

УДК 620.179:534.6

С.Ф. Филоненко, д.т.н.
А.П. Космач
Т.Н. Косицкая, к.х.н.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГИИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ТРЕНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Национальный авиационный университет (fils01@mail.ru)

Рассмотрены результаты обработки энергетических параметров сигналов акустической эмиссии при трении поверхностей образцов на основе композиционного материала. Показано, что с возрастанием скорости вращения пары трения происходит возрастание медиан усредненной и суммарной энергий регистрируемых сигналов. При этом возрастает их дисперсия и стандартное отклонение. Показано, что возрастание анализируемых параметров происходит по не линейным законам. Однако возрастание дисперсии и стандартного отклонения для суммарной энергии больше, чем для усредненной энергии сигналов акустической эмиссии.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, сигнал, композиционный материал, энергия сигнала, трение поверхностей.

Постановка проблемы

Композиционные материалы находят все большее применение в узлах трения. Это обусловлено более высокой стойкостью таких материалов к процессам износа, развивающимся в их поверхностных слоях. Не смотря на повышенную износостойкость узлов трения с композиционными материалами, так же как и для материалов с традиционной структурой, проблема их технической диагностики остается важной проблемой контроля состояния и оценки ресурса трибосистем. Решение такой проблемы базируется на комплексе теоретических и экспериментальных исследований процессов трения с привлечением различных высокочувствительных методов. Одним из таких методов является метод акустической эмиссии (АЭ).

Не смотря на значительные преимущества метода АЭ, его применение в исследовательской практике сопряжено со значительными трудностями. Это обусловлено значительными объемами интегральной информации, вклад в которую осуществляется на всех уровнях процессов, развивающихся в поверхностных слоях материалов при их разрушении. Наличие такой информации усложняет ее идентификацию, особенно при действии различных факторов. Поэтому теоретические и экспериментальные исследования АЭ при трении и износе поверхностных слоев материалов с учетом влияющих факторов являются важным направлением исследований при поиске общих закономерностей изменения параметров акустического излучения. Использование таких закономерностей изменения параметров АЭ в технической диагностике узлов трения направлены на разработку методов их контроля, оптимизации режимов работы, а так же решение проблемы продления сроков эксплуатации трибосистем.

Анализ последних исследований и публикаций

Вопросам теоретических и экспериментальных исследований сигналов АЭ при трении поверхностей материалов посвящен целый ряд работ [1-7]. Они касаются материалов с различной структурой. Модель результирующего сигнала АЭ, формируемого при трении сопряженных поверхностей, для материалов с традиционной структурой рассмотрена в работе [6], а для композиционного материала - в работе [8]. Модели основаны на закономерностях разрушения поверхностных слоев материалов, а так же кинетики самого процесса разрушения, скорость которого возрастает во времени. Различие моделей заключается в учете специфики разрушения. В первом случае, рассматривается разрушение вторичных структур I и II типа. Во втором случае, модель строится на концепции FBM, когда разрушение композиционного материала рассматривается как процесс последовательного разрушения его элементов. При этом в условиях действия поперечной нагрузки используется правило "OR" ("ИЛИ"). Согласно данному правилу, разрушение элемента композиционного материала происходит либо за счет напряжения изгиба либо за счет напряжения растяжения.

Выражение для результирующего сигнала АЭ, формируемого при разрушении поверхности композиционного материала, полученное в работе [8], имеет вид

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

где j – порядковый номер j -ой площадке контактного взаимодействия, которая разрушается; $U_j(t_j)$ – 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 элементарных импульсных сигналов, формируемых при разрушении элементарных поверхностей, состоящих из заданного количества элементов. При этом элементарный импульсный сигнал, согласно [9], описывается выражением вида

$$U(t) = U_0 \nu_0 [\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})] \times \\ \times e^{r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})]} \times \\ - \nu_0 \int_{t_0}^t e^{r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})]} dt \\ \times e^{-rt_0}, \quad (2)$$

где N_0 – исходное количество элементов на площадке контактного взаимодействия; ν_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).

Исследования, проведенные в работе [9], показывают, что результирующие сигналы АЭ, формируемые при трении поверхностей композиционного материала, являются непрерывными сигналами. Они имеют изрезанную форму. С возрастанием скорости вращения пары трения происходит увеличение среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ (медианы в распределении амплитуд на заданном интервале анализа). Интересным является и то, что с увеличением скорости вращения пары трения, согласно результатам моделирования, должно происходить возрастание величин дисперсии и стандартного отклонения среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ. Обработка результатов моделирования так же показывает, что зависимости изменения среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, величин его дисперсии и стандартного отклонения с высокой вероятностью описываются линейными возрастающими функциями. Полученный результат имеет хорошее согласование с результатами проведенных экспериментальных исследований.

Анализируемые параметры (средний уровень амплитуды результирующего сигнала АЭ, величина его дисперсии и стандартного отклонения), безусловно, могут использоваться в качестве информативных параметров. Однако их приращение, как показывает анализ амплитудных характеристик результирующих сигналов, не значительно. В тоже время, наиболее емким параметром является энергия сигналов АЭ, которая отражает все энергетические уровни процессов, развивающихся в поверхностных слоях исследуемых материалов. Поэтому интерес представляет анализ энергетических параметров сигналов АЭ, регистрируемых при трении.

Задачи исследования

В работе будут рассмотрены результаты экспериментальных исследований энергетических характеристик результирующих сигналов АЭ, формируемых при износе поверхностей узлов трения с наплавлением композиционного материала ВК-6. Будет показано, что при постоянной эксплуатационной нагрузке увеличение скорости вращения пары трения приводит к возрастанию величины медианы как усредненной, так и суммарной энергии результирующего сигнала АЭ.

При этом наблюдается возрастание величины дисперсии медиан усредненной и суммарной энергий, а так же их стандартного отклонения. Будет показано, что возрастание анализируемых параметров происходит по не линейному закону, что свидетельствует об их большей чувствительности к изменению внешнего воздействия (скорости вращения пары трения).

Методика исследований

Исследования АЭ при трении на стадии нормального износа проводили на образцах из алюминиевого сплава Д16 с твердосплавным покрытием и стали 30ХГСА, которые испытывались с использованием конструктивной схемы взаимодействия “диск-диск”. Образцы представляли собой втулки (рис. 1), контактное взаимодействие которых осуществлялось по торцевым поверхностям. При испытаниях один из образцов был неподвижным, а другой образец вращался с заданной скоростью. Поверхность контактного взаимодействия была регулируемой, что обеспечивалось нанесением прорезей на торцевых поверхностях образцов (рис. 1). Она характеризовалась отношением полной площади торцевой поверхности к контактируемой площади торцевой поверхности, т.е. характеризовалась коэффициентом перекрытия K_p . Его значение изменялась в диапазоне величин от 0,25 до 1,0.

Испытания образцов проводили на модернизированной испытательной машине СМТ-1 с компьютерным управлением. При помощи компьютера производилось управление, как скоростью вращения подвижного образца, так и осевой нагрузкой на образец. Скорость вращения подвижного образца изменялась в диапазоне величин от 500 мин⁻¹ до 800 мин⁻¹ с приращением по 100 мин⁻¹ и задавалась при помощи электропривода машины СМТ-1.

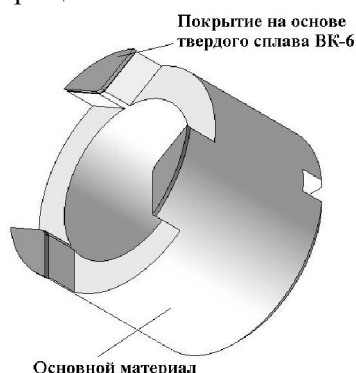


Рис. 1. Общий вид образца с покрытием для испытания на износ

Осевая нагрузка прикладывалась к образцу через специальный механизм весового типа. Ее величина составляла 450 Н и была не изменой. При проведении экспериментов в качестве смазывающей среды использовалось масло типа М10Г2К, расход которого составлял 1,2 л/час.

Для регистрации сигналов АЭ, формируемых при износе поверхностей испытываемых образцов, датчик АЭ устанавливался на неподвижном образце. Перед установкой датчика его поверхность смазывалась акусто-прозрачной смазкой. Результирующие сигналы АЭ с выхода датчика поступали в усилительный тракт, а затем в мобильный акусто-эмиссионный диагностический комплекс, где производилась их обработка с формированием и сохранением необходимых массивов данных. В качестве основных обрабатываемых параметров использовались усредненная и суммарная энергии результирующих сигналов АЭ. Результаты обработки выводились на экран монитора в виде графических зависимостей, а так же преобразовывались в форматы для математических приложений под Windows.

Экспериментальные результаты

Проведенные исследования показали, что результирующие сигналы АЭ, регистрируемые при заданных значениях осевой нагрузки и скорости вращения пары трения, представляют собой непрерывные сигналы с некоторыми средними уровнями усредненных и суммарных энергий, а так же величинами их разброса (рис. 2, рис. 3). Для всех исследованных скоростей характер изменения результирующих сигналов АЭ подобен. Они имеют сильно изрезанную форму. Результирующие сигналы АЭ, показанные на рис. 2 и рис. 3 получены при времени усреднения 15 мс. Его выбор обусловлен необходимостью минимизации потерь от вклада составляющих протекающих процессов в результирующий сигнал АЭ. Обработка данных показала, что при значениях интервала дискретизации 20 мс и выше наблюдается уменьшение медиан усредненной и суммарной энергии результирующих сигналов АЭ. В диапазоне величин от 5 мс до 16 мс значения медиан анализируемых параметров остаются постоянными. Такое изменение в значениях анализируемых параметров, очевидно, обусловлено тем, что увеличение интервала усреднения приводит к сглаживанию (фильтрации) процессов, дающих вклад в результирующий сигнал АЭ. При этом в оптимальном диапазоне интервала усреднения

наблюдаются достаточно медленное изменение дисперсии и стандартного отклонения медиан анализируемых параметров. Отметим, что статистическая обработка данных для всех исследуемых скоростей при интервале анализа 15 мс показала, что для вероятности 0,95 распределения усредненных и суммарных энергий описываются нормальным законом. Длина выборки для проведения анализа была неизменной, а количество интервалов анализа на длине выборки было равно 3000.

Из рис. 2 и рис. 3 видно, что с возрастанием скорости вращения пары трения на происходит возрастание средних уровней энергий результирующих сигналов АЭ, а так же величин их разброса. Это особенно хорошо наблюдается на зависимостях изменения суммарных энергий результирующих сигналов АЭ (рис. 3). Определим значения медиан \bar{E}_{mi} и \bar{E}_{ms} (усредненной и суммарной энергии результирующих сигналов АЭ) в распределениях, а так же их дисперсий σ_E^2 и стандартных отклонений ε_E .

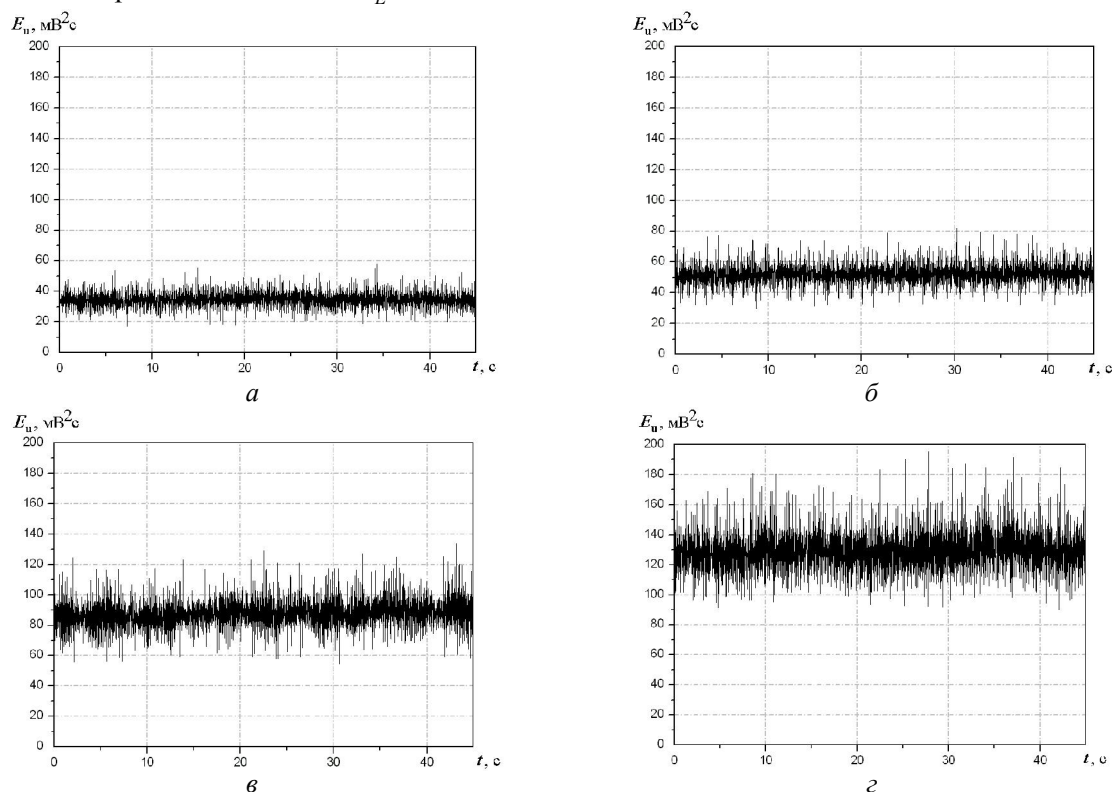


Рис.2. Графики изменения усредненной энергии результирующих сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных при испытаниях на износ пары трения с покрытием из композиционного материала

ВК-6 при разных скоростях вращения. Скорость вращения пары трения:

$a - 500 \text{ мин}^{-1}$; $б - 600 \text{ мин}^{-1}$; $в - 700 \text{ мин}^{-1}$; $з - 800 \text{ мин}^{-1}$ (15 мс)

Обработка данных показала, что при скорости вращения пары трения 500 мин^{-1} медиана усредненной энергии результирующего сигнала АЭ равна $\bar{E}_{mu5} = 34,50843 \text{ мВ}^2\text{с}$, а дисперсия и стандартное отклонение, соответственно, равны: $\sigma_{Eu5}^2 = 26,44854 \text{ мВ}^4\text{с}^2$ и $\varepsilon_{Eu5} = 5,14261 \text{ мВ}^2\text{с}$. Возрастание скорости вращения пары трения в 1,2 раза, т.е. до 600 мин^{-1} , приводит к увеличению \bar{E}_{mi} в 1,51 раза ($\bar{E}_{mu6} = 52,0904 \text{ мВ}^2\text{с}$). Для данной скорости дисперсия увеличивается в 1,86 раз, а стандартное отклонение в 1,37 раза. Дальнейшее увеличение скорости вращения пары трения в 1,4 раза, т.е. до 700 мин^{-1} , приводит к возрастанию \bar{E}_{mi} в 2,53 раза ($\bar{E}_{mu7} = 87,4266 \text{ мВ}^2\text{с}$), а дисперсии и стандартного отклонения, соответственно, в 4,3 раза и 2,0 раза. При возрастании скорости вращения пары трения до 800 мин^{-1} , т.е. возрастании в 1,6 раза, происходит увеличение \bar{E}_{mi} в 3,7 раза ($\bar{E}_{mu8} = 3,30864 \text{ мВ}^2\text{с}$). В данном случае дисперсия и стандартное отклонение увеличиваются, соответственно, в 7,5 раз и 2,93 раз. Из полученных данных видно, что увеличение скорости вращения пары трения приводит к более быстрому увеличению дисперсии медианы усредненной энергии результирующих сигналов АЭ.

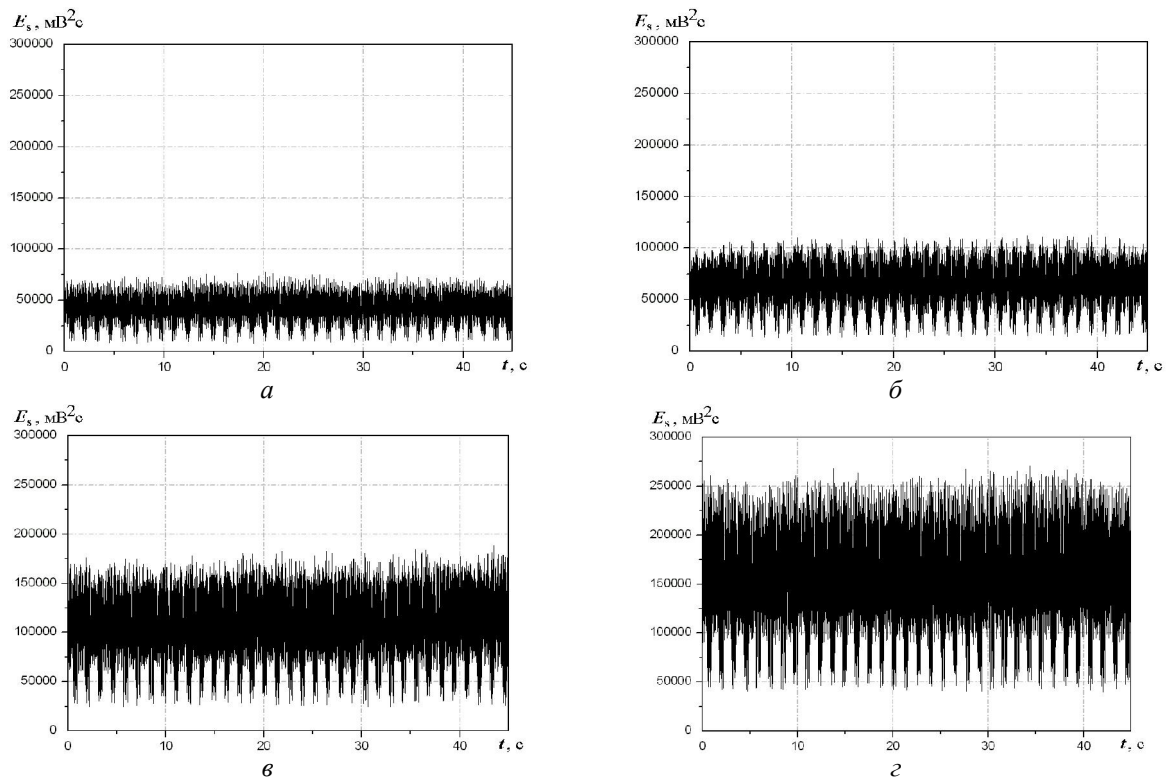


Рис.3. Графики изменения суммарной энергии результирующих сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных при испытаниях на износ пары трения с покрытием из композиционного материала ВК-6 при разных скоростях вращения. Скорость вращения пары трения: $a - 500 \text{ мин}^{-1}$; $b - 600 \text{ мин}^{-1}$; $v - 700 \text{ мин}^{-1}$; $z - 800 \text{ мин}^{-1}$ (15 мс)

Аналогичные результаты получены и при обработке суммарных энергий результирующих сигналов АЭ, показанных на рис. 3. Так при скорости вращения пары трения 500 мин^{-1} медиана суммарной энергии (среднего уровня суммарной энергии) результирующего сигнала АЭ равна $\bar{E}_{ms5} = 38651,3927 \text{ мВ}^2\text{с}$, а дисперсия и стандартное отклонение, соответственно, равны: $\sigma_{Es5}^2 = 2,7365 \cdot 10^8 \text{ мВ}^4\text{с}^2$ и $\varepsilon_{Es5} = 16542,3528 \text{ мВ}^2\text{с}$. При увеличении скорости вращения пары трения до 600 мин^{-1} , т.е. в 1,2 раза, происходит возрастание \bar{E}_{ms} в 1,5 раза ($\bar{E}_{ms6} = 57953,1588 \text{ мВ}^2\text{с}$). При этом дисперсия увеличивается в 2,29 раза, а стандартное отклонение в 1,51 раза. Увеличение скорости вращения в 1,4 раза, т.е. до 700 мин^{-1} , приводит к возрастанию \bar{E}_{ms} в 2,51 раза ($\bar{E}_{ms7} = 97193,6086 \text{ мВ}^2\text{с}$), а дисперсии и стандартного отклонения, соответственно, в 6,25 раза и 2,5 раза. Дальнейшее возрастание скорости вращения пары трения до 800 мин^{-1} , т.е. возрастании в 1,6 раза, приводит к увеличению \bar{E}_{ms} в 3,69 раза ($\bar{E}_{ms8} = 142494,0344 \text{ мВ}^2\text{с}$). При этом дисперсия и стандартное отклонение увеличиваются, соответственно, в 13,43 раз и 3,66 раз.

Из полученных результатов видно, что с увеличением скорости вращения пары трения отношения возрастания суммарной и усредненной энергий практически совпадают. Однако в отношениях возрастания стандартных отклонений и дисперсий для медиан усредненной и суммарной энергий результирующих сигналов АЭ наблюдаются различия. Для суммарных энергий они больше, чем для усредненных энергий регистрируемого акустического излучения. В тоже время, следует отметить, что возрастание дисперсий для медиан суммарной энергии АЭ с увеличением скорости вращения пары трения значительно превосходят их величины для медиан усредненной энергии результирующих сигналов АЭ, что характеризует большую их чувствительность к процессам, развивающимся в поверхностных слоях материалов исследуемой пары трения.

Зависимости изменения значений медиан усредненной и суммарной энергий, их дисперсий и стандартного отклонения при увеличении скорости вращения пары трения показаны на рис. 4 и рис. 5. Из рис. 4 и рис. 5 видно, что полученные зависимости имеют нелинейный характер возрастания. Анализ полученных данных показал, что зависимости изменения медиан

усредненной и суммарной энергий результирующих сигналов АЭ, а так же их дисперсий и стандартного отклонения хорошо описываются степенной функцией вида

$$P = av^b, \quad (3)$$

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

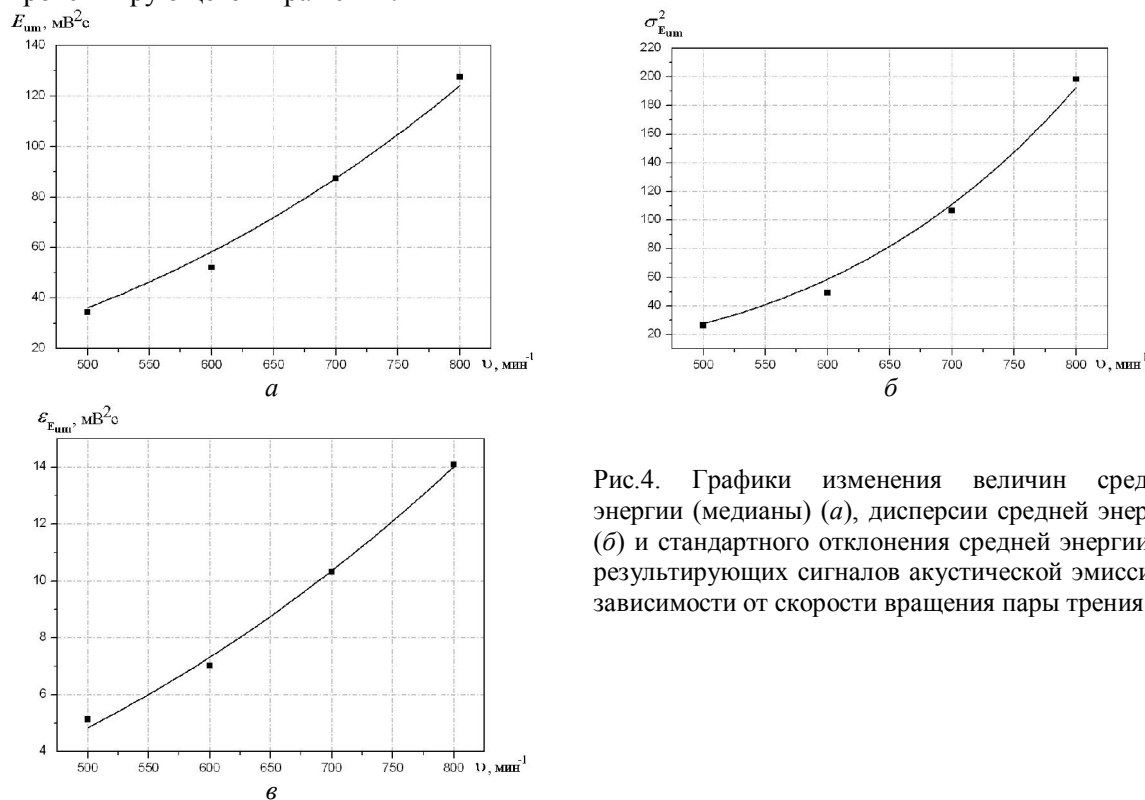


Рис.4. Графики изменения величин средней энергии (медианы) (а), дисперсии средней энергий (б) и стандартного отклонения средней энергии (в) результирующих сигналов акустической эмиссии в зависимости от скорости вращения пары трения

Значения коэффициентов a и b аппроксимирующего выражения равны: для медиан усредненной энергии - $a = 3,056 \cdot 10^{-6}$, $b = 2,62$; для дисперсии медиан усредненной энергии - $a = 2,0 \cdot 10^{-10}$, $b = 4,11$; для стандартного отклонения медиан усредненной энергии - $a = 3,9 \cdot 10^{-6}$, $b = 2,26$; для медиан суммарной энергии - $a = 0,0004$, $b = 2,93$; для дисперсии медиан суммарной энергии - $a = 3,4 \cdot 10^{-8}$, $b = 5,87$; для стандартного отклонения медиан суммарной энергии - $a = 0,0002$, $b = 2,9$. При этом полученные зависимости (рис. 4, рис. 5) описываются выражением (3) с вероятностью p , значение которой составляет: для медиан усредненной энергии - $p = 0,98913$; для дисперсии медиан усредненной энергии - $p = 0,99179$; для стандартного отклонения медиан усредненной энергии - $p = 0,99602$; для медиан суммарной энергии - $p = 0,99693$; для дисперсии медиан суммарной энергии - $p = 0,99923$; для стандартного отклонения медиан суммарной энергии - $p = 0,99755$.

Выводы

Результаты проведенных исследований показали, что характер изменения усредненных и суммарных энергий результирующих сигналов АЭ во времени при изменении скорости вращения пары трения и заданной осевой нагрузке подобен. Регистрируемые сигналы АЭ имеют сильно изрезанную форму. Статистический анализ полученных данных показал, что распределения усредненных и суммарных энергий на заданной длине выборки и заданных интервалах анализа (равных времени усреднения) с вероятностью 0,95 описываются нормальным законом. С увеличением скорости вращения пары трения происходит возрастание медиан усредненной и суммарной энергий результирующих сигналов АЭ, а так же возрастание значений их дисперсий и стандартных отклонений. В отличие от амплитудных параметров регистрируемых сигналов АЭ, значения которых изменяются по линейным законам, зависимости изменения медиан усредненных и суммарных энергий, их дисперсий и стандартного отклонения с высокой вероятностью описываются степенными функциями.

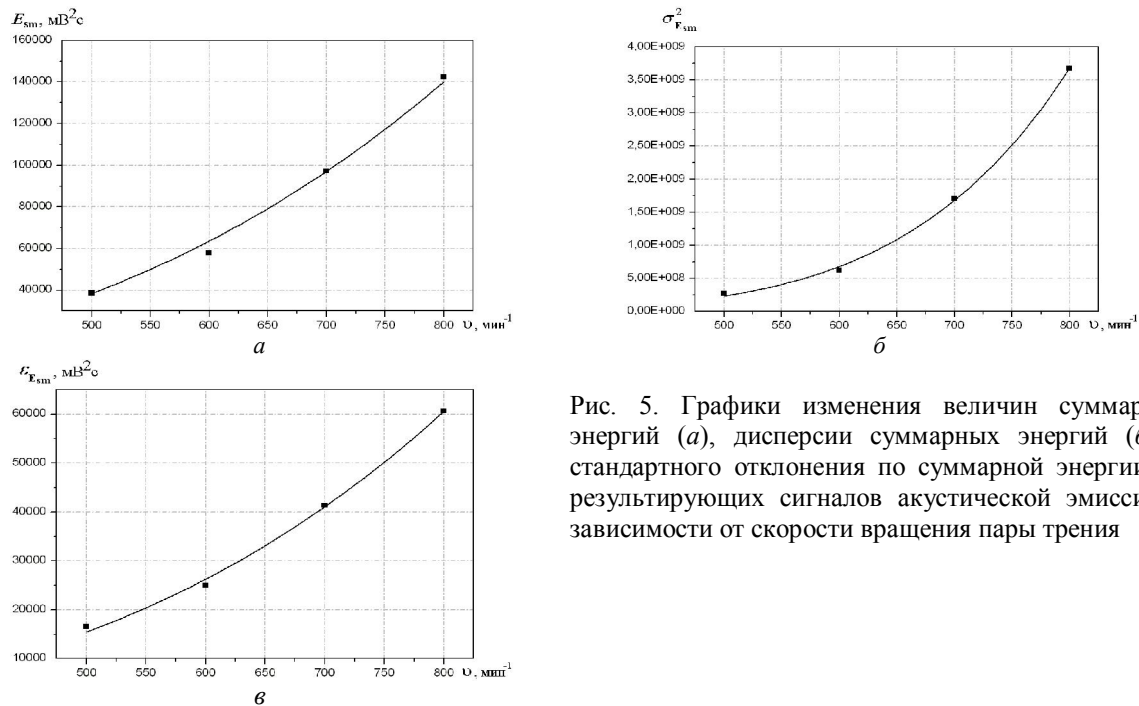


Рис. 5. Графики изменения величин суммарных энергий (а), дисперсии суммарных энергий (б) и стандартного отклонения по суммарной энергии (в) результирующих сигналов акустической эмиссии в зависимости от скорости вращения пары трения

При этом отношения возрастания суммарной и усредненной энергии практически совпадают. Наблюдается возрастание отношений приращения стандартного отклонения для медиан суммарной энергии по сравнению с отношениями приращения стандартного отклонения для медиан усредненной энергии результирующих сигналов АЭ. Однако возрастание дисперсий для медиан суммарной энергии с увеличением скорости вращения пары трения значительно превосходят их величины для медиан усредненной энергии результирующих сигналов АЭ. Это свидетельствует о большей их чувствительности к процессам, развивающимся в поверхностных слоях исследуемой пары трения, и возможности использования данных параметров в качестве информативных параметров. В тоже время, интерес представляют исследования влияния осевой нагрузки на параметры результирующих сигналов АЭ при трении.

Список использованной литературы

1. Benabdallah H. S. Tribological behaviour and acoustic emissions of alumina, silicon nitride and SAE52100 under dry sliding /H. S. Benabdallah, R. J. Boness// J. of Materials Science.-1999.-No34.-P. 4995 – 5004.
2. Mechefske C.K. Using acoustic emission to monitor sliding wear /C.K. Mechefske, G. Sun, J. Sheasby// Insight.-2002.-V.44.-No 8.-P.1-8.
3. Skare T. Wear and frictional behaviour of high strength steel in stamping monitored by AE technique/ T.Skare, F. Krantz// Wear.-2003.-v.255.-P.1471-1479
4. Gitis N. CMP consumables characterization /N. Gitis, M. Vinogradov, S. Kuiry//Proceedings of the Ninth international conference “Chemical-mechanical planarization for ULSI multilevel interconnection” (February 23-25, Fremont, CA, 2005).-P.82-86.
5. Hase A. Acoustic emission in elementary processes of friction an wear: In-situ observation of friction surface and AT signals/ A. Hase, M. Wada, H. Mishina// J. of advanced mechanical desing, items and manufacturing.-2009.-v.3.-No 4.-P.333-344.
6. 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
7. 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
8. Філоненко С.Ф. Модель сигналу аустичної емісії при терті поверхонь композиційних матеріалів /С.Ф. Філоненко, Т.М. Косицка, О.П. Космач //Нукоємні технології.- 2010.-№ 6.- С.79-86.
9. Філоненко С.Ф. Модель сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала под действием поперечной силы /С.Ф. Філоненко, В.М. Калита, А.П. Космач, Т.Н. Косицкая // Технологические системы.- 2010.-№ 2 (51).- С.45-53.