

УДК 620.179:534.6

Филоненко С.Ф., Космач А.П., Косицкая Т.Н.

Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ТРЕНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анотація

Рассмотрены результаты исследования сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных при трении поверхностей образцов из композиционного материала. Показано, что с возрастанием скорости вращения пары трения происходит возрастание среднего уровня результирующего сигнала акустической эмиссии, а так же его дисперсии и стандартного отклонения. Определено, что такое возрастание анализируемых параметров происходит по линейному закону.

Анотація

The results of investigation of acoustic emission signals which registered at friction of surfaces from composite material is reviewed. Is shown, that the ascending of rotation rate of friction pair lead to ascending an average level of resulting acoustic emission signal, and its dispersions and standard deviations. Is determined, that such ascending of parsed parameters descends under the linear law.

Постановка проблемы

Техническая диагностика трибосистем охватывает широкий круг вопросов, связанных с теоретическими и экспериментальными исследованиями узлов трения. В основе таких исследований лежат методы, позволяющие регистрировать и обрабатывать различную информацию. Однако наибольший интерес представляют методы, базирующиеся на явлениях, протекающих в структуре материалов при действии механических нагрузок, температуры, а так же различной природы полей. Одним из таких методов является метод акустической эмиссии (АЭ).

Количество работ, посвященных исследованию АЭ при трении, непрерывно возрастает. Это обусловлено тем, что регистрируемое акустическое излучение порождается внутренними процессами, протекающими в структуре материала не только на макро-, но и микро- и субмикро уровнях. Такая чувствительность метода позволяет получать значительные объемы информации,

достоверная интерпретация которой является основой в разработке методов технической диагностики узлов трения. Следует отметить, что проблема интерпретации и идентификации АЭ информации усложняется наличием ряда влияющих факторов — нагрузки на пару трения, скорость вращения, температура, состав смазки и другими, а так же спецификой строения материалов, используемых в парах трения — материалы с традиционной структурой, композиционных материалы, материалы с покрытиями и другие. С данной точки зрения, теоретические и экспериментальные исследования АЭ при трении представляют значительный интерес. В первую очередь, это относится к сопоставлению теоретических и экспериментальных результатов. Такое сопоставление позволяет не только получать закономерности изменения акустического излучения в процессе трения при действии различных факторов, но и повысить достоверность разрабатываемых методов АЭ диагностики.

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, регистрируемая при исследовании трибосистем, обусловлена процессами, развивающимися в поверхностных слоях материалов, которые ведут к их разрушению. Безусловно, что данные процессы определяются спецификой строения материалов, используемых в узлах трения — традиционные материалы и многокомпонентные или композиционные материалы.

Результаты теоретических исследований АЭ при трении поверхностных слоев из материалов с традиционной структурой рассмотрены в работах [1-3]. В основе построения модели результирующего сигнала АЭ были положены модели импульсных сигналов АЭ, которые возникают при разрушении вторичных структур I и II типа, которые рассмотрены в работе [4]. Математическое описание результирующего сигнала АЭ позволило провести моделирование сигналов при действии различных факторов — скорости вращения поверхностей трения, внешней приложенной нагрузки, объема материала вступившего в пластическую



деформацию. При этом были определены основные закономерности изменения параметров результирующего сигнала на стадии нормального и катастрофического изнашивания. Было показано, что при возрастании величины внешней осевой нагрузки, действующей на пару 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 значения его амплитуды и величины ее разброса. Так же показано, что 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 поверхностных слоев на основе композиционных материалов, рассмотрена в работе [5]. В основе построения модели результирующего сигнала АЭ использована модель импульсного сигнала, формируемого при разрушении композиционного материала под действием поперечной силы [6-8]. При построении моделей использована концепция разрушения FBM [9-11] и кинетические закономерности разрушения [12, 13].

Согласно модели результирующего сигнала АЭ, формируемого при износе поверхностей из композиционного материала, в работе [5] проведено исследование закономерностей изменения его параметров при действии различных факторов. Показано, что при трении композиционного материала формируется непрерывный сигнал АЭ с некоторым средним значением амплитуды и величиной 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 увеличению 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 так же величины ее разброса. Формируемый сигнал АЭ имеет изрезанную форму. Если уменьшается количество разрушаемых элементов, то происходит уменьшение среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ и увеличение величины ее разброса. Сигнал АЭ так же имеет изрезанную форму. Показано, что такие закономерности изменения параметров результирующего сигнала АЭ и изре-

занность их формы обусловлены условиями перекрытия импульсных сигналов АЭ.

Задачи исследования

В работе будут рассмотрены результаты экспериментальных исследований результирующих сигналов АЭ, формируемых при трении и износе поверхностей узлов трения с наплавлением композиционного материала. Будет показано, что результирующие сигналы АЭ являются непрерывными сигналами с некоторым средним уровнем амплитуды и определенной величиной ее разброса. Формируемый сигнал АЭ имеет изрезанную форму. Будет проведена статистическая обработка регистрируемых сигналов АЭ. Так же будет показано, что при постоянной эксплуатационной нагрузке увеличение скорости вращения пары трения приводит к возрастанию среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, увеличению величины ее дисперсии и стандартного отклонения. Так же будет показано, что возрастание анализируемых параметров происходит по линейному закону.

Методика исследований

Для проведения исследований сигналов АЭ при трении были изготовлены образцы из алюминиевого сплава Д16 с твердосплавным покрытием и стали 30ХГСА. Образцы представляли собой втулки (рис. 1) с переменной площадью поверхности контактного взаимодействия. Поверхность контактного взаимодействия для образцов из стали 30ХГСА охватывала всю их торцевую площадь. Для образцов из алюминиевого сплава с покрытием поверхность контактного взаимодействия была переменной. Она характеризовалась коэффициентом перекрытия K_p (отношение полной площади поверхности к площади контактируемой поверхности), величина которого изменялась в диапазоне значений от 0,25 до 1,0. Это обеспечивалось введением соответствующих прорезей на торцевых поверхностях образцов (рис. 1). Выбор материалов изготовленных образцов был обусловлен их широким использованием в трансмиссиях автомобилей.

Испытания образцов на износ осуществляли с использованием конструктивной схемы взаимодействия «диск-диск» на модернизированной испытательной машине СМТ-1. В соответствии со схемой испытаний (рис. 2), один из образцов 3 пары трения был неподвижным, а другой образец 2 устанавливался в патрон, размещенный на шпинделе 1 машины трения, и вращался с задаваемой постоянной скоростью. Скорость вращения подвижного образца изменялась в диапазоне величин от 500 мин⁻¹ до 900 мин⁻¹ с приращением по 100 мин⁻¹ и задавалась при помощи электропривода Д₁ машины СМТ-1. Управление электроприводом Д₁ осу-

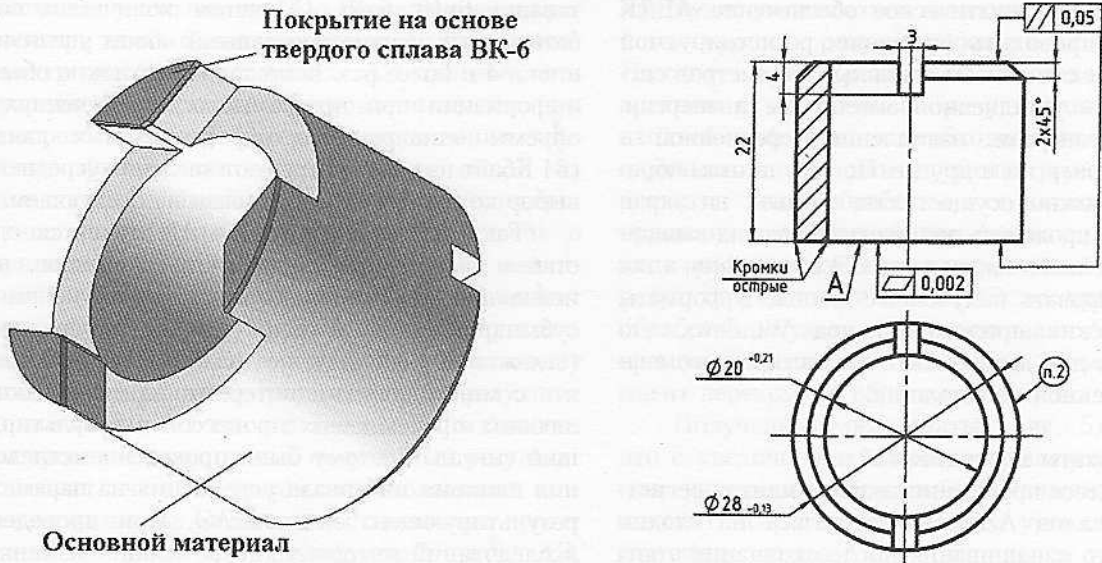


Рис. 1. Общий вид образца с покрытием (а) и чертеж (б) образцов для испытания на износ

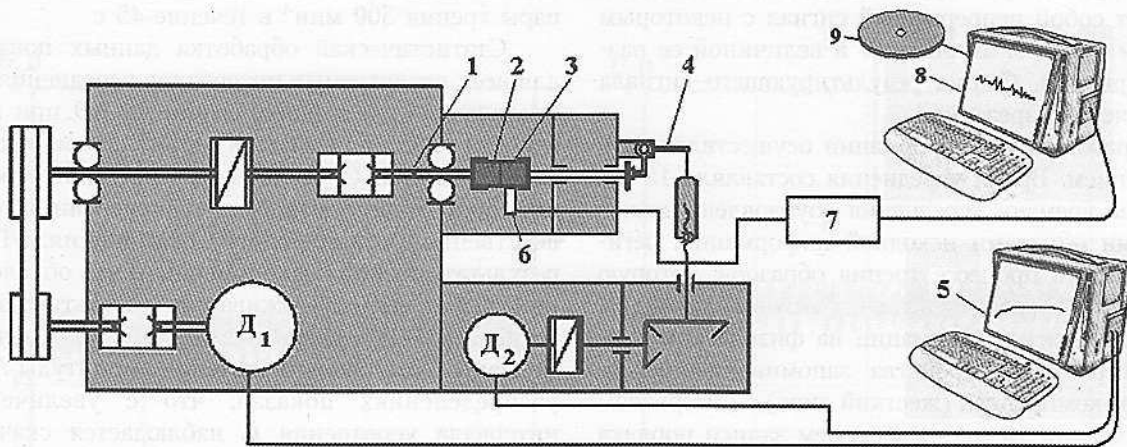


Рис. 2. Структурная схема стенда для проведения испытаний образцов на износ с регистрацией сигналов акустической эмиссии: 1 – шпиндель машины трения; 2, 3 – соответственно, подвижный и не подвижный образцы пары трения; 4 – механизм осевого нагружения весового типа; 5 – компьютерная система управления узлами нагружения образцов; 6 – датчик акустической эмиссии; 7 – усилительный тракт сигналов акустической эмиссии; 8 – акусто-эмиссионный диагностический комплекс; 9 – специальное программное математическое обеспечение; Д1 – электропривод задания скорости вращения подвижного образца; Д2 – электропривод управления механизмом нагружения весового типа

существлялось с использованием компьютерной системы управления 5 (рис. 2). При проведении экспериментов к паре трения прикладывалась осевая нагрузка, значение которой не изменялось. Она создавалась при помощи специального механизма весового типа 4, и воздействовала на неподвижный образец 3. Величина осевой нагрузки составляла 450 Н. Значение весовой нагрузки задавалось при помощи электропривода Д₂ машины трения СМТ-1. Управление электроприводом производилось с использованием компьютерной системы управления 5. В качестве смазывающей среды при про-

ведении экспериментов использовалось масло типа М10Г2К [14]. Расход масла составлял 1,2 л/час.

В процессе проведения испытаний образцов на трение осуществлялась регистрация и обработка сигналов АЭ. Для этого на неподвижном образце 3 (рис. 2) устанавливался датчик 6 АЭ. Его поверхность смазывалась акусто-прозрачной смазкой типа «Рамзай». Сигнал с выхода датчика усиливался в усилительном тракте 7 и поступал в акусто-эмиссионный диагностический комплекс 8 (АЕДК). Обработка и анализ регистрируемых сигналов АЭ осуществлялась с использованием специального



программного математического обеспечения 9. Программное математическое обеспечение АЕДК позволяет проводить хранение регистрируемой информации с анализом основных параметров сигналов АЭ — усредненной амплитуды и энергии, суммарной энергии, накопления усредненной и суммарной энергии и другие. По результатам обработки, возможно осуществлять вывод на экран монитора и проводить анализ графических зависимостей изменения параметров АЭ во времени, а так же транслировать полученные данные в форматы математических приложений под Windows, что необходимо для дальнейшего статистического анализа полученной информации.

Результаты исследований

В процессе проведения экспериментов регистрация сигналов АЭ осуществлялась на стадии нормального изнашивания после окончания этапа приработки пар трения. Полученные результаты показали, что при заданных значениях осевой нагрузки и скорости вращения пары трения регистрируемый результирующий сигнал АЭ представляет собой непрерывный сигнал с некоторым средним уровнем амплитуды и величиной ее разброса (рис. 3). Форма результирующего сигнала АЭ является изрезанной.

Обработка АЭ информации осуществлялась с усреднением. Время усреднения составляло 15 мс. Введение времени усреднения обусловлено значительными объемами исходной информации, регистрируемой в процессе трения образцов, которую необходимо сохранять в виде файловых структур. Так, при записи информации на физическом уровне построения устройства запоминания персонального компьютера (жесткий диск) с интервалом дискретизации 10 мкс и временем записи порядка

5 мин, то объем регистрируемой информации составляет 6×10^7 байт. С учетом количества обрабатываемых параметров данный объем увеличивается в 4 и более раз. Безусловно, что такие объемы информации при программных ограничениях на объемы одновременно обрабатываемых данных (64 Кбайт на массив) требуют введения усреднения, выбор которого (15 мс) основан на следующем.

Так как, регистрируемая АЭ является следствием внутренних физических процессов, происходящих в материалах при их нагружении на субмикро-, микро- и макроуровнях, то усреднение (сглаживание данных) не должно влиять или влиять с минимальными потерями на вклад составляющих протекающих процессов в результирующий сигнал. Поэтому были проведены исследования влияния интервала усреднения на параметры результирующего сигнала АЭ. При проведении исследований интервал дискретизации изменялся в диапазоне величин от 5 мс до 45 мс с интервалом приращения 1 мс. Рассмотрим результаты исследований для результирующего сигнала АЭ, зарегистрированного при скорости вращения пары трения 500 мин^{-1} в течение 45 с.

Статистическая обработка данных показала, для всех исследуемых интервалов усреднения распределение усредненных амплитуд АЭ при вероятности 0,95 описывается нормальным законом распределения. С увеличением времени усреднения происходит уменьшение дисперсии и, соответственно, стандартного отклонения. Такой результат является закономерным, что обусловлено увеличением сглаживания результирующего сигнала АЭ. В тоже время, анализ значения медианы \bar{U}_{md} (среднего значения амплитуды АЭ) в распределениях показал, что с увеличением интервала усреднения t_u наблюдается скачок в изменении ее величины (рис. 4).

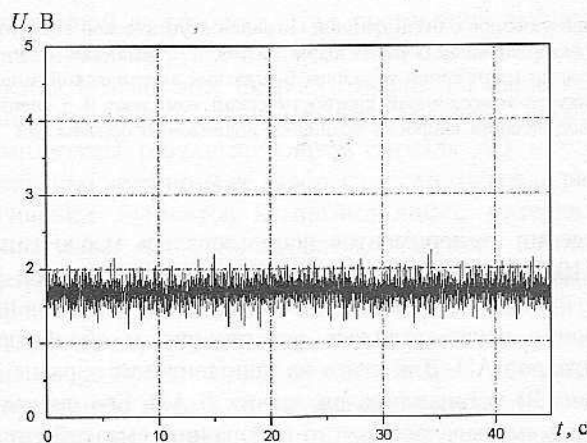


Рис. 3. Результирующий сигнал акустической эмиссии, зарегистрированный при испытаниях на износ образцов из стали 30ХГСА и сплава Д16 с покрытием из композиционного материала ВК-6. Скорость вращения пары трения 500 мин^{-1} . Осевая нагрузка 450 Н. Время усреднения 15 мс

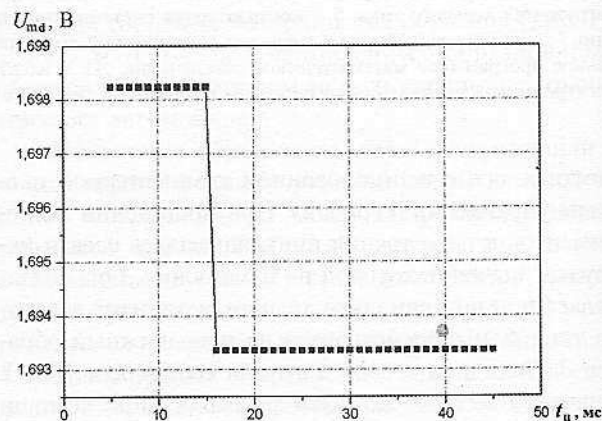


Рис. 4. График изменения среднего уровня результирующего сигнала акустической эмиссии от величины интервала усреднения

Из рис. 4 видно, что при значении $t_u=20$ мс происходит уменьшение \bar{U}_{md} . Ее величина сохраняется при дальнейшем увеличении t_u . Такое изменение среднего уровня сигнала АЭ при введении их усреднения, вероятно, обусловлено тем, что при некотором значении интервала усреднения происходит фильтрация вклада уровня одной из составляющих процесса, развивающегося в поверхностных слоях пары трения. Так как скачок в изменении среднего уровня амплитуд не значительный (разница в значениях медиан составляет порядка 0,005 В), то, с учетом высокой чувствительности метода АЭ, вероятно, что происходит сглаживание процессов, дающих вклад в результирующий сигнал АЭ, на достаточно малом физическом уровне. В тоже время, полученный результат показывает, что, с учетом необходимости минимизации потерь от вклада составляющих протекающих процессов в результирующий сигнал АЭ, обработку регистрируемой информации можно проводить с интервалом усреднения, значение которого находится в определенном диапазоне величин – от 5 мс до 19 мс (рис. 4). При этом следует

учитывать, что с возрастанием интервала усреднения будет уменьшаться величина дисперсии среднего уровня результирующего сигнала АЭ. Поэтому при проведении исследований для сравнения полученных результатов обработку входной информации необходимо проводить при одинаковом значении времени усреднения. Результаты такой обработки для разных скоростей вращения пары трения при показаны на рис. 5 в виде графиков изменения усредненной амплитуды результирующих сигналов АЭ во времени. При обработке результирующих сигналов АЭ значение времени усреднения составляло 15 мс. Коэффициент перекрытия образцов составлял $K_p=0,25$.

Полученные результаты (рис. 5) показали, что с увеличением скорости вращения пары трения на стадии нормального изнашивания происходит возрастание среднего уровня результирующего сигнала АЭ и величины ее разброса. На всех исследуемых скоростях результирующий сигнал АЭ имеет изрезанную форму. Проведем анализ данных с точки зрения информативности параметров результирующих сигналов АЭ.

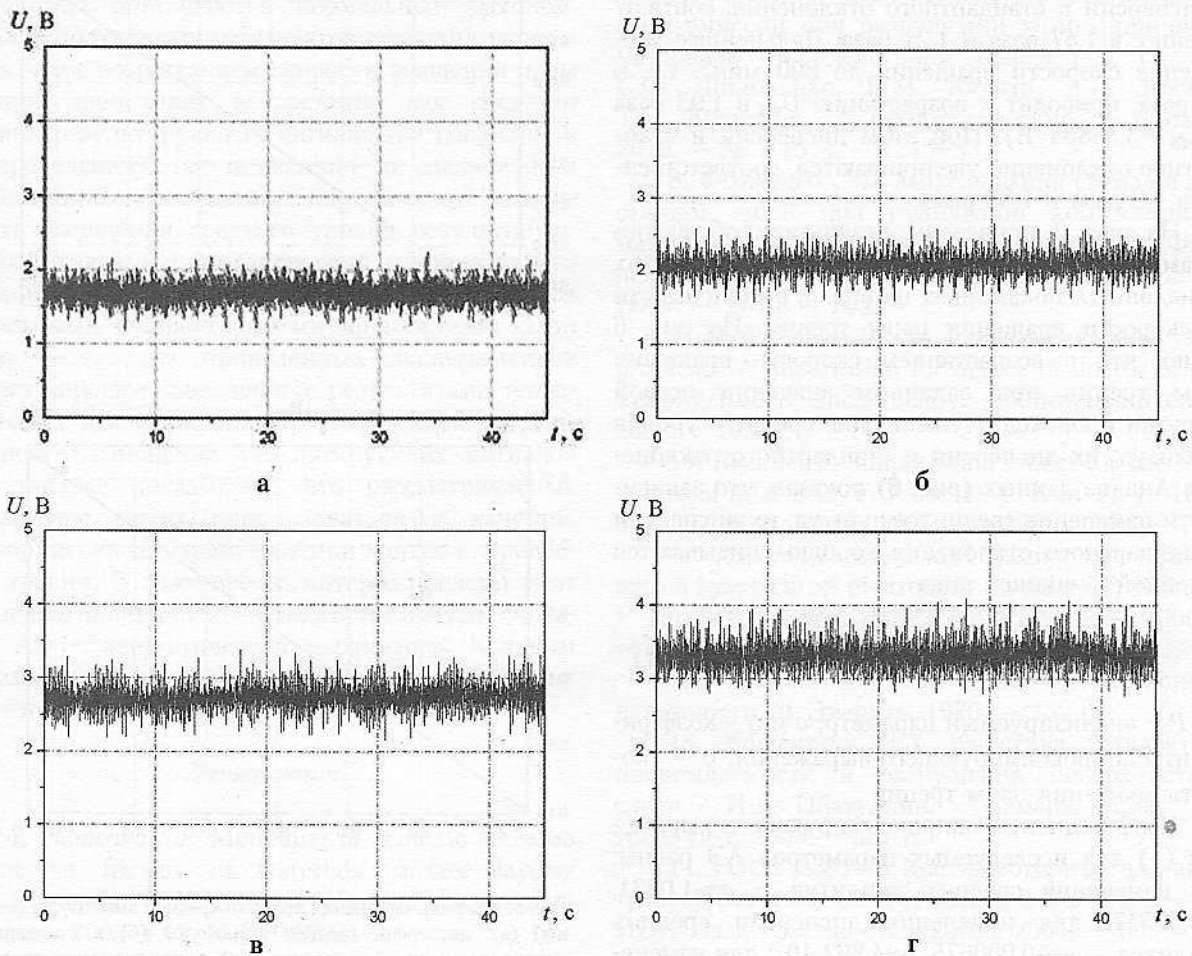


Рис. 5. Результирующие сигналы акустической эмиссии, зарегистрированные при испытаниях на износ исследуемой пары трения при разных скоростях вращения. Скорость вращения: а – 500 об/мин; б – 600 об/мин; в – 700 об/мин; г – 800 об/мин (15 мс)



Статистическая обработка данных показала, что для всех исследуемых скоростей при интервале анализа 15 мс для вероятности 0,95 распределения усредненных амплитуд описываются нормальным законом. Длина выборки для проведения анализа была неизменной, а количество интервалов анализа на длине выборки было равно 3000. По результатам анализа были определены значения медиан \bar{U}_{md} (средней амплитуды результирующих сигналов АЭ) в распределении, а так же их дисперсии σ^2 стандартные отклонения ϵ . Так при скорости вращения пары трения 500 мин⁻¹ средняя амплитуда результирующего сигнала АЭ равна $\bar{U}_{md5}=1,69824$ В, а дисперсия и стандартное отклонение, соответственно, равны: $\sigma^2=0,01844$ В² и $\epsilon=0,13580$ В. Дальнейший анализ данных будем проводить по отношению к скорости 500 мин⁻¹. Увеличение скорости вращения пары трения в 1,2 раза (до 600 мин⁻¹) приводит к увеличению \bar{U}_{md} в 1,24 раза ($\bar{U}_{md6}=2,09844$ В). При этом дисперсия увеличивается в 1,18 раза, а стандартное отклонение в 1,09 раза. При увеличении скорости вращения пары трения в 1,4 раза (до 700 мин⁻¹) происходит возрастание \bar{U}_{md} в 1,61 раза ($\bar{U}_{md7}=2,73285$ В), а дисперсии и стандартного отклонения, соответственно, в 1,47 раза и 1,21 раза. Дальнейшее увеличение скорости вращения до 800 мин⁻¹, т.е. в 1,6 раза, приводит к возрастанию \bar{U}_{md} в 1,95 раза ($\bar{U}_{md8}=3,30864$ В). При этом дисперсия и стандартное отклонение увеличиваются, соответственно, в 1,8 раза и 1,33 раза.

На рис. 6 приведены результаты обработки параметров средних амплитуд результирующих сигналов АЭ, показанных на рис. 5, в зависимости от скорости вращения пары трения. Из рис. 6 видно, что с возрастанием скорости вращения пары трения при заданном значении осевой нагрузки происходит увеличение среднего уровня амплитуд, их дисперсии и стандартного отклонения. Анализ данных (рис. 6) показал, что зависимости изменения средних амплитуд, их дисперсии и стандартного отклонения хорошо описываются линейной функцией вида

$$P = a + bv \quad (1)$$

где P – анализируемый параметр; a и b – коэффициенты аппроксимирующего выражения; v – скорость вращения пары трения.

Коэффициенты аппроксимирующего выражения (1) для исследуемых параметров АЭ равны: для изменения средних амплитуд – $a=-1,0931$, $b=0,00547$; для изменения дисперсии средних амплитуд – $a=-0,000675$, $b=4,862 \cdot 10^{-5}$; для изменения стандартного отклонения средних амплитуд – $a=0,0574$, $b=1,536 \cdot 10^{-4}$. При этом вероятности

p описания полученных закономерностей для изменения средних амплитуд, их дисперсии и стандартного отклонения, соответственно, составляют: $p=0,99601$; $p=0,99312$; $p=0,99661$.

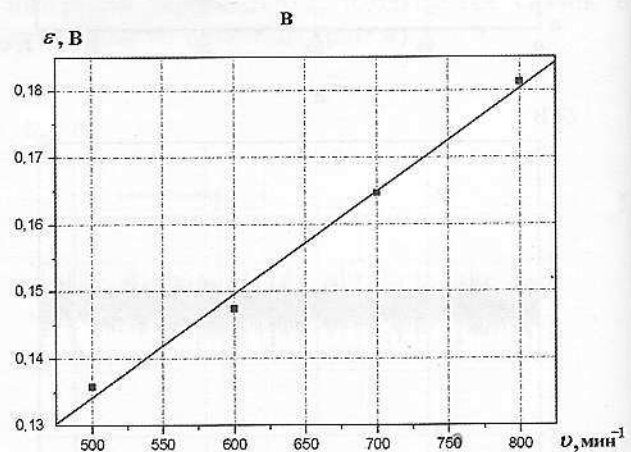
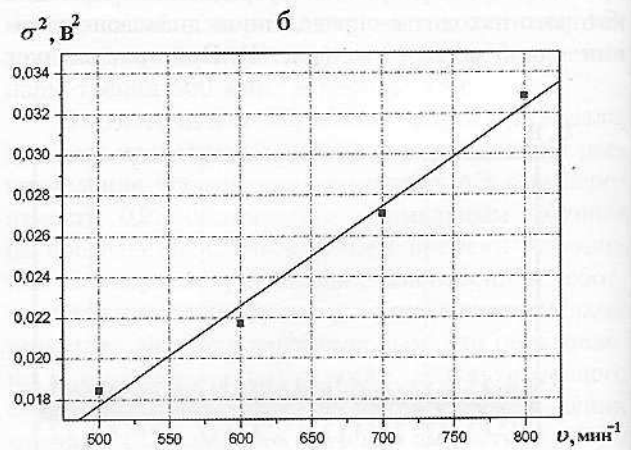
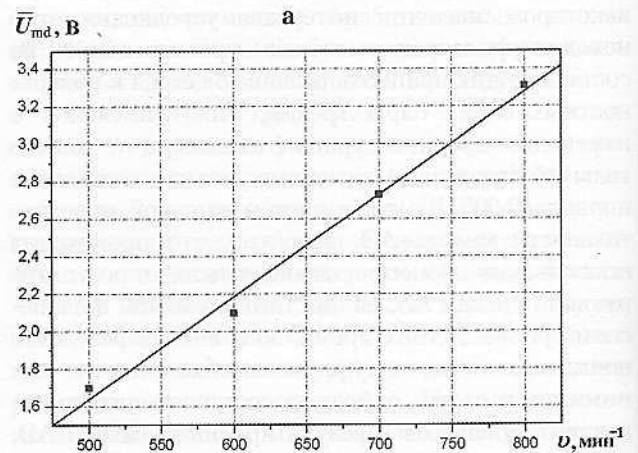


Рис. 6. Графики изменения величин средней амплитуды (медианы) (а), дисперсии средней амплитуды (б) и стандартного отклонения средней амплитуды (в) результирующих сигналов акустической эмиссии в зависимости от скорости вращения пары трения

Выводы

Проведены исследования результирующих сигналов АЭ, регистрируемых при трении поверхностей сопряженных элементов с наплавкой из композиционного материала ВК-6 для различных скоростей вращения изготовленных образцов. Полученные результаты показали, что регистрируемые результирующие сигналы АЭ для всех скоростей вращения пары трения имеют сильно изрезанную форму. Они представляют собой непрерывный сигнал с некоторым значением средней амплитуды и величины ее разброса. Обработка полученных данных показала, что введение усреднения, ведущее к сглаживанию результирующего сигнала АЭ, приводит к потере вклада составляющих процессов, протекающих в поверхностных слоях материалов, в результирующий сигнал АЭ. При этом определен интервал времен усреднения, при котором необходимо проводить обработку регистрируемой информации. Статистическая обработка данных показала, что для всех исследуемых скоростей при выбранном интервале анализа на заданной длине выборки распределения усредненных амплитуд регистрируемых сигналов АЭ описываются нормальным законом. Анализ полученных результатов позволил установить, что с возрастанием скорости вращения пары трения происходит возрастание как среднего уровня результирующего сигнала АЭ (медианы в распределении), так и величин их дисперсии и стандартного отклонения. Показано, что зависимости изменения среднего уровня результирующего сигнала АЭ, их дисперсии и стандартного отклонения с высокой вероятностью описываются линейными возрастающими функциями. При этом результаты проведенных экспериментов имеют хорошее совпадение с результатами теоретических исследований [5]. Полученные закономерности изменения результирующих сигналов АЭ так же показывают, что рассматриваемые параметры могут использоваться в качестве информативных параметров при контроле процессов трения. В тоже время, интерес представляют исследования наиболее емкого параметра сигналов АЭ – энергетических параметров. К таким параметрам относятся усредненная и суммарная энергия результирующих сигналов АЭ.

Литература

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.-No3.-P.87-94

2. *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

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 пар тертя/В.П. Бабак, С.Ф. Филоненко, В.М. Стадниченко, А.П. Стахова //Проблеми тертя та зношування.-2007.-Вип.47.-С 1-8.

5. *Филоненко С.Ф.* Модель сигналу акустичної емісії при терті поверхонь композиційних матеріалів /С.Ф. Филоненко, Т.М. Косицка, О.П. Космач // Наукоємні технології. – 2010. – № 6. – С. 79–86.

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

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

8. *Филоненко С.Ф.* Моделювання сигналів акустичної емісії при руйнуванні композиційних матеріалів під дією поперечної сили /С.Ф. Филоненко, 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. 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. ГОСТ 8581-78 Масла моторные для автотракторных дизелей. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 6 с.