



УДК 620.179:534.6

Филоненко С.Ф., Космач А.П., Косицкая Т.Н.
Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ДИСПЕРСНОСТИ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены результаты моделирования акустической эмиссии при трении поверхностей из композиционного материала. Показано, что уменьшение дисперсности прочностных свойств композиционного материала приводит к возрастанию амплитудных и энергетических параметров результирующих сигналов акустической эмиссии. Определены аппроксимирующие выражения для зависимостей изменения амплитудных и энергетических параметров результирующих сигналов акустической эмиссии при уменьшении дисперсности прочностных свойств композиционного материала. Показано, что обработка акустического излучения с усреднением его параметров не приводит к изменению характера возрастания анализируемых зависимостей. Определено, что наиболее чувствительными параметрами к уменьшению дисперсности прочностных свойств композиционного материала являются дисперсии среднего уровня энергии и среднего уровня усредненной энергии результирующих сигналов акустической эмиссии.

Ключові слова: акустическая эмиссия, дисперсность, прочностные свойства, композиционный материал.

Постановка проблемы

Композиционные материалы (КМ) находят все более широкое применение в узлах трения, что связано с высокой стойкостью поверхностей фрикционного контакта к давлению, температуре, агрессивным средам и другим факторам. В тоже время, специфика строения КМ обуславливает специфику разрушения их поверхностных слоев при трении с формированием сложных продуктов износа. Данные процессы возникают на микроуровне, а фиксация их зарождения является чрезвычайно важной для разработки методов контроля и диагностики узлов трения из КМ.

Одним из методов, который обладает высокой чувствительностью к субмикро и микропроцессам разрушения материалов, включая и их поверхностных слоев, является метод акустической эмиссии (АЭ). Метод АЭ широко используется при исследовании процессов трения и износа материалов с традиционной структурой и КМ. Результаты проводимых исследований позволяют получать значительные объемы информации о развивающихся процессах. По сравнению с традиционными методами исследований (сила трения, момент трения, коэффициент трения и другие), АЭ показывает меньшую инерционность, т.е. в процессе трения и износа поверхностных слоев материалов наблюдаются значительные изменения в регистрируемом акустическом излучении. При этом изменения в АЭ тем

больше, чем ближе переход пары трения со стадии нормального к стадии катастрофического износа.

Такой характер регистрируемого акустического излучения требует проведения его интерпретации, что является сложной задачей. С данной точки зрения, значение имеют теоретические исследования. В первую очередь, это касается моделей и моделирования результирующих сигналов АЭ, возникающих при трении поверхностей фрикционного контакта, в том числе из КМ. Экспериментальные исследования процессов трения КМ показывают влияние на акустическое излучение как технологических факторов, так физико-механических характеристик КМ. В данном аспекте, разработка моделей формирования сигналов АЭ при трении КМ требует учета различных факторов. При этом моделирование акустического излучения должно быть направлено на определение закономерностей его изменения при изменении значений влияющих факторов. Одним из таких факторов является дисперсность свойств КМ (поверхностных слоев КМ) по прочности. Безусловно, что изменение или вариация прочностных свойств КМ будет влиять на развитие процессов трения и износа, и, как следствие, на характер и параметры акустического излучения. Такие исследования, позволяющие согласовать теоретические и экспериментальные результаты с возможностью их интерпретации, являются основой в разработке методов контроля и диагностики узлов трения из КМ.

Анализ последних исследований и публикаций

При исследовании процессов трения и износа поверхностей фрикционного контакта из КМ наряду с анализом традиционных характеристик (сила трения, момент трения, коэффициент трения) [1–3] используется анализ и акустического излучения или АЭ [4–6]. Результаты проведенных исследований показывают, что регистрируемые сигналы АЭ являются непрерывными сигналами. При проведении экспериментов практически рассматриваются зависимости изменения усредненной амплитуды сигналов АЭ (спектра амплитуд) при изменении состава и свойств КМ, а так же технологических режимов работы узла трения – осевой нагрузки, скорости вращения, смазывающей среды и других параметров. Полученные результаты показывают высокую чувствительность метода, по сравнению с традиционными методами, к процессам, которые протекают на всех стадиях работы узла трения (стадии приработки, стадии нормального износа и стадии катастрофического износа). Однако интерпретация полученных результатов и определение закономерностей изменения параметров АЭ при изменении влияющих факторов представляет значительные трудности. Это относится и к определению информативных параметров, которые могут характеризовать работу узла трения на определенных стадиях износа, и, в первую очередь, стадию приближения к критическому износу. В данном аспекте, значение имеют теоретические исследования, связанные с моделями и моделированием сигналов АЭ, формируемых при трении и износе поверхностных слоев материалов.

Модели результирующих сигналов АЭ при трении поверхностей материалов с традиционной структурой и КМ рассмотрены в работах [7–9]. В первом случае, модель результирующего сигнала АЭ при трении поверхностей фрикционного контакта построена на моделях импульсных сигналов, формируемых при разрушении вторичных структур I и II типа. Такая модель позволила провести моделирование результирующих сигналов АЭ с определением закономерностей изменения их параметров при изменении влияющих факторов – скорости вращения, действия осевой нагрузки, площади поверхностного разрушения, объема материала вступившего в пластическую деформацию, а так же преобладающего разрушения вторичных структур I и II типа [7, 8, 10, 11]. Во втором случае, модель результирующего сигнала АЭ при трении поверхностей КМ (для узлов трения скольжения с кинематической схемой в виде колец или роликов) построена на модели импульсного сигнала, формируемого при разрушении КМ заданного размера поперечной силой [12].

Согласно модели [9], результирующий сигнал АЭ при смене площадок контактного взаимодействия описывается выражением вида

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

где j – порядковый номер j -ой разрушаемой площадки контактного взаимодействия ($j = 1, 2, 3, \dots, m$); $U_j(t_j)$ – j -ый импульсный сигнал АЭ, формируемый на j -ой площадке контактного взаимодействия; t_j – момент времени появления j -ого сигнала АЭ; m – количество импульсных сигналов АЭ, формируемых за время T работы узла трения (на длине реализации T).

При этом импульсный сигнал АЭ $U(t)$, формируемый при разрушении площадки контактного взаимодействия заданного размера в момент времени t_j , описывается выражением вида

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

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

В выражение (2) входят параметры, которые влияют на параметры импульсного сигнала АЭ, и, безусловно, будут влиять на результирующий сигнал (1), формируемый при трении и износе поверхностей КМ. К таким параметрам относятся: параметры, зависящие от физико-механических характеристик КМ (v_0 , r); скорость нагружения пары трения (α); коэффициент, зависящий от геометрических размеров элементов КМ (g); пороговое напряжение разрушения (σ_0), которое соответствует моменту времени t_0 начала разрушения элементов КМ. Исходя из этого, можно провести моделирование результирующих сигналов АЭ, формируемых при трении поверхностей из КМ, с учетом влияния данных параметров, одним из которых является дисперсность прочностных свойств КМ, характеризуемая параметром r .

Задачи исследования

В работе будут рассмотрены результаты моделирования результирующих сигналов АЭ, формируемых при трении поверхностей из КМ, с изменением дисперсности их прочностных свойств. Будет проведен анализ амплитудно-энергетических характеристик результирующих сигналов АЭ при их обработке без усреднения и с усреднением. При этом будет показано, что с уменьшением дисперсности прочностных свойств КМ происходит увеличение среднего уровня амплитуды и среднего уровня энергии результирующих сигналов АЭ, а так же величин их разброса (стандартных отклонений и дисперсий). Будут получены зависимости изменения процентного прироста амплитудных и энергетических характеристик результирующих сигналов АЭ с уменьшением дисперсности свойств КМ, проведено их математическое описание и анализ. Будет показано, что наиболее чувствительным параметром к изменению дисперсности свойств КМ являются дисперсии среднего уровня амплитуды и среднего уровня энергии результирующих сигналов АЭ при их обработке с усреднением и без усреднения.

Результаты исследований

При трении и износе поверхностей из КМ результирующий сигнал АЭ представляется в виде суммы последовательно формируемых импульсных сигналов — выражение (1). При этом импульсные сигналы АЭ возникают в последовательные моменты времени t_j , что соответствует принятым исходным условиям модели. Считается, что поверхность фрикционного контакта (для пары трения в виде колец или роликов) ограничена некоторой элементарной площадкой, в пределах которой происходит разрушение заданного количества N_0 элементов КМ. Элементы КМ имеют определенные физико-механические характеристики. К поверхностям контактного взаимодействия приложена постоянная осевая нагрузка P , которая влияет на пороговое напряжение σ_0 начала разрушения элементов КМ. При разрушении элементов КМ в пределах элементарной площадки контактного взаимодействия формируется импульсный сигнал АЭ, согласно (2). Смена площадок контактного взаимодействия задается скоростью вращения узла трения. Другими словами, скорость вращения (нагружения) обеспечивает смену во времени положения площадки контактного взаимодействия. При этом разрушение площадок контактного взаимодействия происходит последовательным образом. При таких условиях, момент времени t_j появления импульсных сигналов АЭ представляется в виде

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

где j — номер импульсного сигнала АЭ ($j = 1, 2, 3, \dots, n$); Δt_j — интервал времени между началом появления последующего и предыдущего импульсного сигнала АЭ; δ — случайная составляющая в моменте времени появления каждого последующего сигнала АЭ.

В соответствии с принятой моделью, при постоянстве одних влияющих факторов можно провести исследование влияния других факторов на результирующие сигналы АЭ, формируемые при трении и износе поверхностей фрикционного контакта из КМ. Такие исследования проведем при изменении дисперсности прочностных свойств КМ.

Моделирование результирующих сигналов АЭ, согласно (1), будем выполнять при следующих условиях. Будем считать, что при вращении пары трения из КМ каждая последующая площадка контактного взаимодействия состоит из N_0 элементов. При этом пороговое напряжение σ_0 начала разрушения элементов является постоянной величиной. Его значение определим исходя из зависимости изменения эквивалентных напряжений для заданной скорости нагружения при некотором времени t_0 начала разрушения, согласно [12]. При проведении всех расчетов параметры, входящие в выражения (1), (2) и (3), будут приведены к безразмерным величинам, а моделирование будем проводить в относительных единицах.

Примем, что скорость нагружения $\tilde{\alpha}$ равна $\tilde{\alpha} = 200$. При этом время t_0 начала разрушения первой площадки контактного взаимодействия в относительных единицах равно $\tilde{t}_0 = 0,0006$. Для таких условий из расчета зависимости изменения эквивалентных напряжений, согласно [12], определим, что пороговое напряжение разрушения σ_0 в относительных единицах равно $\tilde{\sigma}_0 = 0,101941909$. Значения параметров v_0 и g , входящих в выражение (2), в относительных единицах примем равными: $\tilde{v}_0 = 1000000$; $\tilde{g} = 0,1$. Начальное значение параметра r в относительных единицах примем равным $\tilde{r} = 10000$. Его значение будем изменять в диапазоне величин от $\tilde{r} = 10000$ до $\tilde{r} = 26000$ с шагом приращения $\Delta\tilde{r} = 4000$. Увеличение значения \tilde{r} означает уменьшение дисперсности прочностных свойств КМ.

При моделировании результирующих сигналов АЭ временные промежутки $\Delta\tilde{t}_j$ в относительных единицах между появлением последующего и предыдущего сигналов АЭ будем задавать следующим образом. Для заданных значений $\tilde{v}_0, \tilde{g}, \tilde{\sigma}_0, \tilde{t}_0, \tilde{\alpha}$ и начального значения $\tilde{r} = 10000$ проведем расчеты импульсного сигнала АЭ, согласно методике, рассмотренной в [13], с определением его длительности. В соответствии с длительностью импульсного сигнала выберем величину $\Delta\tilde{t}_j$. Из результатов проведенного расчета для начального значения $\tilde{r} = 10000$ значение $\Delta\tilde{t}_j$ примем равным $\Delta\tilde{t}_j = 1,1 \times 10^{-6}$, а величину $\tilde{\delta}$ будем изменять в диапазоне величин от $\tilde{\delta} = 0$ до $\tilde{\delta} = 5,0 \times 10^{-7}$

случайным образом. При увеличении \tilde{r} , как показывают расчеты импульсных сигналов, происходит уменьшение их длительности. Исходя из этого, для всех других значений \tilde{r} , при которых проводится моделирование результирующих сигналов АЭ, величины $\Delta\tilde{t}_j$ и $\tilde{\delta}$ изменялись пропорционально изменению длительности формируемых импульсных сигналов.

Моделирование результирующих сигналов АЭ будем проводить в три этапа. При этом будем проводить обработку 5000 импульсных сигналов АЭ для каждого значения \tilde{r} . На первом этапе, согласно принятым условиям, будут проведены расчеты с построением зависимостей изменения амплитуды результирующего сигнала АЭ во времени. Исходя из полученных результатов, на втором этапе, будут проведены расчеты с построением зависимостей изменения энергии результирующих сигналов АЭ во времени. На третьем этапе, будет проведена статистическая обработка зависимостей изменения амплитуды и энергии результирующих сигналов АЭ с определе-

нием их средних уровней, стандартных отклонений и дисперсий. По полученным данным будет проведено построение зависимостей изменения процентных приращений анализируемых параметров по отношению к их начальному значению при $\tilde{r}=10000$. Далее проведем анализ полученных зависимостей с их математическим описанием и определением наиболее информативных параметров результирующих сигналов АЭ.

На рис. 1 показаны результаты моделирования первого и второго этапов исследований в виде зависимостей изменения амплитуды и энергии результирующих сигналов АЭ во времени в относительных единицах при двух значениях параметра \tilde{r} : $\tilde{r}=10000$ и $\tilde{r}=18000$.

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что с возрастанием значения \tilde{r} , т.е. с уменьшением дисперсности прочностных свойств КМ, происходит возрастание среднего уровня амплитуды \tilde{U} и среднего уровня энергии \tilde{E} результирующих сигналов АЭ (рис. 1).

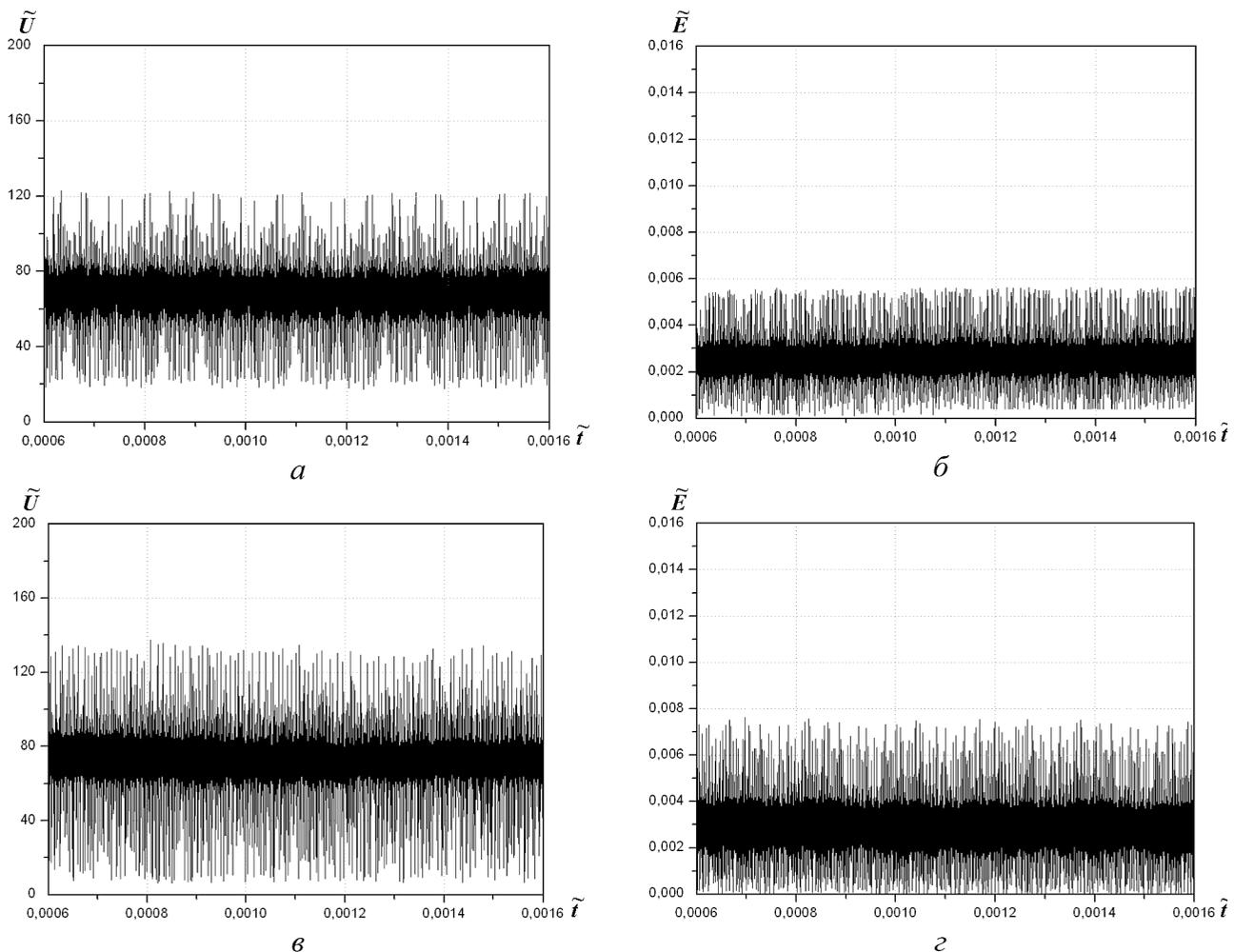


Рис. 1. Графики изменения амплитуды (*a, в*) и энергии (*б, г*) результирующих сигналов акустической эмиссии во времени, согласно (1), в относительных единицах при разных значениях \tilde{r} : *a, б* – $\tilde{r}=10000$; *в, г* – $\tilde{r}=18000$. Параметры моделирования, согласно (1): $\tilde{v}_0=1000000$; $\tilde{\alpha}=200$; $\tilde{g}=0,1$; $\tilde{\sigma}_0=0,101941909$. Время \tilde{t}_0 начала разрушения элементов КМ равно $\tilde{t}_0=0,0006$

Такое возрастание \bar{U} и \bar{E} сопровождается и возрастанием величин их разброса. Действительно, статистическая обработка данных показала, что при $\tilde{r}=10000$ значения среднего уровня амплитуды и среднего уровня энергии результирующего сигналов АЭ составляют: $\bar{U}=67,03$ и $\bar{E}=0,00247$. При этом стандартные отклонения ($s_{\bar{U}}, s_{\bar{E}}$) и дисперсии ($s_{\bar{U}}^2, s_{\bar{E}}^2$) для среднего уровня амплитуды и среднего уровня энергии равны: $s_{\bar{U}}=21,01$; $s_{\bar{E}}=0,00129$; $s_{\bar{U}}^2=441,0$; $s_{\bar{E}}^2=1,68 \cdot 10^{-6}$. Если \tilde{r} возрастает в 1,4 раза (с 10000 до 14000), то значения \bar{U} , \bar{E} , $s_{\bar{U}}$, $s_{\bar{E}}$, $s_{\bar{U}}^2$ и $s_{\bar{E}}^2$ увеличиваются, соответственно, в 1,04 раза, в 1,11 раза, в 1,17 раза, в 1,23 раза, в 1,38 раза и в 1,46 раза. При значении $\tilde{r}=18000$ значения \bar{U} , \bar{E} , $s_{\bar{U}}$, $s_{\bar{E}}$, $s_{\bar{U}}^2$ и $s_{\bar{E}}^2$ увеличиваются, соответственно, в 1,07 раза, в 1,21 раза, в 1,34 раза, в 1,43 раза, в 1,8 раза и в 2,04 раза. Такое постепенное возрастание параметров \bar{U} , \bar{E} , $s_{\bar{U}}$, $s_{\bar{E}}$, $s_{\bar{U}}^2$ и $s_{\bar{E}}^2$ наблюдается и при дальнейшем увеличении \tilde{r} . Если $\tilde{r}=26000$, т.е. увеличивается в 2,6 раза, то значения \bar{U} , \bar{E} , $s_{\bar{U}}$, $s_{\bar{E}}$, $s_{\bar{U}}^2$ и $s_{\bar{E}}^2$ увеличиваются, соответственно, в 1,15 раза, в 1,46 раза, в 1,72 раза, 2 раза, в 3 раза и в 4 раза.

Обработка полученных результатов в виде зависимостей изменения процентного прироста среднего уровня амплитуды, его стандартного отклонения и дисперсии, среднего уровня энергии, его стандартного отклонения и дисперсии результирующих сигналов АЭ при возрастании значения \tilde{r} , по отношению к их значениям при $\tilde{r}=10000$, приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что процентный прирост среднего уровня амплитуды и его стандартного отклонения, среднего уровня энергии и его стандартного отклонения практически происходит линейным

образом. Действительно, анализ полученных данных с аппроксимацией зависимостей изменения процентного прироста \bar{U} , \bar{E} , $s_{\bar{U}}$ и $s_{\bar{E}}$ при возрастании \tilde{r} показал, что они хорошо описываются выражением вида

$$\Delta \tilde{Z}_{AE} = A + B\tilde{r} \quad (4)$$

где $\Delta \tilde{Z}_{AE}$ — процентный прирост среднего уровня амплитуды \bar{U} результирующих сигналов АЭ и его стандартного отклонения $s_{\bar{U}}$, среднего уровня энергии \bar{E} и его стандартного отклонения; A и B — коэффициенты аппроксимирующего выражения.

При этом коэффициенты аппроксимирующего выражения (4) для анализируемых зависимостей \bar{U} , \bar{E} , $s_{\bar{U}}$ и $s_{\bar{E}}$ равны: для процентного прироста среднего уровня амплитуды — $A=-9,76$, $B=0,00097$; для процентного прироста стандартного отклонения среднего уровня амплитуды — $A=-45,2$, $B=0,0044$; для процентного прироста среднего уровня энергии — $A=-27,89$, $B=0,00277$; для процентного прироста стандартного отклонения среднего уровня энергии — $A=-63,64$, $B=0,00616$. Коэффициенты корреляции для процентного прироста среднего уровня амплитуды \bar{U} результирующих сигналов АЭ и его стандартного отклонения $s_{\bar{U}}$, среднего уровня энергии \bar{E} и его стандартного отклонения $s_{\bar{E}}$, соответственно, равны: $R=0,99914$; $R=0,99992$; $R=0,99949$; $R=0,99887$.

В тоже время, из рис. 2 видно, что зависимости изменения процентного прироста дисперсии $s_{\bar{U}}^2$ среднего уровня амплитуды результирующих сигналов АЭ и процентного прироста дисперсии $s_{\bar{E}}^2$ среднего уровня энергии имеют не линейный характер. Анализ полученных данных с аппроксимацией зависимостей изменения процентного прироста $s_{\bar{U}}^2$ и $s_{\bar{E}}^2$ при возрастании \tilde{r} показал, что они хорошо описываются выражением вида

$$\Delta \tilde{Z}_{AE} = a\tilde{r}^b, \quad (5)$$

где $\Delta \tilde{Z}_{AE}$ — процентный прирост дисперсии $s_{\bar{U}}^2$ среднего уровня амплитуды и дисперсии $s_{\bar{E}}^2$ среднего уровня энергии \bar{E} результирующих сигналов АЭ; a и b — коэффициенты аппроксимирующего выражения.

Коэффициенты аппроксимирующего выражения (5) для анализируемых зависимостей $s_{\bar{U}}^2$ и $s_{\bar{E}}^2$ равны: для процентного прироста дисперсии среднего уровня амплитуды — $a=3,2 \times 10^{-10}$, $b=2,45$; для процентного прироста дисперсии среднего уровня энергии $a=2,23 \times 10^{-11}$, $b=2,81$. При этом коэффициенты корреляции для процентного прироста дисперсии $s_{\bar{U}}^2$ среднего уровня амплитуды и дисперсии

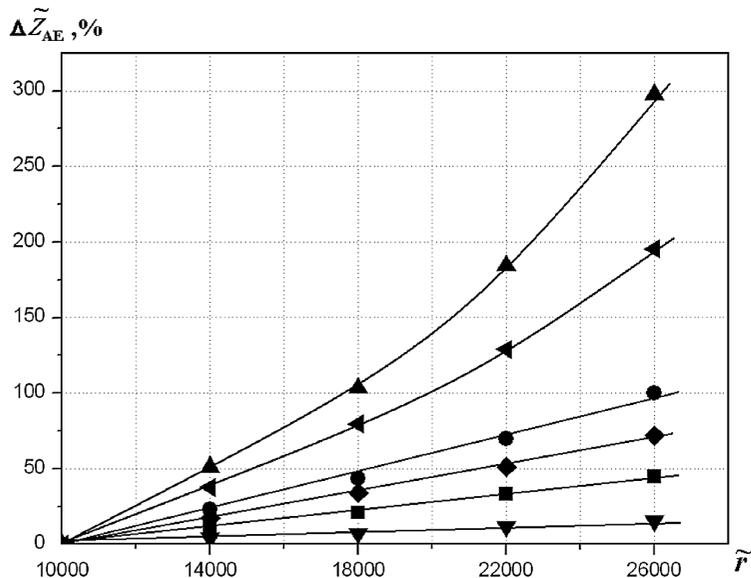


Рис. 2. Графики изменения процентного прироста среднего уровня амплитуды \bar{U} (\blacktriangledown), его стандартного отклонения $s_{\bar{U}}$ (\blacklozenge) и дисперсии $s_{\bar{U}}^2$ (\blacktriangleleft), среднего уровня энергии \bar{E} (\blacksquare), его стандартного отклонения $s_{\bar{E}}$ (\bullet) и дисперсии $s_{\bar{E}}^2$ (\blacktriangle) в зависимости от \tilde{r} по отношению к начальным их значениям при $\tilde{r}=10000$

$s_{\bar{E}}^2$ среднего уровня энергии результирующих сигналов АЭ, соответственно, равны: $R=0,98956$; $R=0,99587$.

На практике при исследовании АЭ, возникающей в процессе трения и износа поверхностей различных материалов, используется обработка усредненной амплитуды результирующих сигналов. Это обусловлено значительными объемами регистрируемой АЭ информации, хранение которой в исходном виде практически не представляется возможным, а так же стремлением к выводу зависимостей изменения параметров результирующих сигналов АЭ в реальном масштабе времени, что требует согласования скорости поступления информации и скорости ее вывода на устройства отображения.

В связи с этим, проведем исследования закономерностей изменения усредненной амплитуды результирующих сигналов АЭ и усредненной их энергии при изменении \bar{r} . При моделировании результирующих сигналов АЭ с усреднением их параметров примем все условия, которые использовали при исследовании результирующих сигналов без усреднения амплитуды и энергии. При проведении расчетов будем использовать усреднение амплитуды и энергии результирующих сигналов АЭ по 10 расчетным значениям. Как и ранее, исследования будем проводить в три этапа. На конечном этапе проведем анализ зависимостей изменения процентных приращений среднего уровня усредненной амплитуды \bar{U}_C , ее стандартного отклонения $s_{\bar{U}_C}$ и дисперсии $s_{\bar{U}_C}^2$, а так же зависимостей изменения процентных приращений среднего уровня усредненной энергии \bar{E}_C , ее стандартного отклонения $s_{\bar{E}_C}$ и дисперсии $s_{\bar{E}_C}^2$ по отношению к их начальному значению при $\bar{r}=10000$.

Результаты проведенных исследований, в виде зависимостей изменения процентных приращений \bar{U}_C , $s_{\bar{U}_C}$, $s_{\bar{U}_C}^2$, \bar{E}_C , $s_{\bar{E}_C}$ и $s_{\bar{E}_C}^2$ показаны на рис. 3. Из рис. 3 видно, что при усреднении амплитуды и энергии результирующих сигналов АЭ зависимости изменения процентных приращений \bar{U}_C , $s_{\bar{U}_C}$, $s_{\bar{U}_C}^2$, \bar{E}_C , $s_{\bar{E}_C}$ и $s_{\bar{E}_C}^2$ подобны зависимостям, полученным без усреднения параметров результирующих сигналов АЭ. Анализ полученных данных показывает, что зависимости изменения \bar{U}_C , $s_{\bar{U}_C}$, \bar{E}_C и $s_{\bar{E}_C}$, как и ранее, имеют линейный характер возрастания и хорошо описываются выражением (4). При этом коэффициенты аппроксимирующего выражения (4) для анализируемых зависимостей \bar{U}_C , $s_{\bar{U}_C}$, \bar{E}_C и $s_{\bar{E}_C}$ равны: для процентного прироста среднего уровня усредненной амплитуды — $A=-9,76$, $B=0,00097$; для процентного прироста стандартного отклонения

— $A=-51,85$, $B=0,0051$; для процентного прироста среднего уровня усредненной энергии — $A=-27,89$, $B=0,00277$; для процентного прироста стандартного отклонения среднего уровня усредненной энергии — $A=-84,86$, $B=0,00828$. Коэффициенты корреляции для процентного прироста среднего уровня усредненной амплитуды \bar{U}_C результирующих сигналов АЭ и его стандартного отклонения $s_{\bar{U}_C}$, среднего уровня усредненной энергии \bar{E}_C и его стандартного отклонения $s_{\bar{E}_C}$, соответственно, равны: $R=0,99914$; $R=0,99868$; $R=0,99949$; $R=0,99877$.

Из рис. 3 так же видно, что зависимости изменения дисперсии среднего уровня усредненной амплитуды и среднего уровня усредненной энергии результирующих сигналов АЭ имеют не линейный характер возрастания. Анализ полученных данных показывает, что зависимости изменения $s_{\bar{U}_C}^2$ и $s_{\bar{E}_C}^2$, как и ранее, хорошо описываются выражением (5). Коэффициенты аппроксимирующего выражения (5) для анализируемых зависимостей $s_{\bar{U}_C}^2$ и $s_{\bar{E}_C}^2$ равны: для процентного прироста дисперсии среднего уровня усредненной амплитуды — $a=1,73 \times 10^{-10}$, $b=2,75$; для процентного прироста дисперсии среднего уровня усредненной энергии $a=4,25 \times 10^{-11}$, $b=2,95$. При этом коэффициенты корреляции для процентного прироста дисперсии среднего уровня амплитуды и дисперсии среднего уровня энергии результирующих сигналов АЭ, соответственно, равны: $R=0,98956$; $R=0,99587$.

Результаты проведенных исследований показывают, что обработка акустического излучения с введением усреднения параметров результирующих сигналов АЭ не приводит к принципиальному изме-

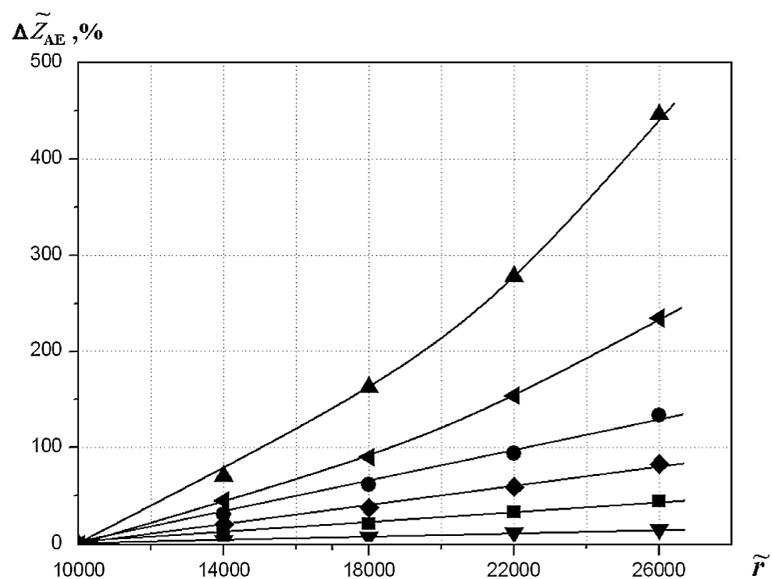


Рис. 3. Графики изменения процентного прироста среднего уровня усредненной амплитуды \bar{U} (▼), его стандартного отклонения $s_{\bar{U}}$ (◆) и дисперсии $s_{\bar{U}}^2$ (◀), среднего уровня усредненной энергии \bar{E} (■), его стандартного отклонения $s_{\bar{E}}$ (●) и дисперсии $s_{\bar{E}}^2$ (▲) в зависимости от \bar{r} по отношению к начальным их значениям при $\bar{r}=10000$

нению характера закономерностей процентного прироста амплитудно-энергетических параметров результирующих сигналов АЭ с уменьшением дисперсности прочностных свойств КМ (возрастания значения параметра \tilde{r}). При этом зависимости изменения процентного прироста среднего уровня амплитуды, среднего уровня усредненной амплитуды, среднего уровня энергии и среднего уровня усредненной энергии остаются без изменения (рис. 2, рис. 3), т.е. введение усреднения не влияет на зависимости изменения данных параметров результирующих сигналов АЭ с возрастанием \tilde{r} . Характер изменения процентного прироста стандартных отклонений среднего уровня амплитуды, среднего уровня усредненной амплитуды, среднего уровня энергии, среднего уровня усредненных энергий, а так же дисперсий среднего уровня амплитуды, среднего уровня усредненной амплитуды, среднего уровня энергии и среднего уровня усредненных энергий является однотипным. Однако введение усреднения приводит к возрастанию скорости изменения процентного прироста данных параметров, по отношению к их изменению при обработке без усреднения. В тоже время, наибольший процентный прирост наблюдается в дисперсиях энергетических параметров результирующих сигналов АЭ при их обработке, как без усреднения, так и с усреднением. Это означает, что наиболее чувствительными параметрами к уменьшению дисперсности КМ по прочностным свойствам являются дисперсии среднего уровня энергии и среднего уровня усредненной энергии результирующих сигналов АЭ.

Следует отметить, что аналогичные результаты получены при исследовании влияния скорости вращения пары трения из КМ на энергетические параметры результирующих сигналов АЭ [14]. Однако увеличение скорости вращения пары трения из КМ приводит к значительно большему процентному приросту дисперсий среднего уровня энергии и среднего уровня усредненных энергий результирующих сигналов АЭ, чем уменьшение дисперсности прочностных свойств КМ.

Выводы

Результаты моделирования акустического излучения при трении поверхностей КМ показывают, что уменьшение дисперсности свойств КМ приводит к возрастанию амплитудно-энергетических параметров результирующей сигнал АЭ — средних уровней амплитуды и энергии, а так же их стандартных отклонений и дисперсий. При этом статистическая обработка полученных данных показала, что зависимости изменения процентного прироста средних уровней амплитуды и энергии и их стандартных отклонений с уменьшением дисперсности КМ имеют однотипный характер возрастания и описываются линейными функциями. Однако воз-

растание процентного прироста дисперсий среднего уровня амплитуды и энергии происходит не линейным образом, а их зависимости описываются степенными функциями.

Результаты моделирования акустического излучения при трении поверхностей КМ так же показывают, что введение обработки с усреднением параметров результирующих сигналов АЭ не приводит к принципиальному изменению в характере закономерностей процентного прироста их амплитудно-энергетических параметров с уменьшением дисперсности прочностных свойств КМ. При этом введение усреднения не влияет на зависимости изменения процентного прироста среднего уровня амплитуды, среднего уровня усредненной амплитуды, среднего уровня энергии и среднего уровня усредненной энергии результирующих сигналов АЭ. Характер изменения процентного прироста стандартных отклонений среднего уровня усредненной амплитуды и среднего уровня усредненной энергии, а так же их дисперсий однотипен зависимостям изменения данных параметров при обработке результирующих сигналов АЭ без усреднения. Однако введение усреднения приводит к возрастанию скорости изменения процентного прироста данных параметров, по отношению к их изменению при обработке без усреднения.

Анализ полученных данных так же показывает, что при обработке результирующих сигналов АЭ как без усреднения, так и с усреднением их параметров наибольший процентный прирост с уменьшением дисперсности КМ по прочностным свойствам наблюдается в дисперсиях среднего уровня энергии и среднего уровня усредненной энергии. Другими словами, наиболее чувствительными параметрами к уменьшению дисперсности КМ по прочностным свойствам являются дисперсии среднего уровня энергии и среднего уровня усредненной энергии результирующих сигналов АЭ. В тоже время, интерес представляет исследование процесса накопления энергетических параметров результирующих сигналов АЭ при изменении влияющих факторов, что является важным при разработке методов контроля процессов трения и износа поверхностей КМ.

Литература

- [1] Bria V. Tribological and wear properties of multi-layered materials / V. Bria, D. Dima, G. Andrei, I. Birsan, A. Circiumaru // Tribology in industry. — 2011. — vol.33. — N.3. — P. 104–109.
- [2] Hong E. Tribological properties of copper alloy-based composites reinforced with tungsten carbide particles / E. Hong, B. Kaplin, T. You, M. Suh, Y.S. Kim, H. Choe // Wear. — 2011. — vol.270. — P. 591–597.
- [3] Reddappa H.N. Dry sliding friction and wear behavior of aluminum/beryl composites / H.N. Reddappa, K.R. Suresh, H.B. Niranjana, K.G. Satyanarayana // Int. J. of

- Appl. Engin. Research, Dindigul. – 2011. – vol.2. – N. 2. – P. 502–511.
- [4] Polok-Rubiniec M. Comparison of the PVD coatings / M. Polok-Rubiniec, L.A. Dobrzanski, M. Adamiak // Archives of materials science and engineering. – 2009. – vol.38. – N. 2. – P. 118–125.
- [5] Dobrzanski L.A. Tribological properties of the PVD and CVD coatings deposited onto the nitride tool ceramics / L.A. Dobrzanski, D. Paku a, A. Kriz, M. Sokovic, J. Kopaс // J. of Mater. Processing Technology. – 2006. – vol.175. – P. 179–185.
- [6] Paku a D. Structure and properties of multicomponent coatings deposited onto sialon tool ceramics /D. Paku a // Archives of materials Science and engineering. – 2011. – vol.52. – N1. – P. 54–60.
- [7] 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.-No3.-P.87-94.
- [8] Filonenko S.F. Modeling of the acoustic emission signals for the case of material's surface layers distraction in the process of friction / Filonenko, A.P. Stahova, T.N. Kositskaya // Proceedings of the National aviation university. – 2008. – №2. – P. 24–28.
- [9] Filonenko S. Influence of friction surfaces properties of composite materials on acoustic emission / S. Filonenko, A. Kosmach // Proceedings of the National aviation university. – 2013. – N.1. – P. 70–77.
- [10] Филоненко С.Ф. Моделирование сигналов акустической эмиссии при изменении объема материала, вступившего в пластическую деформацию / С.Ф. Филоненко, А.П. Стахова, В.Г. Кравченко // Технологические системы. – 2008. – №1(41). – С. 22–27.
- [11] Filonenko S.F. Definition of contact stress in friction units on the basis of the acoustic emission method / S.F. Filonenko, V.M. Stadnychenko, A.P. Stahova //Aviation. – 2009. – vol.13. – N.3. – P. 72–77.
- [12] Filonenko S.F. Destruction of composite material by shear load and formation of acoustic radiation/ S.F. Filonenko, V. Kalita, A. Kosmach //Aviation. – 2012. – vol.16. – N.1. – P. 5–13.
- [13] Філоненко С.Ф. Закономірності зміни амплітудних та енергетичних параметрів сигналів акустичної емісії при зміні неоднорідності властивостей композиційного матеріалу / С.Ф.Філоненко, О.П. Космач // Вісник інженерної академії України. – 2012. – №1. – С. 169–175.
- [14] Филоненко С.Ф. Моделирование акустического излучения при изменении скорости вращения пары трения из композиционных материалов / С.Ф. Филоненко А.П. Космач // Технологические системы. – 2013. – №1(62). – С. 24–30.

Filonenko S.F., Kosmach A.P., Kositskaya T.N.
National Aviation University. Ukraine, Kiev

ACOUSTIC EMISSION AT CHANGE OF DISPERSION PROPERTIES OF FRICTION SURFACES FROM COMPOSITE MATERIALS

The outcomes of simulation of acoustic emission are reviewed at friction of surfaces from composite material. Is shown, that decreasing of dispersion strength properties of composite material results in ascending of amplitude and energy parameters of resultant acoustic emission signals. The approximating expressions for relations of change amplitude and energy parameters of resultant acoustic emission signals are determined at decreasing dispersion of strength properties of composite material. Is shown, that the processing of acoustic radiation with averaging of its parameters does not result in change of nature ascending the parsed relations. Is determined, that the most sensing parameters to decreasing disperse of strength properties composite material are the dispersions of average level energy and average level of average energy of resultant acoustic emission signals.

Keywords: acoustic emission, dispersion, strength properties, composite material.

References

- [1] Bria V. Tribological and wear properties of multi-layered materials / V. Bria, D. Dima, G. Andrei, I. Birsan, A. Circiumaru // Tribology in industry. – 2011. – vol.33. – N.3. – P. 104–109.



- [2] Hong E. Tribological properties of copper alloy-based composites reinforced with tungsten carbide particles / E. Hong, B. Kaplin, T. You, M. Suh, Y.S. Kim, H. Choe // *Wear*. – 2011. – vol.270. – P. 591–597.
- [3] Reddappa H.N. Dry sliding friction and wear behavior of aluminum/beryl composites / H.N. Reddappa, K.R. Suresh, H.B. Niranjana, K.G. Satyanarayana // *Int. J. of Appl. Engin. Research, Dindigul*. – 2011. – vol.2. – N. 2. – P. 502–511.
- [4] Polok-Rubiniac M. Comparison of the PVD coatings / M. Polok-Rubiniac, L.A. Dobrzanski, M. Adamiak // *Archives of materials science and engineering*. – 2009. – vol.38. – N. 2. – P. 118–125.
- [5] Dobrzanski L.A. Tribological properties of the PVD and CVD coatings deposited onto the nitride tool ceramics / L.A. Dobrzanski, D. Paku a, A. Kriz, M. Sokovic, J. Kopac // *J. of Mater. Processing Technology*. – 2006. – vol.175. – P. 179–185.
- [6] Paku a D. Structure and properties of multicomponent coatings deposited onto sialon tool ceramics /D. Paku a // *Archives of materials Science and engineering*. – 2011. – vol.52. – N1. – P. 54–60.
- [7] 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. – No3. – P.87-94.
- [8] Filonenko S.F. Modeling of the acoustic emission signals for the case of material's surface layers distraction in the process of friction / Filonenko, A.P. Stahova, T.N. Kositskaya // *Proceedings of the National aviation university*. – 2008. – №2. – P. 24–28.
- [9] Filonenko S. Influence of friction surfaces properties of composite materials on acoustic emission / S. Filonenko, A. Kosmach // *Proceedings of the National aviation university*. – 2013. – N.1. – P. 70–77.
- [10] Filonenko S.F. Simulation of acoustic emission signals at change of material volume which entered in plastic deformation / S.F. Filonenko, A.P. Stahova, V.G. Kravchenko // *Technological systems*. – 2008. – vol.1(41). – P. 22–27.
- [11] Filonenko S.F. Definition of contact stress in friction units on the basis of the acoustic emission method / S.F. Filonenko, V.M. Stadnychenko, A.P. Stahova // *Aviation*. – 2009. – vol.13. – N.3. – P. 72–77.
- [12] Filonenko S.F. Destruction of composite material by shear load and formation of acoustic radiation / S.F. Filonenko, V. Kalita, A. Kosmach // *Aviation*. – 2012. – vol.16. – N.1. – P. 5–13.
- [13] Filonenko S.F. Regularities of change of amplitude and energy parameters of acoustic emission signals at changing of heterogeneity properties of composite material / S.F. Filonenko, A.P. Kosmach // *Proceedings of engineering academy of Ukraine*. – 2012. – N.1. – P. 169–175.
- [14] Filonenko S.F. Simulation of acoustic radiation at change of rotation speed of the friction pair with composite materials / S.F. Filonenko, A.P. Kosmach // *Technological Systems*. – 2013. – N.1 (62). – P. 24–30.