

УДК 620.179:534.6

Филоненко С.Ф., Космач А.П.

Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ПАРЫ ТРЕНИЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены результаты моделирования результирующих сигналов акустической эмиссии при трении поверхностей из композиционного материала. Показано, что с возрастанием скорости вращения пары трения происходит возрастание среднего уровня энергии, среднего уровня усредненной энергии акустического излучения, их стандартных отклонений и дисперсий. Определены аппроксимирующие выражения для зависимостей изменения энергетических параметров при возрастании скорости вращения пары трения. Проведено их сравнение с амплитудными параметрами результирующих сигналов акустической эмиссии. Показано, что наиболее чувствительными параметрами являются дисперсии среднего уровня энергии и среднего уровня усредненной энергии акустической эмиссии.

Ключевые слова: энергия акустической эмиссии; композиционный материал; акустическое излучение; пара трения

Постановка проблемы

Результаты исследований фрикционного взаимодействия поверхностей из композиционных материалов (КМ), проводимые в различных странах мира, показывают высокие их трибологические характеристики. Это, в свою очередь, обуславливает все более широкое применение КМ в узлах трения изделий авиационного и космического назначения, транспорта, судостроения и других видах техники.

При исследовании узлов трения из КМ применяются стандартные методы. Однако наибольшее распространение имеют динамические методы, которые используются при исследовании узлов трения с традиционной структурой материалов. Как показывают результаты исследований, традиционные методы чувствительны к макропроцессам, происходящим в поверхностных слоях материалов при трении. При этом информация, получаемая данными методами, является основой в разработке и методов контроля узлов трения, включая и методы их диагностики. В тоже время, наличие широкого спектра КМ, специфика их строения и разрушения при износе требует повышения достоверности методов контроля и диагностики состояния узлов трения из КМ. Получение подобной информации возможно при использовании методов чувствительных к микропроцессам, развивающимся в поверхностных слоях фрикционного контакта. Одним из таких методов является метод акустической эмиссии (АЭ), который приобретает все боль-

шее распространение. Регистрация акустического излучения при фрикционном взаимодействии поверхностных слоев материалов позволяет получать значительные объемы информации о кинетике развития процесса трения. При этом поток и структура АЭ информации видоизменяются в зависимости от изменения условий протекания данного процесса. В тоже время, высокая чувствительность метода АЭ и большие объемы получаемой информации усложняют ее интерпретацию. В первую очередь, это касается получения причинно-следственных связей между параметрами развивающихся процессов или параметрами характеризующими процессы трения и износа и параметрами акустического излучения. Вследствие этого возникают и проблемы в разработке методов контроля и диагностики узлов трения из КМ.

При решении вопросов интерпретации АЭ информации большое значение имеют теоретические исследования, связанные с моделями и моделированием АЭ при трении и износе поверхностных слоев КМ. Такие исследования являются основой в проведении оценок влияния различных факторов на акустическое излучение, а так же в получении закономерностей его изменения, которые следует ожидать в реальном эксперименте.

Анализ последних исследований и публикаций

Исследования узлов трения из КМ охватывают широкий круг вопросов, связанных с оптимизацией выбора материалов взаимодействующих поверхно-



стей, выбором смазывающих веществ, оптимизацией режимов работы узлов трения, а так же разработкой методов их контроля и диагностики состояния. Анализ традиционных характеристик (момент трения, сила трения, коэффициент трения) показывает, что использование КМ во многих случаях приводит к уменьшению коэффициента трения и интенсивности изнашивания поверхностных слоев фрикционного контакта [1-6]. В тоже время, проводимые фрактографические исследования свидетельствуют о различных механизмах разрушения поверхностных слоев фрикционного контакта, включая и хрупкое их разрушение. Подобные виды разрушений значительно ухудшают трибологические свойства пар трения и являются предшественниками начальных этапов перехода к катастрофической стадии износа. Однако фиксация данных этапов в узлах трения с использованием традиционных методов исследований усложняется их не высокой чувствительностью и инерционностью.

Исследования процессов трения и износа проводят с использованием и метода АЭ. Как показывают результаты опубликованных экспериментальных данных, на АЭ влияют различные факторы: нагрузка на пару трения; скорость ее вращения; смазывающие среды; геометрические параметры шероховатости контактируемых поверхностей; их физико-механические характеристики и другие. Акустическое излучение, регистрируемое при работе узлов трения, изготовленных как из материалов с традиционной структурой, так и из КМ, имеет сложный характер [7-13]. Его интерпретация представляет значительные трудности, что усложняет поиск закономерностей изменения параметров АЭ, особенно на стадии нормального изнашивания. Сложность интерпретации АЭ связана со сложностью и теоретических исследований.

Математическая модель и результаты моделирования результирующих сигналов АЭ, формируемых при трении поверхностей фрикционного контакта с учетом скорости их вращения, действия осевой нагрузки, площади поверхностного разрушения, объема материала вступившего в пластическую деформацию, а так же преобладающего разрушения вторичных структур I и II типа, рассмотрены в работах [14-16]. Исследования позволили определить основные закономерности изменения параметров результирующих сигналов АЭ при изменении значений влияющих факторов на стадии нормального изнашивания, а так же при переходе со стадии нормального к стадии катастрофического изнашивания. Теоретические результаты имели хорошее согласование с данными экспериментов [15, 17].

Одной из концепций, как отмечено в работе [18], при построении моделей и исследовании процессов трения КМ может быть концепция FBM (fibre bun-

dle model). Однако большинство работ с использованием данной концепции связано с моделями и моделированием разрушения КМ в условиях растяжения и действия поперечной силы [18-20]. В работе [18] исследован процесс разрушения КМ в условиях растяжения с анализом скорости высвобождения энергии событий АЭ. Было показано, что с приближением к полному разрушению КМ происходит возрастание скорости высвобождения энергии АЭ. Однако в момент времени полного разрушения КМ возникает разрыв функции изменения накопленной энергии событий АЭ, что не позволяет получить аналитическое выражение для модельного сигнала АЭ.

В работах [21-23], рассмотрены модель на основе концепции FBM и результаты моделирования сигналов АЭ, формируемых при разрушении КМ поперечной силой. С учетом кинетики развития процесса разрушения КМ, получено выражение, описывающее данный процесс, а так же выражения для сигнала АЭ. Было показано, что разрушение КМ с заданным количеством элементов приводит к формированию сигнала АЭ, который представляет собой видеоимпульс. При этом определены основные закономерности изменения параметров сигналов АЭ при действии различных факторов – скорости нагружения КМ, его физико-механических характеристик, размеров разрушаемых элементов. Выражение, описывающее импульсный сигнал АЭ при разрушении КМ поперечной силой имеет вид

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

где N_0 – исходное количество разрушаемых элементов; 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 КМ; β – коэффициент пропорциональности; δ_s – параметр, численное значение которого определяется формой одиночного импульса возмущения при разрушении одного элемента КМ (имеет размерность времени).

Выражение (1), как и в случае разрушения вторичных структур I и II типа, можно использовать для анализа результирующего сигнала, формируе-

мого при трении поверхностей из КМ. В данном случае, можно рассматривать некоторую малую (элементарную) и сменную во времени площадку S_T контактного взаимодействия в площади S перекрытия поверхностей пары трения в виде колец или роликов, в пределах которой происходит разрушение заданного количества элементов N_0 с определенными физико-механическими характеристиками и размерами. При этом скорость вращения (обеспечивает смену во времени положения площадки контактного взаимодействия) и осевая нагрузка, приложенная к паре трения, будут задавать пороговое напряжение, при котором начинается разрушение элементов КМ. При таких условиях, можно провести моделирование результирующих сигналов АЭ, формируемых при трении поверхностей из КМ, с учетом влияния различных факторов, одним из которых является скорость вращения пары трения.

Задачи исследования

В работе будут рассмотрены результаты моделирования результирующих сигналов АЭ, формируемых при трении поверхностей из КМ, с изменением скорости вращения пары трения. Будут показаны формы результирующих сигналов АЭ и закономерности изменения энергетических характеристик формируемых сигналов. Будет проведена статистическая обработка энергетических параметров модельных сигналов АЭ и показано, что сигналы являются непрерывными и характеризуются некоторым средним уровнем энергии и определенной величиной ее разброса. При этом с возрастанием скорости вращения пары трения происходит увеличение среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ и величины ее разброса (стандартного отклонения и дисперсии). Будут построены зависимости изменения энергетических характеристик результирующих сигналов АЭ от скорости вращения пары трения, проведено их описание и анализ.

Результаты исследования

Сигнал АЭ при трении поверхностей из КМ, с учетом рассмотренных выше условий и подхода, используемого в описании результирующего сигнала при трении и износе поверхностей фрикционного контакта из традиционных материалов [15], можно представить в виде

$$U_p(t) = \sum_j U_j(t - t_j), \quad (2)$$

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, со-

гласно (1); t_j – момент времени появления j -ого сигнала АЭ; m – количество импульсных сигналов АЭ на длине реализации (времени работы узла трения) T .

В соответствии с (2), результирующий сигнал АЭ представлен в виде суммы импульсных сигналов, которые возникают в последовательные моменты времени t_j при последовательном разрушении элементарных площадок, состоящих из заданного количества элементов N_0 . Смена элементарных площадок контактного взаимодействия задается скоростью вращения узла трения. Момент времени t_j появления импульсных сигналов АЭ можно представить в виде стационарной и случайной составляющих

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

где Δt_j – интервал времени между началом появления последующего и предыдущего импульсного сигнала АЭ; δ – случайная составляющая в моменте времени появления каждого последующего сигнала АЭ.

Введение случайной составляющей δ обусловлено дисперсностью свойств элементов КМ, а так же возможной не стабильностью положения площадки S_T контактного взаимодействия (разрушаемой площадки) в площади S перекрытия поверхностей пары трения (рис. 1).

Проведем моделирование результирующих сигналов АЭ, согласно (2), с учетом (3), с анализом их энергетических характеристик при изменении скорости вращения пары трения из КМ. При моделировании все параметры, входящие в выражения (1), (2) и (3), будут приведены к безразмерным величинам. Моделирование будем проводить в относительных единицах при следующих условиях. Будем считать, что количество элементов на каждой последующей площадке S_T является постоянной величиной, и состоит из N_0 элементов. Значения параметров \tilde{v}_0 , \tilde{r} , \tilde{g} , входящие в выражение (1), примем равными: $\tilde{v}_0 = 100000$; $\tilde{r} = 100\ 00$; $\tilde{g} = 0,1$. Величину \tilde{a} будем изменять от 200 до 600. Шаг приращения \tilde{a} будет равен $\Delta\tilde{a} = 100$. Пороговое напряжение $\tilde{\sigma}_0$ разрушения элементов КМ будет постоянной величиной. Его значение примем равным $\sigma_0 = 0,101941909$. При постоянном значении σ_0 времена начала разрушения элементов КМ для заданных величин \tilde{a} определим по зависимостям изменения эквивалентных напряжений во времени (рис. 2). Зависимости на рис. 2 построены, в соответствии с выражением [21]

$$\sigma(\tilde{t}) = \sigma t (1 - \sigma t) (1 - g\sqrt{\sigma t}), \quad (3)$$

в относительных единицах. Значение времени \tilde{t}_0 начала разрушения элементов КМ при $\tilde{a} = 200$

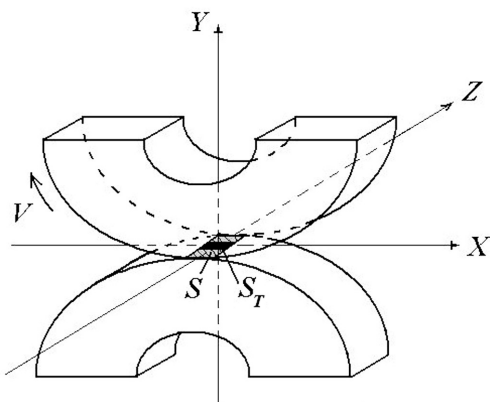


Рис. 1. — Кинематические схемы узлов трения в виде колец с условиями фрикционного контакта: V – скорость вращения пары трения; S – площадь перекрытия поверхностей пары трения; S_T – площадка контакта в площади перекрытия поверхностей пары трения

примем равным $\tilde{t}_0 = 0,0006$. Исходя из проведенных расчетов (рис. 2) времена начала разрушения элементов КМ для других скоростей нагружения при $\tilde{\sigma}_0 = 0,101941909$ равны: для $\tilde{a} = 300 - \tilde{t}_{300} = 0,0004$; для $\tilde{a} = 400 - \tilde{t}_{400} = 0,003$; для $\tilde{a} = 500 - \tilde{t}_{500} = 0,00024$; для $\tilde{a} = 600 - \tilde{t}_{600} = 0,0002$.

Значение интервала времени $\Delta\tilde{t}_j$ между появлением последующего и предыдущего сигналов АЭ (разрушением последующей и предыдущей площадки контактного взаимодействия) для $\tilde{a} = 200$ было принято равным $\Delta\tilde{t}_j = 1,1 \times 10^{-6}$. Данное время, выбрано исходя из длительности сигнала АЭ, формируемого при $\tilde{a} = 200$, которая определена при расчете изменения амплитуды сигнала во времени, согласно (1). Значение для $\tilde{a} = 200$ изменялась в диапазоне величин от $\tilde{\delta} = 0$ до $\tilde{\delta} = 5,0 \times 10^{-7}$ случайным образом. Как показывают расчеты [21], при возрастании происходит уменьшение длительности формируемого импульсного сигнала АЭ. В соответствии с этим, для других значений \tilde{a} величины $\Delta\tilde{t}_j$ и $\tilde{\delta}$ задались пропорционально изменению \tilde{a} .

Моделирование будем проводить в два этапа. На первом этапе будут проведены расчеты изменения амплитуды результирующего сигнала АЭ во времени, согласно (2), для принятых выше условий. На втором этапе, по результатам проведенных расчетов будем определять зависимости изменения энергии и усредненной энергии результирующих сигналов АЭ во времени. На рис. 4 показаны результаты проведенного моделирования в виде зависимостей изменения энергии и усредненной энергии результирующих сигналов АЭ для значений $\tilde{a} = 200$ и $\tilde{a} = 500$. При построении графиков изменения усредненной

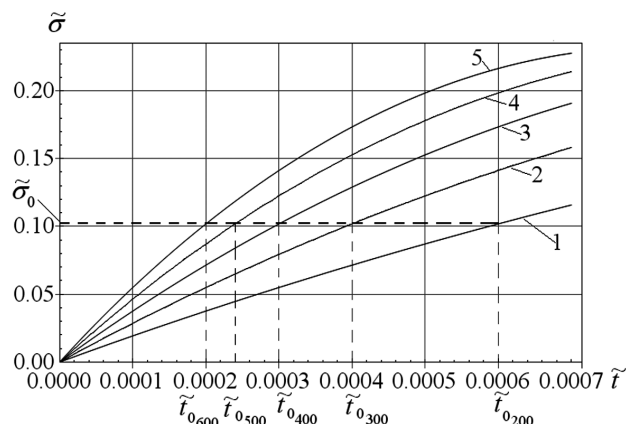


Рис. 3. Зависимость изменения напряжения во времени, согласно (3), для различных значений \tilde{a} : 1 – $\tilde{a} = 200$; 2 – $\tilde{a} = 300$; 3 – $\tilde{a} = 400$; 4 – $\tilde{a} = 500$; $\tilde{a} = 600$. Значение параметра \tilde{g} равно: $\tilde{g} = 0,1$

энергии результирующих сигналов АЭ использовалось усреднение по 10 расчетным значениям энергии.

Обработка результатов проведенного моделирования (рис. 4) показала, что при постоянстве значений параметров, характеризующих физико-механические свойства КМ (\tilde{b}_0, \tilde{r}) и размеры его элементов (\tilde{g}), величины среднего уровня энергии \tilde{E} и среднего уровня усредненной энергии \tilde{E}_c результирующих сигналов АЭ на каждом значении \tilde{a} практически равны между собой. Однако с возрастанием \tilde{a} происходит возрастание их значений. При этом наблюдается возрастание и величин их разбросов. Как показывает обработка полученных данных, при $\tilde{a} = 200$ значения \tilde{E} и \tilde{E}_c равны $\tilde{E} = \tilde{E}_c = 0,00247$, а их стандартные отклонения ($s_{\tilde{E}}, s_{\tilde{E}_c}$) и дисперсии ($s_{\tilde{E}}^2, s_{\tilde{E}_c}^2$) соответственно равны: $s_{\tilde{E}}^2 = 0,00129$; $s_{\tilde{E}}^2 = 1,67 \times 10^{-6}$; $s_{\tilde{E}_c}^2 = 5,49 \times 10^{-4}$; $s_{\tilde{E}_c}^2 = 3,0 \times 10^{-7}$. При возрастании \tilde{a} в 1,5 раза (до 300) значения $\tilde{E}, s_{\tilde{E}}, s_{\tilde{E}_c}, \tilde{E}_c, s_{\tilde{E}_c}$ и $s_{\tilde{E}_c}^2$ увеличиваются, соответственно, в 2,95 раза, 2,1 раза, в 4,2 раза, в 2,95 раза, в 2,1 раза и в 4,3 раза. Такое возрастание наблюдается и с дальнейшим увеличением \tilde{a} , а при $\tilde{a} = 600$ значения величин $\tilde{E}, \tilde{E}_c, s_{\tilde{E}}, s_{\tilde{E}_c}$ и $s_{\tilde{E}_c}^2$ увеличивается, соответственно, в 15,2 раза, в 15,2 раза, в 228,9, в 15,2 раза, в 19,5 раза и в 383,3 раза.

На рис. 5 показаны графики изменения процентного прироста энергетических параметров результирующих сигналов АЭ $\Delta\tilde{Z}_{AE}$ в зависимости от \tilde{a} по отношению к начальным их значениям при $\tilde{a} = 200$.

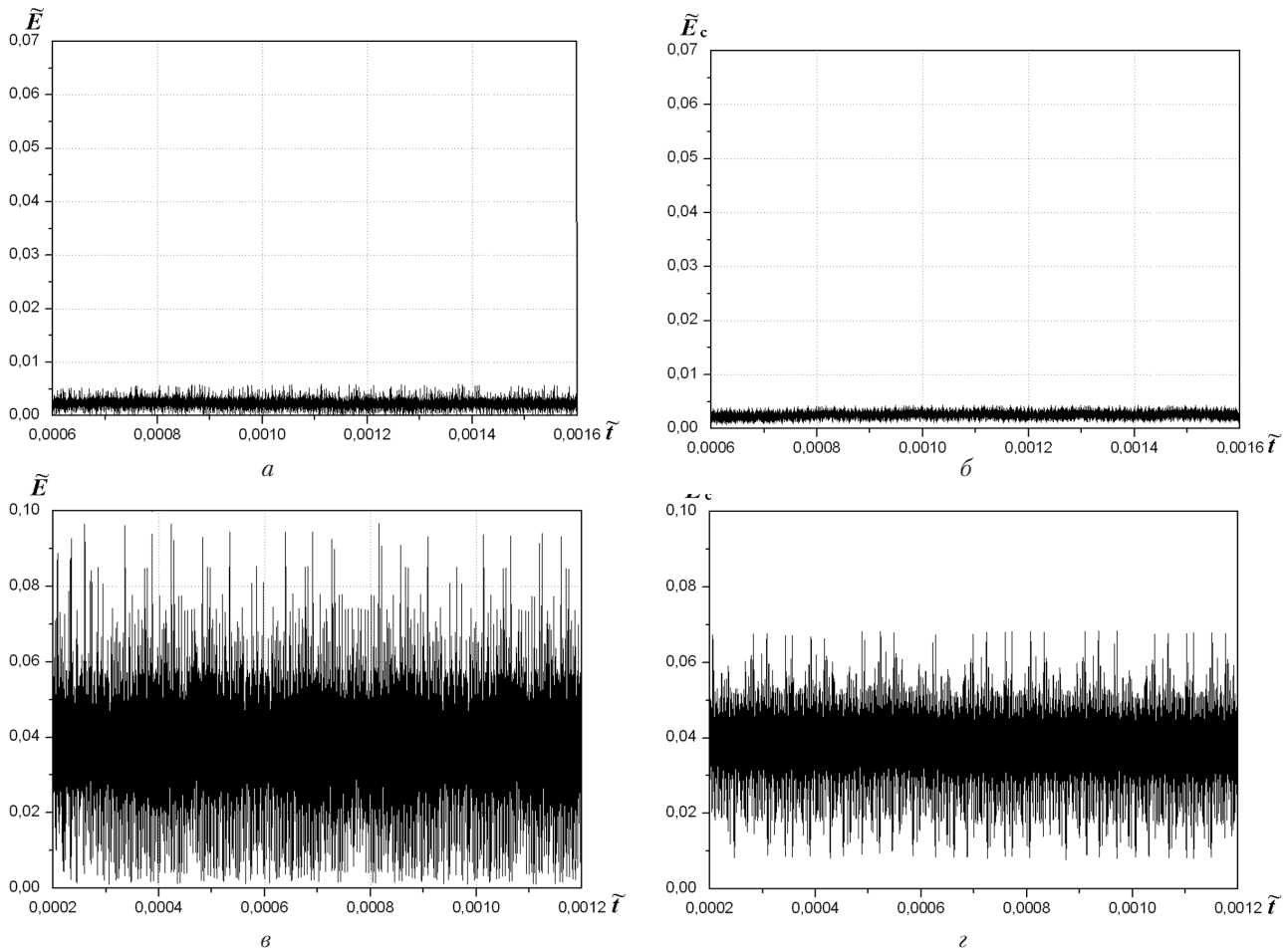


Рис. 4. 4 – Графики изменения энергии (*a, в*) и усредненной энергии (*б, г*) результирующих сигналов акустической эмиссии во времени, согласно (2), при разных значениях $\tilde{\alpha}$: *a, б* – $\tilde{\alpha} = 200$; *в, г* – $\tilde{\alpha} = 600$. Усреднение энергии проведено по 10 расчетным значениям. Параметры моделирования, согласно (1): $\tilde{\nu}_0 = 1000000$; $\tilde{\tau} = 10000$; $\tilde{g} = 0,1$; $\tilde{\sigma}_0 = 0,101941909$

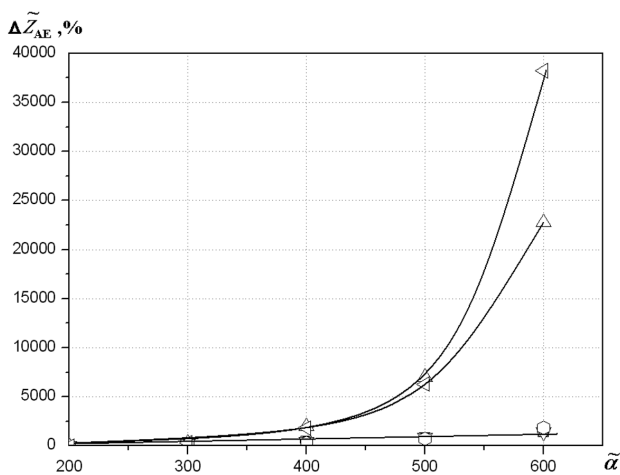


Рис. 5. Графики изменения процентного прироста среднего уровня энергии \bar{E} (\square), его стандартного отклонения $S_{\bar{E}}$ (\circ) и дисперсии $S_{\bar{E}}^2$ (\triangle), среднего уровня усредненной энергии \bar{E}_c (∇), его стандартного отклонения $S_{\bar{E}_c}$ (\circ) и дисперсии $S_{\bar{E}_c}^2$ (\triangleleft) в зависимости от $\tilde{\alpha}$ по отношению к начальным их значениям при $\tilde{\alpha} = 200$

Использование усреднения, т.е. обработка среднего уровня усредненной энергии, его стандартного отклонения и дисперсии, обусловлены следующим. В реальном эксперименте при малом интервале дискретизации входного процесса (малом временном интервале преобразовании аналогового сигнала в цифровые коды) и больших временах регистрации акустического процесса получают значительные объемы данных. Поэтому для предотвращения их потери, возможности хранения, дальнейшей обработки и представления результатов, во многих случаях, используется усреднение входной информации.

Из полученных результатов (рис. 5) видно, что с возрастанием $\tilde{\alpha}$ прирост в процентном отношении среднего уровня энергии \bar{E} результирующих сигналов АЭ и его стандартного отклонения $S_{\bar{E}}$, среднего уровня усредненной энергии \bar{E}_c и его стандартного отклонения $S_{\bar{E}_c}$ при возрастании $\tilde{\alpha}$ практически одинаков. Как показывает обработка полученных данных, зависимости изменения процентного прироста \bar{E} , $S_{\bar{E}}$, \bar{E}_c , $S_{\bar{E}_c}$, и при возрастании $\tilde{\alpha}$ описываются линейными функциями вида

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

где $\Delta \tilde{Z}_{AE}$ – прирост в процентном отношении среднего уровня энергии \tilde{E} результирующих сигналов АЭ и его стандартного отклонения $S_{\tilde{E}}$, среднего уровня усредненной энергии \tilde{E}_C и его стандартного отклонения $S_{\tilde{E}_C}$; A и B – коэффициенты аппроксимирующего выражения.

Анализ полученных данных показал, что коэффициенты аппроксимирующего выражения (4) для анализируемых зависимостей равны: для процентного прироста среднего уровня энергии – $A=-813,2$, $B=3,49$; для процентного прироста стандартного отклонения среднего уровня энергии – $A=-863,6$, $B=3,47$; для процентного прироста среднего уровня усредненной энергии – $A=-813,2$, $B=3,49$; для процентного прироста стандартного отклонения среднего уровня усредненной энергии – $A=-118,0$, $B=4,29$. При этом коэффициенты корреляции для процентного прироста среднего уровня энергии, его стандартного отклонения, среднего уровня усредненной энергии и его стандартного отклонения, соответственно, равны: $R=0,9771$; $R=0,9552$; $R=0,9774$; $R=0,9358$.

В тоже время, прирост в процентном отношении дисперсии $S_{\tilde{E}}^2$ среднего уровня энергии \tilde{E} и дисперсии $S_{\tilde{E}_C}^2$ среднего уровня усредненной энергии \tilde{E}_C результирующих сигналов АЭ носит не линейный характер (рис. 5). Как показывает обработка полученных данных, зависимости изменения процентного прироста $S_{\tilde{E}}^2$ и $S_{\tilde{E}_C}^2$ при возрастании $\tilde{\alpha}$ описываются не линейными функциями вида

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

где $\Delta \tilde{Z}_{AE}$ – прирост в процентном отношении дисперсии $S_{\tilde{E}}^2$ среднего уровня энергии \tilde{E} и дисперсии $S_{\tilde{E}_C}^2$ среднего уровня усредненной энергии \tilde{E}_C результирующих сигналов АЭ; a и b – коэффициенты аппроксимирующего выражения.

Анализ полученных данных показал, что коэффициенты аппроксимирующего выражения (5) для анализируемых зависимостей равны: для процентного прироста дисперсии среднего уровня энергии – $a=8,96 \times 10^{-14}$, $b=6,26$; для процентного прироста дисперсии среднего уровня усредненной энергии $a=2,08 \times 10^{-22}$, $b=9,45$. При этом коэффициенты корреляции для процентного прироста дисперсии среднего уровня энергии и дисперсии среднего уровня усредненной энергии результирующих сигналов АЭ, соответственно, равны: $R=0,9998$; $R=0,9987$.

В тоже время, результаты моделирования показывают, что прирост амплитудных параметров (среднего уровня амплитуды \tilde{U} , его стандартного отклонения $S_{\tilde{U}}$ и дисперсии $S_{\tilde{U}}^2$) при возрастании $\tilde{\alpha}$ значительно

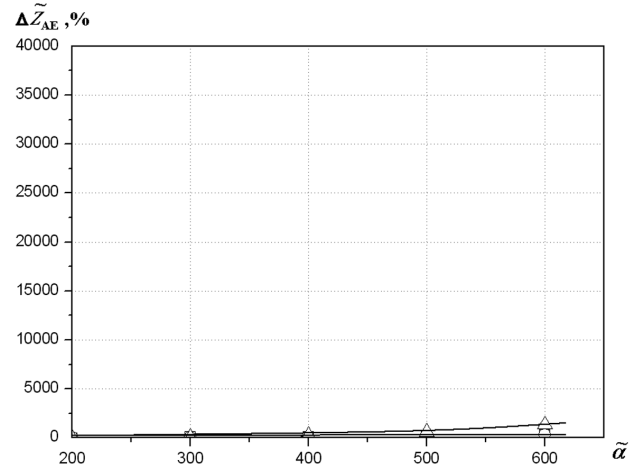


Рис. 6. Графики изменения процентного прироста среднего уровня амплитуды \tilde{U} (\square), его стандартного отклонения $S_{\tilde{U}}$ (\circ) и дисперсии в зависимости от по отношению к начальным их значениям при $\tilde{\alpha} = 200$

меньше, чем прирост энергетических параметров результирующих сигналов АЭ. На рис. 6 показаны графики изменения процентного прироста амплитудных параметров результирующих сигналов АЭ $\Delta \tilde{Z}_{AE}$ в зависимости от $\tilde{\alpha}$ по отношению к начальным их значениям при $\tilde{\alpha} = 200$.

Как показывает обработка полученных данных (рис. 6), зависимости изменения процентного прироста \tilde{U} и $S_{\tilde{U}}$ при возрастании $\tilde{\alpha}$ описываются выражением (4). При этом коэффициенты аппроксимирующего выражения (4) для анализируемых зависимостей равны: для процентного прироста среднего уровня амплитуды – $A=-143,1$, $B=0,72$; для процентного прироста стандартного отклонения среднего уровня амплитуды – $A=-166,6$, $B=0,71$. Коэффициенты корреляции для процентного прироста среднего уровня амплитуды результирующих сигналов АЭ и стандартного его отклонения, соответственно, равны: $R=0,9993$; $R=0,9887$.

Зависимость изменения процентного прироста $S_{\tilde{U}}^2$ при возрастании $\tilde{\alpha}$ описываются выражением (5). При этом коэффициенты аппроксимирующего выражения (5) для дисперсии среднего уровня амплитуды результирующих сигналов АЭ: $a=1,05 \times 10^{-8}$, $b=4,0$. Коэффициент корреляции для процентного прироста дисперсии среднего уровня амплитуды равен $R=0,9992$.

Полученные результаты (рис. 5, рис. 6) показывают, что скорость изменения процентного прироста амплитудных параметров результирующих сигналов АЭ при возрастании $\tilde{\alpha}$ значительно ниже, чем скорость изменения процентного прироста их энергетических параметров. Так, при $\tilde{\alpha} = 600$, по отноше-

нию к $\tilde{a} = 200$, процентный прирост \tilde{E} и \tilde{E}_c в 4 раза больше, чем процентный прирост \tilde{U} . При этом процентный прирост $S_{\tilde{E}}$ и $S_{\tilde{E}_c}$, соответственно, в 5 и 6,6 раз больше, чем $S_{\tilde{U}}$. Процентный прирост $S_{\tilde{E}}^2$ и $S_{\tilde{E}_c}^2$, соответственно, в 16,9 и 28,4 раз больше, чем процентный прирост $S_{\tilde{U}}^2$. Как видно, наибольший прирост наблюдается в дисперсии энергетических параметров результирующих сигналов АЭ. Другими словами дисперсии среднего уровня энергии и среднего уровня усредненной энергии результирующих сигналов АЭ являются наиболее чувствительными параметрами к скорости изменения вращения пары трения из КМ.

Выводы

Результаты моделирования акустического излучения показывают, что при трении поверхностей КМ формируется непрерывный сигнал АЭ. Такой сигнал АЭ можно характеризовать средним уровнем энергии или средним уровнем усредненной энергии и величинами их разброса (стандартного отклонения и дисперсии). Моделирование показало, что увеличение скорости вращения поверхностей фрикционного контакта из КМ приводит к возрастанию среднего уровня энергии и среднего уровня усредненной энергии акустического излучения, а также величин их стандартных отклонений и дисперсий.

Проведена статистическая обработка полученных данных с аппроксимацией зависимостей изменения энергетических параметров результирующих сигналов АЭ. Определено, что зависимости изменения процентного прироста среднего уровня энергии, среднего уровня усредненной энергии и их стандартных отклонений при возрастании скорости вращения пары трения хорошо описываются линейными функциями. В тоже время, зависимости изменения процентного прироста дисперсии среднего уровня энергии и дисперсии среднего уровня усредненной энергии с возрастанием скорости вращения описываются степенными функциями.

Анализ результатов моделирования так же показывает, что скорость изменения процентного прироста амплитудных параметров результирующих сигналов АЭ при возрастании скорости вращения пары трения значительно ниже, чем скорость изменения процентного прироста их энергетических параметров. При этом наиболее чувствительными параметрами к изменению скорости вращения пары трения из КМ, т.е. параметрами, которые имеют наибольший прирост своих значений, являются дисперсии среднего уровня энергии и среднего уровня усредненной энергии результирующих сигналов АЭ. Это означает, что в реальном эксперименте при возрастании скорости вращения пары трения следует контролировать изменение

энергетических параметров регистрируемых сигналов АЭ. В тоже время, интерес представляет исследование влияния осевой нагрузки, приложенной к паре трения, на закономерности изменения энергетических параметров результирующих сигналов АЭ.

Литература

- [1] Threrujirapapong T. Friction and wear behavior of titanium matrix composite reinforced with carbon nanotubes under dry conditions/ T. Threrujirapapong, K. Kondoh, J. Umeda, H. Imai// Transactions of JWRI. — 2008. — v.37. — No2. — P. 51–56.
- [2] Terajima T. Tribological properties of WC/12Co cermet — Fe-Based metallic glass spray coating/ T. Terajima, F. Takeuchi, K. Nakata, S. Adachi, K. Nakashima, T. Igarashi// Transactions of JWRI. — 2009. — v. 38. — No1. — P. 75–79.
- [3] Il-Young Kima. Friction and wear characteristics of the carbon nanotube–aluminum composites with different manufacturing conditions/Il-Young Kima, Jung-Hee Leea, Gyu-Sun Leea, Seung-Hyun Baika, Young-Jig Kimb, Young-Ze Leea// Wear. — 2009. — v. 267. — P. 593–598
- [4] Nuruzzaman D. M. Experimental Study on Durability and Tribological Properties of HVOF Sprayed WC Cermet Coatings/D. M. Nuruzzaman, A. Nakajima, T. Mawatari, M. A. Chowdhury// J. of Advanced Research in Mechanical Engineering. — 2010. — v. 1. — No4. — P. 203–209.
- [5] Umanath K. Friction and wear behavior of Al6061alloy (SiCP +Al2O3P) hybrid composites /K. Umanath , S.T. Selvamani, K. Palanikumar// International Journal of Engineering Science and Technology. — 2011. — v. 3. — No. 7. — P. 5441–5451.
- [6] Bria V. Tribological and Wear Properties of Multi-Layered Materials/ V. Bria, D. Dima, G. Andrei, I.-G. Birsan, A. Circiumaru// Tribology in industry. — 2011. — V. 33. — No. 3. — P.104–109
- [7] 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.
- [8] Filonenko S.F. Non-equilibrium self-organization Steel – bronze tribosystem on the basis of the acoustic emission method application /S.F. Filonenko, V.N. Stadnichenko //Aviation. — 2010. — v. 14. — No3. — P. 71–76
- [9] Fan Y. Modeling acoustic emissions generated by sliding friction/Y. Tools Fan, F. Gu, A.Ball//Wear. — 2010. — v. 268 (5–6). P.811–815.
- [10] Wang L. The influence of contact conditions on surface reaction layers formed between steel surfaces lubricated by an aviation oil/L. Wang, R.J.K. Wood// Tribology International. — 2007. — v. 40. — P. 1655–1666
- [11] Polok – Rubinieć M. Comparison of the PVD coatings/M. Polok-Rubinieć, L.A. Dobrzanski, M. Adamiak //Archives of Materials Science and Engineering. — 2009. — V. 38. — No 2. — P. 118–125



- [12] Tillmann W. Development of wear resistant pressing moulds for the production of diamond composites/ W. Tillmann, E. Vogli, M. Gathen, S. Momeni// Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – v. 209. – P. 4268–4273.
- [13] Paku a D. Structure and properties of multicomponent coatings deposited onto sialon tool ceramics/D. Paku a //Archives of Materials Science and Engineering. – 2011. – V. 52. – No 1. – P. 54–60.
- [14] Бабак В.П. Моделі сигналів акустичної емісії при руйнуванні поверхневих шарів пар тертя/В.П. Бабак, С.Ф. Філоненко, В.М. Стадніченко, А.П. Стахова// Проблеми тертя та зношування. – 2007. – Вип. 47. – С. 5–18.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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. – v. 13, N3. – P. 72–77.
- [18] Shcherbakov R. On modeling of geophysical problems: A dissertation for degree of doctor of philosophy/ Robert Shcherbakov. – Cornell university, 2002. – 209 P.
- [19] Kun F. Extensions of Fibre Bundle Models/F. Kun, F. Raischel, R.C. Hidalgo, H.J. Herrmann //Modelling Critical and Catastrophic Phenomena in Geoscience. Lecture Notes in Physics. – 2007.– vol. 705. – P. 57–92.
- [20] 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.
- [21] Filonenko S.F. Destruction of composite material by shear load and formation of acoustic radiation/ S.F. Filonenko, V. Kalita, A. Kosmach //Aviation. – 2012. – v. 16. – No1. – P. 5–13.
- [22] Філоненко С.Ф. Вплив швидкості навантаження на амплітудні та енергетичні параметри сигналів акустичної емісії при руйнуванні композиційних матеріалів поперечною силою /С.Ф. Філоненко, О.П. Космач, Т.М. Косицька // Технологические системы. – 2012. – № 1(58). – С. 46–51.
- [23] Філоненко С.Ф. Закономірності зміни часових параметрів сигналів акустичної емісії при руйнуванні композиційного матеріалу / С.Ф. Філоненко, О.П. Космач // Вісник Чернігівського технологічного університету. – 2012 – №2(57). – С. 114–122.

Filonenko S.F., Kosmach O.P.

National Aviation University, Ukraine, Kiev

SIMULATION OF ACOUSTIC RADIATION AT ALTERATION OF SPEED ROTATION OF FRICTION PAIR FROM COMPOSITE MATERIALS

The outcomes of simulation of resulting acoustic emission signals are reviewed at friction of surfaces from composite material. It is shown, that to ascending of rotation rate of friction pair there is ascending of average level of energy, average level of average energy of acoustic radiation, their standard deviations and dispersions. The approximating expressions for relations of change of energy parameters are determined at ascending rotation rate of friction pair. Their matching with amplitude parameters of resulting acoustic emission signals is conducted. The most sensitive parameters are the dispersions of average level of energy and average level of average energy of acoustic emission.

Keywords: energy of acoustic emission; composite material; acoustic radiation; friction pair

References

- [1] Threrujirapapong T. Friction and wear behavior of titanium matrix composite reinforced with carbon nanotubes under dry conditions / T. Threrujirapapong, K. Kondoh, J. Umeda, H. Imai// Transactions of JWRI.–2008.–v.37.–No2.–P.51–56.
- [2] Terajima T. Tribological properties of WC/12Co cermet-Fe-Based metallic glass spray coating/ T. Terajima, F. Takeuchi, K. Nakata, S. Adachi, K. Nakashima, T. Igarashi // Transactions of JWRI.–2009.–v.38.–No1.–P.75–79.

- [3] Il-Young Kima. Friction and wear characteristics of the carbon nanotube–aluminum composites with different manufacturing conditions / Il-Young Kima, Jung-Hee Leea, Gyu-Sun Leea, Seung-Hyun Baika, Young-Jig Kimb, Young-Ze Leea // *Wear*.—2009.—v.267.—P. 593–598
- [4] Nuruzzaman D. M. Experimental Study on Durability and Tribological Properties of HVOF Sprayed WC Cermet Coatings / D. M. Nuruzzaman, A. Nakajima, T. Mawatari, M. A. Chowdhury // *J. of Advanced Research in Mechanical Engineering*.—2010.—v.1.—No4.—P. 203–209.
- [5] Umanath K. Friction and wear behavior of Al6061alloy (SiCP +Al2O3P) hybrid composites / K. Umanath , S.T. Selvamani, K. Palanikumar // *International Journal of Engineering Science and Technology*.—2011.—v. 3.— No. 7.— P.5441–5451.
- [6] Bria V. Tribological and Wear Properties of Multi-Layered Materials / V. Bria, D. Dima, G. Andrei, I.-G. Birsan, A. Circiumaru // *Tribology in industry*.—2011.—V.33.—No. 3.—P.104–109
- [7] 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 design, items and manufacturing*.—2009.—v.3.—No 4.— P.333–344.
- [8] Filonenko S.F. Non-equilibrium self-organization Steel – bronze tribosystem on the basis of the acoustic emission method application / S.F. Filonenko, V.N. Stadnichenko // *Aviation*.—2010.—v.14.—No3.—P.71–76
- [9] Fan Y. Modeling acoustic emissions generated by sliding friction / Y. Tools Fan, F.Gu, A.Ball // *Wear*.—2010.—v.268 (5–6). P.811–815.
- [10] Wang L. The influence of contact conditions on surface reaction layers formed between steel surfaces lubricated by an aviation oil/L. Wang, R.J.K. Wood // *Tribology International*.—2007.—v.40.—P.1655–1666
- [11] Polok-Rubiniec M. Comparison of the PVD coatings / M. Polok-Rubiniec, L.A. Dobrzanski, M. Adamiak // *Archives of Materials Science and Engineering*.—2009.—V.38.—No 2.—P.118–125.
- [12] Tillmann W. Development of wear resistant pressing moulds for the production of diamond composites / W. Tillmann, E. Vogli, M. Gathen, S. Momeni // *Journal of Materials Processing Technology*.—2009.—v.209.—P.4268–4273
- [13] Paku a D. Structure and properties of multicomponent coatings deposited onto sialon tool ceramics / D. Paku a // *Archives of Materials Science and Engineering*.—2011.—V.52.—No 1.—P.54–60.
- [14] Babak V.P. Modeli signaliv akustichnoyi emisiyi pri rujnuvanni poverkhnevikh shariv par tertya / V. P. Babak, S. F. Filonenko, V. M. Stadnychenko, A. P. Stahova // *Problemi tertya ta znoshuvannya*.— 2007. — v. 47. — P. 5–18.
- [15] 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.
- [16] Filonenko S. F. Design of Acoustic Emission signals AT the change of material volume, entering into a flowage / S. F. Filonenko, A. P. Stahova, V. G. Kravtchenko // *Technological Systems*. — 2008. — № 1(41). — C. 22–27.
- [17] 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. —v. 13, N3. — P. 72–77.
- [18] Shcherbakov R. On modeling of geophysical problems: A dissertation for degree of doctor of philosophy / Robert Shcherbakov. – Cornell university, 2002. – 209 P.
- [19] Kun F. Extensions of Fibre Bundle Models / F. Kun, F. Raischel, R.C. Hidalgo, H.J. Herrmann // *Modelling Critical and Catastrophic Phenomena in Geoscience. Lecture Notes in Physics* – 2007. – vol. 705. – P. 57–92.
- [20] 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.
- [21] Filonenko S. F. Destruction of composite material by shear load and formation of acoustic radiation / S. F. Filonenko, V. Kalita, A. Kosmach // *Aviation*. — 2012. — v. 16. — No1. — P. 5–13.
- [22] Filonenko S. F. The influence of loading speed on the amplitude and energy parameters of acoustic emission signals at destruction of composite materials under shear load / S. F. Filonenko, O. P. Kosmach, T. N. Kositskaya // *Technological Systems*. — 2012. — № 1(58).—C. 46–51.
- [23] Filonenko S. F. Zakonomirnosti zmini chasovikh parametriv signaliv akustichnoyi emisiyi pri ruynuvanni kompozitsiynogo materialu / S. F. Filonenko, O. P. Kosmach // *Visnik Chernigivskogo tekhnologichnogo universitetu*. – 2012 – №2(57). – S. 114–122