_{03} , σ_{04} (рис.2). Будем считать, что время начала разрушения элементов для всех возрастающих значений осевой нагрузки при постоянной скорости вращения узла тре-

ния остается неизменяемым и равным t_0 . Тогда при постоянстве времени начала разрушения t_0 достижение возрастающего уровня порогового напряжения разрушения σ_0 будет происходить за счет начальной скорости изменения напряжения. При постоянной скорости вращения узла трения это обеспечивается за счет увеличения мощности, передаваемой узлу трения. Согласно сказанному, на рис.2 показаны графики изменения напряжений на элементах композиционного материала во времени в относительных единицах для скоростей α изменения напряжений, которые находились в диапазоне величин от 400 до 700. При построении графиков α приведены к безразмерным величинам, а время нормировано на время ввода нагрузки. Величины α и t_0 для рис. 2 составляли: 1 - $\alpha=400$, $\tilde{\sigma}_{01}=0,087154$; 2 - $\alpha=500$, $\tilde{\sigma}_{02}=0,105508$; 3 - $\alpha=600$, $\tilde{\sigma}_{03}=0,122562$; 4- $\alpha=700$, $\tilde{\sigma}_{04}=0,138335$.

Результаты моделирования результирующего сигнала АЭ, согласно (1), показаны на рис. 3 в относительных единицах. При построении сигналов АЭ все параметры, которые входят в выражение (2), приведены к безразмерным величинам, а время представлено в нормированных единицах.



Значения α : а - 400; б - 500; в - 600; г - 700. Значения $\tilde{\sigma}_0$: а - 0,087154; б - 0,105508; в - 0,122562; г - 0,138335. $\nu_0=100000$, $r=10000$, $g=0,1$, $\Delta t_i=3 \cdot 10^{-7}$. Время начала разрушения $\tilde{t}_0=0,00025$. Вариация $\Delta \tilde{t}_i$ на величину δ в диапазоне значений от 0 до $2 \cdot 10^{-8}$

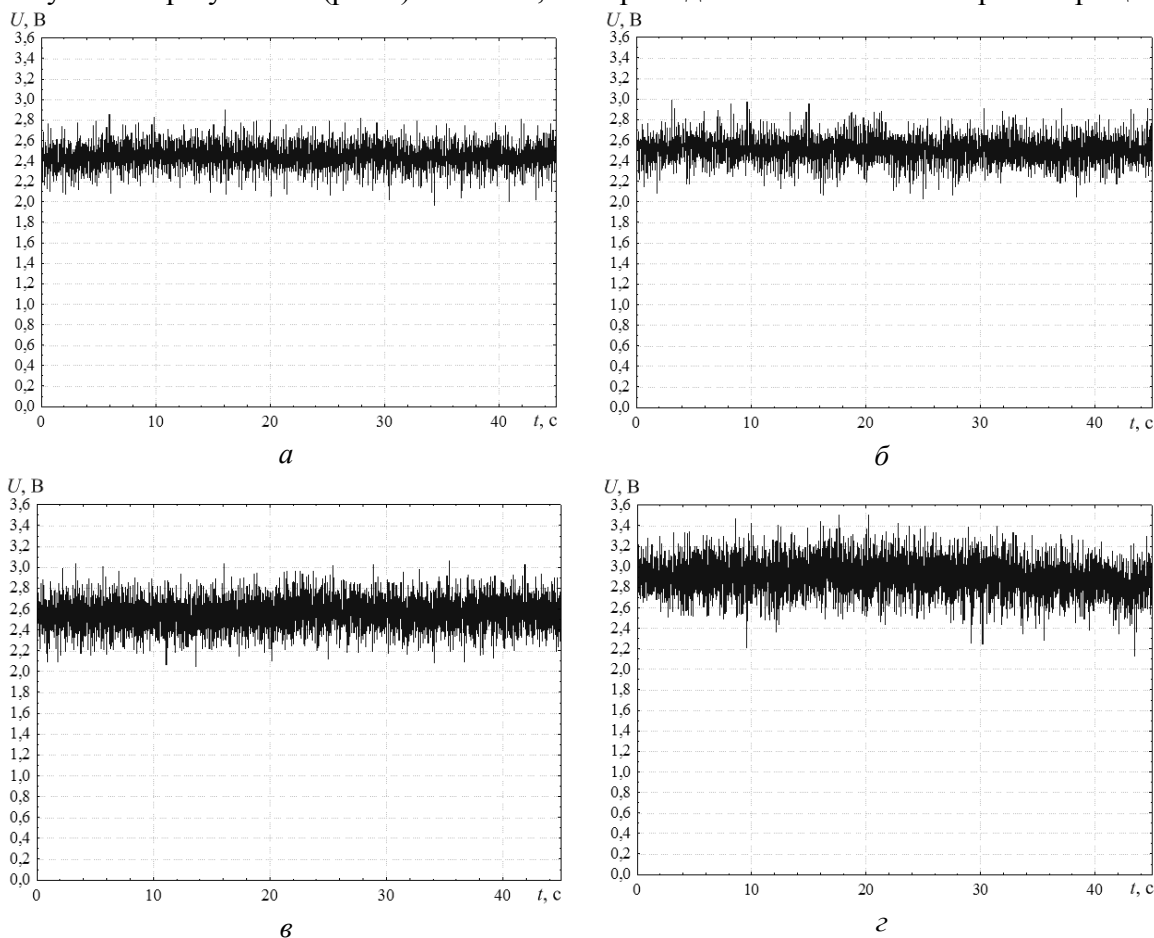
Рис. 3. Результирующие сигналы АЭ во времени, согласно (1), в относительных единицах при изменении локальной скорости достижения порогового напряжения разрушения

Моделирование сигналов АЭ (рис. 3) проводили при условии, что площадки контактного взаимодействия и, соответственно, количество разрушаемых элементов остаются постоянными величинами. При этом площадки могут располагаться произвольным образом в общей площади контакта S , что будет влиять на изменение времени появления последую-

щего сигнала АЭ. При моделировании параметры v_0 , r и g , которые входят в выражение (2), были приняты равными: $v_0=100000$; $r=10000$; $g=0,1$. Промежутки времени $\Delta\tilde{t}_i$ между сменами площадок были приняты равными $\Delta t_i=3\cdot 10^{-7}$. Время появления последующего сигнала АЭ задавалось в виде $\tilde{t}_{0j}=\tilde{t}_0+j\cdot\Delta\tilde{t}_i+\delta$. Значение δ изменялось в диапазоне величин от 0 до $2\cdot 10^{-8}$. При этом величина δ задавалась произвольным образом.

Результаты проведенных исследований (рис.3) показали, что для заданных условий моделирования результирующий сигнал АЭ представляет собой непрерывный сигнал изрезанной формы с некоторым средним уровнем амплитуды и величиной ее разброса. При увеличении значений α происходит возрастание среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ и величины ее разброса. Такие закономерности изменения параметров сигналов АЭ обусловлены тем, что при заданных условиях моделирования постепенное возрастание начальной скорости достижения пороговых напряжений разрушения элементов приводит к возрастанию амплитуд импульсных сигналов АЭ и их сжатию во времени. При этом изменяются условия перекрытия импульсных сигналов [5] что, в свою очередь, приводит к увеличению среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ и величины ее разброса.

Результаты экспериментальных исследований сигналов АЭ показаны на рис.4. При проведении экспериментов регистрация сигналов АЭ осуществлялась на стадии нормального изнашивания образцов (рис.1) после окончания этапа приработки пары трения. Полученные результаты (рис.4) показали, что при заданных значениях скорости вращения



Значения P : а – 300 Н; б – 450 Н; в – 600 Н; г – 750 Н. Время усреднения $t_u=15$ мс

Рис. 4. Результирующие сигналы акустической эмиссии во времени, зарегистрированные при испытаниях на износ исследуемой пары трения, при разных значениях осевой нагрузки P

и осевой нагрузки на пару трения регистрируемый результирующий сигнал АЭ представляет собой непрерывный сигнал изрезанной формы с некоторым средним уровнем амплитуды и величиной ее разброса. При этом с увеличением осевой нагрузки на пару трения на стадии нормального изнашивания наблюдается возрастание среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ и величины ее разброса.

Статистическая обработка данных показала, что для всех исследуемых осевых нагрузок при времени усреднения $t_u=15$ мс для вероятности 0,95 распределения усредненных амплитуд сигналов АЭ с заданными интервалами усреднения описываются нормальным законом. Длина выборки регистрируемых сигналов для проведения анализа была неизменной. Количество интервалов анализа на длине выборки составляло порядка 3000. По результатам анализа были определены значения медиан \bar{U}_{md} (среднего уровня амплитуды результирующих сигналов АЭ) в распределении, а также их дисперсий σ^2 и стандартного отклонения ε .

Результаты анализа показали, что при осевой нагрузке на пару трения 300 Н средний уровень амплитуды результирующего сигнала АЭ равен $\bar{U}_{md3}=2,44$ В, а дисперсия и стандартное отклонение, соответственно, равны: $\sigma^2 = 0,015144$ В² и $\varepsilon = 0,12306$ В. Увеличение осевой нагрузки на пару трения в 1,5 раза (до 450 Н) приводит к увеличению \bar{U}_{md} в 1,028 раза ($\bar{U}_{md4}=2,50832$ В). При этом дисперсия увеличивается в 1,12 раза, а стандартное отклонение в 1,058 раза. При увеличении осевой нагрузки на пару трения в 2 раза (до 600 Н) происходит возрастание \bar{U}_{md} в 1,048 раза ($\bar{U}_{md6}=2,55712$ В), а дисперсии и стандартного отклонения, соответственно, в 1,67 раза и 1,29 раза. Дальнейшее увеличение осевой нагрузки до 750 Н, т.е. в 2,5 раза, приводит к возрастанию \bar{U}_{md} в 1,198 раза ($\bar{U}_{md7}=2,92312$ В). При этом дисперсия и стандартное отклонение увеличиваются, соответственно, в 2,34 раза и 1,53 раза.

На рис. 5 приведены результаты обработки параметров результирующих сигналов

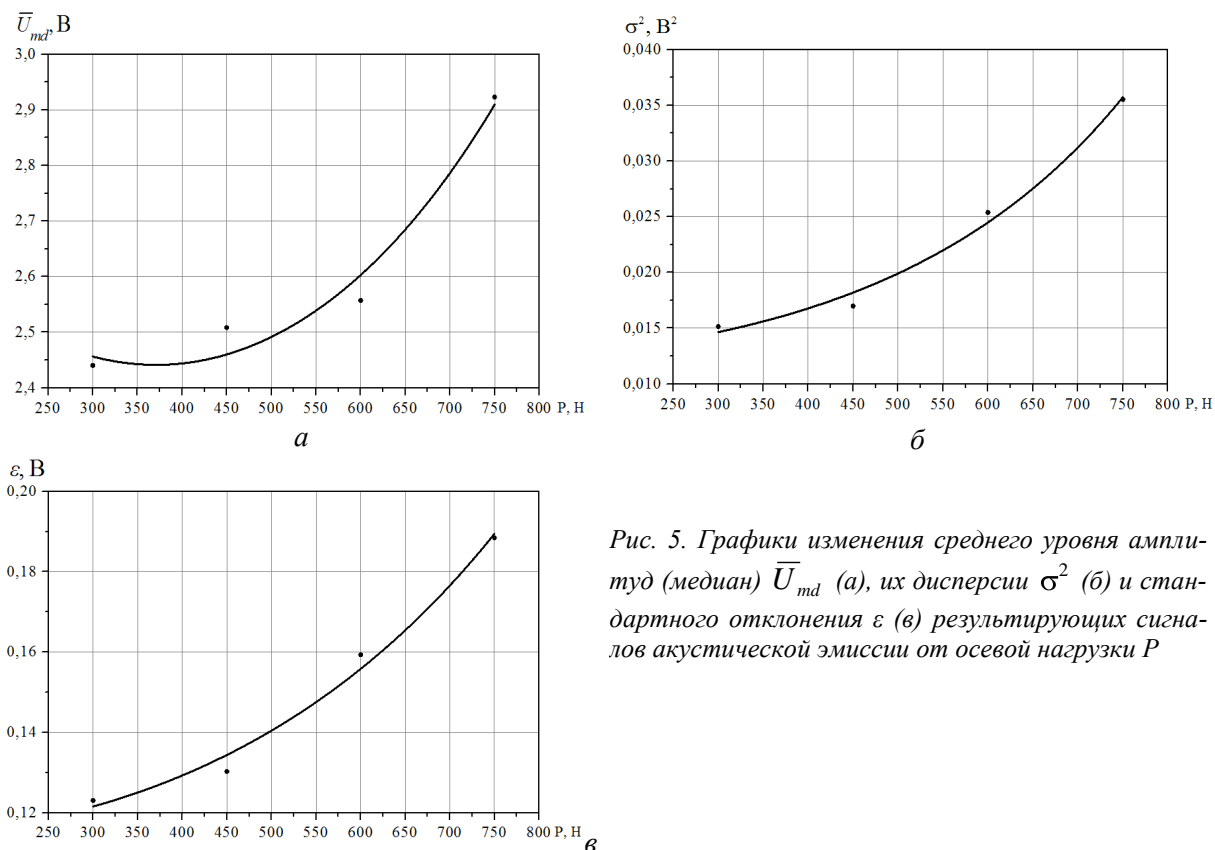


Рис. 5. Графики изменения среднего уровня амплитуд (медиан) \bar{U}_{md} (а), их дисперсии σ^2 (б) и стандартного отклонения ε (в) результирующих сигналов акустической эмиссии от осевой нагрузки Р

АЭ, показанных на рис. 4, в зависимости от осевой нагрузки на пару трения. Из рис. 5 видно, что с возрастанием осевой нагрузки на пару трения при заданных условиях испытаний происходит увеличение среднего уровня амплитуд результирующих сигналов АЭ, их дисперсии и стандартного отклонения.

Аппроксимация полученных данных (рис. 5) показала, что зависимости изменения среднего уровня амплитуд сигналов АЭ, их дисперсии и стандартного отклонения хорошо описываются степенной функцией вида

$$L = e^{aP^2 + bP + c}, \quad (3)$$

где L – анализируемый параметр; a , b и c – коэффициенты аппроксимирующего выражения; P – осевая нагрузка на пару трения.

Коэффициенты аппроксимирующего выражения (3) для исследуемых параметров АЭ равны: для изменения средних амплитуд – $a = 1,22033 \cdot 10^{-6}$, $b = -9,04937 \cdot 10^{-4}$, $c = 1,06025$; для изменения дисперсии средних амплитуд – $a = 1,78524 \cdot 10^{-6}$, $b = 1,07924 \cdot 10^{-4}$, $c = -4,41696$; для изменения стандартного отклонения средних амплитуд – $a = 1,05572 \cdot 10^{-6}$, $b = -1,22422 \cdot 10^{-4}$, $c = -2,16571$.

При этом вероятности p описания полученных закономерностей для изменения среднего уровня амплитуд, их дисперсии и стандартного отклонения, соответственно, составляют: $p = 0,89554$; $p = 0,97024$; $p = 0,96366$.

Выводы

Результаты моделирования результирующих сигналов АЭ показали, что при трении образцов из композиционных материалов формируется непрерывный сигнал АЭ с некоторым средним уровнем амплитуды и величиной ее разброса. Сигнал АЭ имеет изрезанную форму. Показано, что при постоянной скорости смены площадок контактного взаимодействия и постоянном количестве разрушаемых элементов композиционного материала в площадке контакта увеличение осевой нагрузки приводит к возрастанию среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ и величины ее разброса. Такие закономерности изменения параметров результирующего сигнала АЭ обусловлены изменением условий перекрытия импульсных сигналов, формируемых при разрушении площадок контактного взаимодействия.

Проведены исследования результирующих сигналов АЭ, регистрируемых при трении поверхностей сопряженных элементов с покрытием из композиционного материала ВК-6. Исследования проводились при различных значениях эксплуатационных нагрузок. Полученные результаты показали, что регистрируемые результирующие сигналы АЭ для всех эксплуатационных нагрузок имеют сильно изрезанную форму. Они представляют собой непрерывный сигнал с некоторым средним уровнем амплитуды и величины ее разброса.

Статистическая обработка данных показала, что при выбранном интервале анализа на заданной длине выборки распределения среднего уровня амплитуд регистрируемых сигналов АЭ описываются нормальным законом. Определено, что с возрастанием осевой нагрузки на пару трения происходит возрастание как среднего уровня амплитуд результирующих сигналов АЭ (медиан в распределении), так и величин их дисперсий и стандартного отклонения. Показано, что зависимости изменения среднего уровня амплитуд результирующих сигналов АЭ, их дисперсии и стандартные отклонения с высокой вероятностью описываются нелинейными возрастающими функциями. Рассматриваемые параметры могут использоваться в качестве информативных параметров при контроле процессов трения. В то же время, интерес представляют исследования энергетических параметров сигналов АЭ при изменении осевой нагрузки на пару трения.

Список использованных источников

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Бабак В.П. Моделі сигналів акустичної емісії при руйнуванні поверхневих шарів партертя / В.П. Бабак, С.Ф. Філоненко, В.М. Стадниченко, А.П. Стахова // *Проблеми тертя та зношування*. – 2007. – Вип.47. – С. 1-8.
5. Філоненко С.Ф. Модель сигналу акустичної емісії при терті поверхонь композиційних матеріалів /С.Ф. Філоненко, Т.М. Косицька, О.П. Космач // *Наукоємні технології*. – 2010. – № 6. – С.79-86.
6. 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.
7. 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. Косицька // *Технологические системы*. – 2010. – № 2 (51). – С.45-53.
8. 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.
9. Shcherbakov R. On modeling of geophysical problems: A dissertation for degree of doctor of philosophy / Robert Shcherbakov.– Cornell university, 2002.–209 p.
10. 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.
11. 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.
12. Маламедов И.М. Физические основы надежности / Маламедов И.М. – Л.: Энергия, 1970. – 152 с.
13. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.
14. Філоненко С.Ф. Обработка сигналов акустической эмиссии при трении поверхностей из композиционных материалов /С.Ф. Філоненко, А.П. Космач, Т.Н. Косицька // *Технологические системы*. – 2010. – № 2 (51). – С.45-53.
15. ГОСТ 8581-78. Масла моторные для автотракторных дизелей. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 6 с.
16. Маркеев А.П. Теоретическая механика /А. П. Маркеев. – М.: ЧеРо, 1999. – 572 с.