

16. Патент на винахід № 91160. Високоточний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірювальної інформації [Текст] / Безвесільна О. М., Подчашинський Ю. О., Шавурський Ю. О. – 25.06.2010 р. по заявці №а2009 06515 від 22.06.2009 р.
17. Патент на винахід № 90985. Калориметричний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірювальної інформації [Текст] / Безвесільна О. М., Шавурський Ю. О., Подчашинський Ю. О., Ільченко А. В. – 10.06.2010 р. По заявці №а 2009 10565 від 19.10.2009 р.

Розглянуто результати дослідження процесів тертя та зношування поверхонь з композиційного матеріалу. Проведено аналіз залежностей зміни процентного приросту аналізованих параметрів та їх чутливість до тертя і зношування поверхонь фрикційного контакту з композиційного матеріалу. Показано, що акустична емісія дозволяє фіксувати стадію, яка передує стадії катастрофічного зносу вузла тертя

Ключові слова: акустична емісія, параметри, сигнал, композит, зношування, тертя, аналіз, приріст, поверхня

Рассмотрены результаты исследования процессов трения и износа поверхностей из композиционного материала. Проведен анализ зависимостей изменения процентного прироста анализируемых параметров и их чувствительность к трению и износу поверхностей фрикционного контакта из композиционного материала. Показано, что акустическая эмиссия позволяет фиксировать стадию, которая предшествует стадии катастрофического износа узла трения

Ключевые слова: акустическая эмиссия, параметры, сигнал, композит, износ, трение, анализ, прирост, поверхность

УДК 620.179:534.6

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ К ИЗНОСУ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

С. Ф. Филоненко

Доктор технических наук, профессор, директор*

E-mail: fils01@mail.ru

Т. В. Нимченко

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра средств технической защиты
информации*

E-mail: fiona54@ukr.net

*Институт информационно-диагностических систем

Национальный авиационный университет
пр. Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03680

1. Введение

Контроль, мониторинг и диагностика узлов трения являются важными проблемами в обеспечении надежности различных технических устройств. Решение данных проблем базируется на результатах исследований процессов трения и износа поверхностей фрикционного контакта. Для получения информации о данных процессах наибольшее распространение имеют традиционные методы. Они позволяют получать зависимости изменения во времени момента трения, коэффициента трения, температуры в зоне контактного взаимодействия и другие характеристики. Однако, как показывают результаты проводимых исследований, традиционные параметры чувствительны к макропроцессам, которые развиваются в поверхностных слоях материалов. При этом резкое изменение данных параметров наблюдается при возникновении необратимого катастрофического износа и задирання узла

трения. Другими словами, инерционность методов измерения традиционных характеристик приводит к запаздыванию в отображении возникновения и развития различных этапов трения и износа.

Для узлов трения из композиционных материалов (КМ) проблема контроля, мониторинга и диагностики усугубляется спецификой их строения и разрушения. Возникновение первых очагов разрушения поверхностных слоев КМ может приводить к возникновению ускоренного лавинообразного процесса, который ведет к катастрофическому разрушению. С данной точки зрения, важным является обнаружение возникновения начальных этапов данных процессов. Для их обнаружения все большее распространение имеет применение не традиционных методов исследований. Одним из таких методов является метод акустической эмиссии (АЭ).

Применение метода АЭ основано на том, что регистрируемое акустическое излучение является отра-

жением внутренних процессов, которые развиваются в поверхностных слоях материалов узла трения. Метод обладает малой инерционностью. При этом изменение параметров развивающихся процессов должно приводить, и приводит к изменению параметров формируемого акустического излучения. Как показывают результаты экспериментальных исследований, метод АЭ позволяет получать значительные объемы информации о процессах трения и износа. Однако интерпретация данной информации представляет значительные сложности, что обусловлено и сложностью физической интерпретации развивающихся процессов. Это усложняет установление взаимосвязей АЭ с параметрами процессов трения и износа, и, как следствие, методов контроля, мониторинга и диагностики узлов трения из КМ. Поэтому интерес представляет определение особенностей и закономерностей акустического излучения на всех стадиях трения и износа поверхностных слоев материалов, включая и стадию, которая предшествует стадии катастрофического разрушения.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

При исследовании процессов трения и износа поверхностных слоев материалов с регистрацией сигналов АЭ проводят совместно с анализом и ряда традиционных характеристик. В опубликованных работах данными характеристиками являются – коэффициент трения, момент трения, работа трения или сила трения. Большинство проведенных исследований связано с анализом процессов трения и износа поверхностей, которые изготовлены из материалов с традиционной структурой [1–4]. При регистрации АЭ, в основном, проводится обработка среднеквадратического значения амплитуды, накопленного числа сигналов, а также спектра амплитуд. В некоторых работах рассматривается и энергия АЭ. Данные характеристики АЭ анализируются в зависимости от параметров нагружения узла трения или отклонения его работы от нормальных условий. При этом исследуется работа узла трения в режиме сухого трения или трения со смазкой. Традиционные характеристики и параметры АЭ, как правило, рассматриваются на стадии нормального износа поверхностных слоев узла трения.

Результаты проведенных исследований показывают, что регистрируемые сигналы АЭ являются непрерывными сигналами с сильно изрезанной формой. Развитие процесса трения и износа поверхностей фрикционного контакта приводит к изменению характера акустического излучения. Наблюдается не только изменение параметров результирующего сигнала АЭ, но величин их разброса. Например, среднего уровня амплитуды и его стандартного отклонения. В большинстве случаев, на акустических диаграммах, по отношению к диаграммам традиционных параметров, фиксируются выбросы амплитуды. Такое изменение АЭ, как отмечают авторы проводимых исследований, свидетельствует о большей чувствительности метода к локальным разрушениям поверхностных слоев материалов. Результаты проведенных исследо-

ваний позволили получить ряд зависимостей, которые связывают параметры АЭ с режимами нагружения узла трения, а так же характеристиками трения и износа поверхностных слоев материалов. Такими параметрами являются: скорость вращения узла трения; осевая нагрузка; коэффициент трения; скорость износа; вязкость смазывающей среды и другие [2, 4, 5]. Практически во всех проведенных экспериментальных исследованиях показано, что возрастание параметров режима нагружения, а так же параметров трения и износа приводит к возрастанию параметров АЭ. Например, среднеквадратического значения амплитуды.

Аналогичные результаты получены при проведении теоретических и экспериментальных исследований процессов трения и износа поверхностных слоев материалов с традиционной структурой, что рассмотрено в работах [6, 7]. В данных работах было показано, что результирующие сигналы АЭ являются непрерывными сигналами с сильно изрезанной формой. С возрастанием скорости вращения пары трения характер изменения результирующих сигналов сохраняется. Однако происходит возрастание среднего уровня амплитуды результирующего АЭ и величины его разброса. Так же была показана взаимосвязь среднего уровня результирующего сигнала АЭ с осевой нагрузкой. При этом теоретические и экспериментальные результаты имеют хорошее согласование между собой.

Экспериментальные исследования АЭ проводят и при трении КМ. Однако в большинстве опубликованных работ АЭ исследуется при скрайбировании поверхностей КМ или композиционных пленок [8–11]. Испытания композиционных материалов с анализом АЭ проводят при условии возрастания нагрузки на индентер и скорости его перемещения. При этом рассматриваются КМ с разным составом компонент. Такие исследования направлены на получение информации о нагрузках на индентер и скоростях его перемещения, при которых происходит образование и развитие трещин в КМ. При этом анализируется влияние толщины и состава КМ на процессы трещинообразования. В тоже время, при анализе трибологических характеристик КМ проводится обработка стандартных параметров, которые регистрируются во времени при работе узла трения с заданной кинематической схемой.

Исследования АЭ проводят при развитии непрерывного износа поверхностей КМ. Однако, работ, которые связаны с данным направлением, в научной литературе встречается мало. При износе поверхностей КМ или композиционных пленок проводится регистрация и обработка сигналов АЭ на всех стадиях трения – на стадии приработки, на стадии нормального износа и на стадии катастрофического износа [12–15]. Результаты проведенных исследований, как и для материалов с традиционной структурой, показывают, что регистрируемые результирующие сигналы АЭ являются непрерывными сигналами. Они имеют сильно изрезанную форму и характеризуются средним уровнем амплитуды и величиной его разброса. На различных стадиях трения износа характер изменения и параметры результирующих сигналов АЭ различаются между собой. Как правило, на стадиях

приработки поверхностей фрикционного контакта из КМ и стадии катастрофического износа фиксируются выбросы или резкое возрастание параметров регистрируемой АЭ. Следует отметить, что результаты только отдельных исследований показывают наличие характерного изменения (скачка) параметров акустического излучения на стадии, которая предшествует стадии катастрофического износа [16]. Поиск взаимосвязей параметров АЭ с параметрами режимов нагружения узла трения из КМ, а так же характеристиками трения и износа поверхностных слоев материалов проводят на стадии нормального износа. При обработке акустического излучения проводится анализе среднеквадратического значения амплитуды АЭ в зависимости от осевой нагрузки на узел трения, длины пути скольжения, скорости вращения узла трения и других параметров. В общем случае, результаты проведенных исследований показывают, что при возрастании параметров режима нагружения, а также параметров трения и износа происходит возрастание среднеквадратического значения амплитуды АЭ. В то же время, отсутствует анализ чувствительности и информативности параметров, характеризующих результирующий сигнал АЭ, по отношению к традиционным характеристикам, используемым для контроля процессов трения и износа КМ.

3. Цель и задачи исследования публикации

Целью исследований является исследование процесса трения и износа поверхностей КМ с регистрацией сигналов АЭ. Задачей исследования является анализ параметров результирующего сигнала АЭ на стадиях нормального и катастрофического износа. Для достижения целей исследования в статье рассмотрены результаты регистрации температуры в зоне трения поверхностей КМ, а также коэффициента трения, проведен анализ зависимостей изменения коэффициента трения, температуры и амплитудно-энергетических параметров АЭ с определением по данным зависимостям времени перехода узла трения к стадии катастрофического износа, проведен анализ зависимостей изменения процентного прироста анализируемых параметров и их чувствительность к трению и износу поверхностей фрикционного контакта из КМ.

4. Исследования процессов трения и износа поверхностей КМ и обработка полученных результатов

Исследования процессов трения и износа поверхностей КМ проводились по конструктивной схеме "диск-диск" на образцах, которые представляли собой цилиндрические втулки. Контактное взаимодействие образцов осуществлялось по торцевым поверхностям втулок (рис. 1, а). Пара трения состояла из двух образцов, которые были изготовлены из стали 30ХГСА и алюминиевого сплава Д16 с твердосплавным покрытием ВК6. Исследуемые образцы имели следующие размеры: внешний диаметр втулки – 28 мм; внутренний диаметр втулки – 20 мм; высота втулки – 22 мм. При проведении испытаний один из

образцов был подвижным, а другой образец был неподвижным.

Испытания пары трения осуществляли на испытательном стенде (рис. 1, б). Испытательный стенд состоит из трех основных элементов: модернизированная испытательная машина СМТ-1 (А, рис. 1, б); компьютерная система управления узлами где: 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 – компьютерная система обработки сигналов акустической эмиссии; 9 – программное математическое обеспечение для обработки сигналов акустической эмиссии; Д1 – электропривод задания скорости вращения подвижного образца; Д2 – электропривод управления механизмом нагружения весового типа испытательной машины (С, рис. 1, б), акусто-эмиссионный диагностический комплекс (В, рис. 1, б). На шпинделе (1, рис.1, б) машины трения СМТ-1 располагается подвижный патрон для установки подвижного образца 2. С противоположной стороны в неподвижном патроне устанавливался второй образец (3, рис. 1, б). На неподвижном образце устанавливался датчик АЭ (6, рис. 1, б). Перед установкой датчика АЭ его поверхность смазывалась акусто-прозрачной смазкой. В зоне поверхности трения исследуемых образцов из КМ установлена термопара 10 (рис. 1, б). Сигнал с термопары поступает на компьютерную систему управления узлами нагружения испытательной машиной (5, рис. 1, б). Скорость вращения подвижного образца задается при помощи электропривода Д1 (рис. 1, б) испытательной машины СМТ-1. Управление скоростью вращения электропривода Д1 осуществляется с использованием компьютерной системы управления 5. Осевая нагрузка на пару трения обеспечивается при помощи нагружения неподвижного образца 3. Она создается с использованием специального механизма весового типа 4 (рис. 1, б). Величина осевой нагрузки задается при помощи электропривода Д2. Управление электроприводом Д2 осуществляется с использованием компьютерной системы управления 5. Измерение коэффициента трения осуществлялось с использованием стандартного метода на основе тензометрических датчиков (11, рис. 1, б). Сигнал с выхода тензометрических датчиков поступал и обрабатывался с использованием компьютерной системы управления узлами нагружения 5. По результатам измерения температуры в зоне фрикционного контакта пары трения из КМ и коэффициента трения компьютерная система управления узлами нагружения позволяет сохранять в виде файловых структур и выводить зависимости изменения данных параметров во времени. Скорость вращения приводного вала испытательной машины СМТ-1 может изменяться в пределах от 75 мин⁻¹ до 1500 мин⁻¹, а осевая нагрузка для кинематической схемы "диск-диск" в пределах от 200 Н до 2000 Н. При испытаниях пар трения из КМ использовалась смазка. В качестве смазывающей среды при проведении экспериментов использовалось масло типа М10Г2К. Расход масла составлял 1,2 л/час.

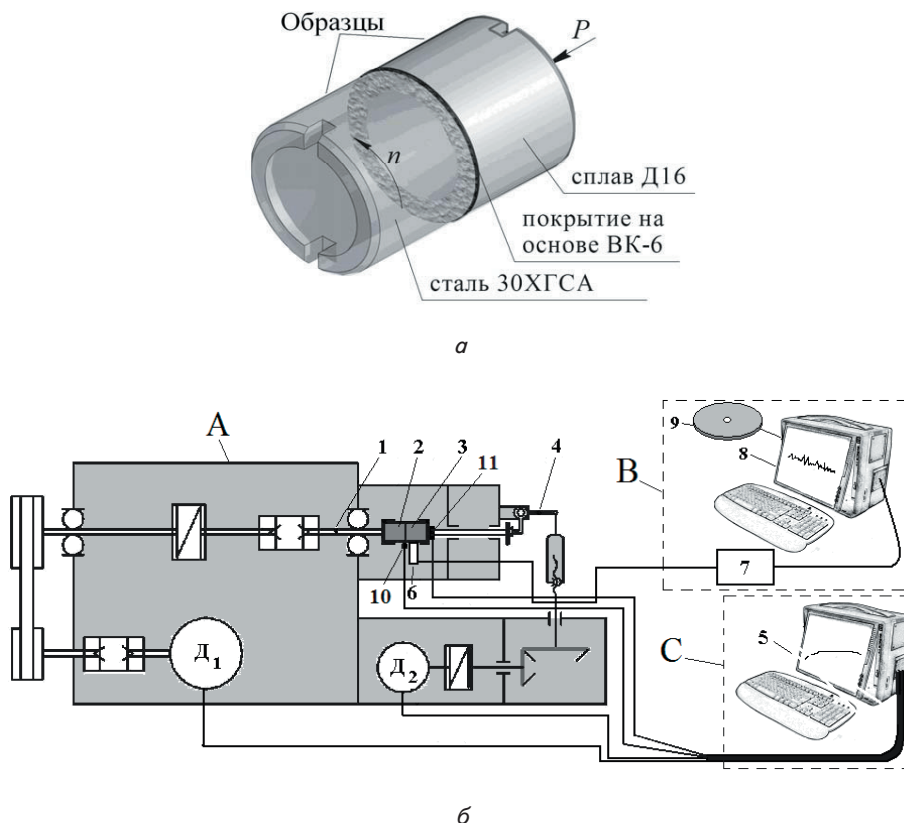


Рис. 1. Схема взаимодействия образцов типа: а – втулки и б – структурная схема стенда для проведения испытаний образцов на износ с регистрацией сигналов акустической эмиссии

В процессе проведения испытаний образцов из КМ на трение и износ проводилась регистрация и обработка сигналов АЭ с использованием акусто-эмиссионного диагностического комплекса (В, рис. 1, б). Сигнал АЭ с выхода датчика АЭ (6, рис. 1, б) усиливался в усилительном тракте (7, рис. 1, б) и поступал в компьютерную систему обработки сигналов АЭ (8, рис. 1, б). После регистрации и обработки сигналов АЭ выполнялась их обработка и анализ с использованием специального программного математического обеспечения (9, рис. 1, б). Программное математическое обеспечение позволяет проводить хранение регистрируемой информации с анализом основных параметров акустического излучения – амплитуды и энергии, усредненной амплитуды и усредненной энергии, суммарной энергии, накопленной энергии и других параметров. По результатам обработки сигналов АЭ проводится вывод данных в виде графических зависимостей изменения параметров АЭ во времени и табличных данных. При этом возможна трансляция полученных данных в форматы математических приложений под Windows. Такая трансляция данных позволяет проводить дальнейшую их обработку с использованием статистического анализа полученной информации.

Экспериментальные исследования трения и износа поверхностей фрикционного контакта из КМ проводили при следующих режимах: скорость вращения – 700 мин⁻¹, осевая нагрузка – 600 Н. Обработку и анализ результатов измерения параметров АЭ, температуры и коэффициента трения проводили после завершения стадии приработки поверхностей фрикционного кон-

такта, т. е. на стадиях стабильного и катастрофического износа. Результаты проведенных исследований в виде зависимостей изменения температуры в зоне фрикционного контакта, коэффициента трения, усредненной амплитуды и энергии результирующего сигнала АЭ, а также его суммарной энергии во времени показаны на рис. 2, 3. При обработке усредненной амплитуды и энергии АЭ интервал усреднения составлял 0,015 мс. При обработке суммарной энергии АЭ интервал суммирования энергии так же составлял 0,015 мс.

Результаты проведенных исследований (рис. 2) показывают, что переход пары трения из КМ со стадии нормального износа (стадия 1) к стадии катастрофического износа (стадия 2), сопровождаются возрастанием коэффициента трения и температуры. Время начала такого возрастания анализируемых параметров начинается: для коэффициента трения (рис. 2, а) – на 1490 с; для температуры (рис. 2, б) – на

1470 с. Как видно, начало возрастания коэффициента трения происходит с запаздыванием, по отношению к началу возрастания температуры. Запаздывание возрастания коэффициента трения по времени происходит на ~ 1,4 % позже начала возрастания температуры. В дальнейшем скорость возрастания температуры превышает скорость возрастания коэффициента трения. Об этом свидетельствует угол наклона кривых полученных зависимостей (рис. 2).

На зависимостях изменения параметров АЭ так же хорошо наблюдается переход со стадии нормального к стадии катастрофического износа (рис. 3). Данный переход сопровождается резким возрастанием усредненной амплитуды (рис. 3, а), усредненной энергии (рис. 3, б) и суммарной энергии (рис. 3, в) результирующего сигнала АЭ.

Время начала такого возрастания усредненной амплитуды, усредненной энергии и суммарной энергии результирующего сигнала АЭ (рис. 3) составляет 1440 с. Как видно, возрастание параметров АЭ происходит с опережением по времени начала возрастания температуры на 2,1 %, а коэффициента трения – на 3,5 %. В тоже время, на зависимостях изменения параметров результирующего сигнала АЭ наблюдается стадия 1', которая предшествует стадии катастрофического износа поверхностей фрикционного контакта.

Как показывает обработка полученных данных, на данной стадии происходит возрастание среднего уровня усредненной амплитуды, среднего уровня

усредненной энергии и среднего уровня суммарной энергии результирующего сигнала АЭ.

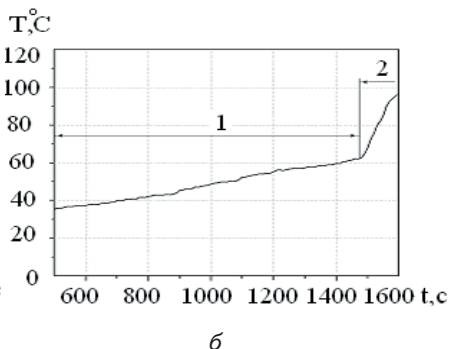
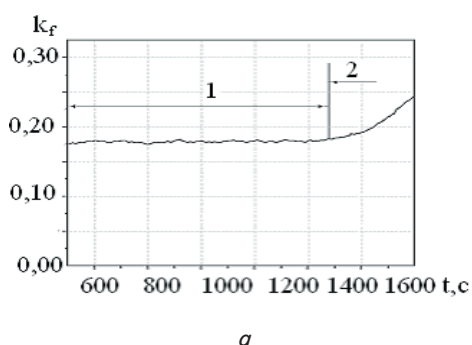


Рис. 2. Зависимости изменения: *а* – коэффициента трения и *б* – температуры при трении поверхностей из КМ. Стадии, которые фиксируются по коэффициенту трения и температуре: 1 – стадия нормального износа; 2 – стадия катастрофического износа

Стадии, которые фиксируются по параметрам результирующего сигнала АЭ: 1 – стадия нормального износа; 1' – стадия, которая предшествует стадии катастрофического износа; 2 – стадия катастрофического износа.

Так, в момент времени испытания узла трения, который равен 1000 с, значения среднего уровня усредненной амплитуды, среднего уровня усредненной энергии и среднего уровня суммарной энергии результирующего сигнала АЭ, соответственно, составляют: 3,72 В; 181,84 мВ²с; 1,95·10⁶ мВ²с. В момент времени испытания узла трения, который равен 1370 с, значения среднего уровня усредненной амплитуды, среднего уровня усредненной энергии и среднего уровня суммарной энергии результирующего сигнала АЭ, соответственно, составляют: 4,53 В; 242,38 мВ²с; 2,93·10⁶ мВ²с. Как видно, в момент времени, который меньше момента времени перехода узла трения к стадии катастрофического износа, возрастание анализируемых параметров, соответственно, происходит: в 1,22 раза; в 1,33 раза и в 1,5 раза. При данных временах возрастание температуры и коэффициента трения, соответственно, происходит: в 1,2 раза и в 1,005 раза. Однако возрастание среднего уровня усредненной амплитуды, среднего уровня усредненной энергии и среднего

уровня суммарной энергии результирующего сигнала АЭ, по отношению к возрастанию температуры, на отрезке времени 1000 с.....1370 с происходит скачкообразно. Другими словами, с возрастанием скорости их изменения, что хорошо наблюдается на зависимостях процентного прироста анализируемых параметров (рис. 4).

На рис. 4 показаны зависимости процентного прироста коэффициента трения, температуры, среднего уровня усредненной амплитуды, среднего уровня усредненной энергии и среднего уровня суммарной энергии результирующего сигнала АЭ во времени. Рассматривается работа узла трения на стадии нормального и стадии катастрофического износа (стадии 1 и 2, рис. 2, 3).

Из полученных результатов видно, что при работе узла трения на стадии нормального износа не наблюдается процентного прироста коэффициента трения (кривая 1, рис. 4). Фиксация перехода узла трения к катастрофической стадии, которая сопровождается возрастанием процентного прироста коэффициента трения, начинается при времени ~ 1490 с.

Зависимость изменения температуры на стадии нормального износа характеризуется постепенным линейным возрастанием ее процентного прироста (кривая 2, рис. 4). Резкое возрастание процентного прироста температуры, по которому фиксируется переход к стадии катастрофического износа, начинается при времени ~ 1470 с.

Зависимости изменения среднего уровня усредненной амплитуды, среднего уровня усредненной энергии и среднего уровня суммарной энергии результирующего сигнала АЭ на стадии нормального износа так же характеризуются практически линейным возрастанием процентного прироста их параметров (кривые 3, 4, 5, рис. 4). Но с момента времени начала стадии, которая предшествует стадии катастрофического износа (стадии 1', рис. 3) возрастание процентного прироста их параметров носит иной характер.

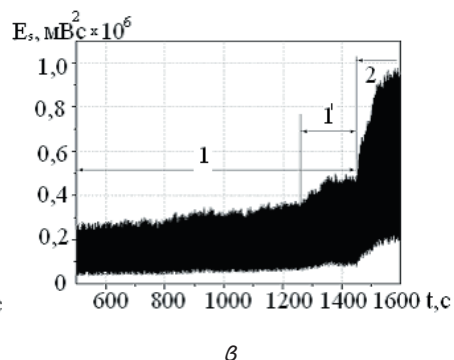
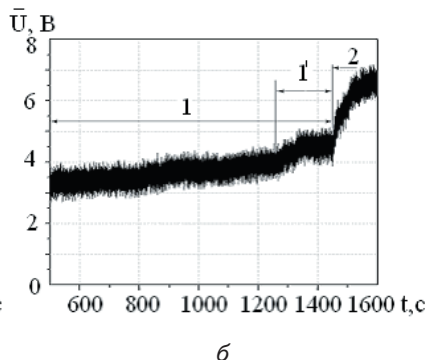
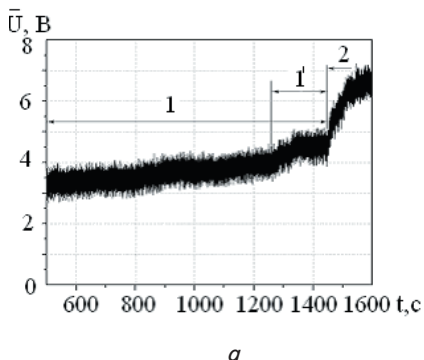


Рис. 3. Зависимости изменения: *а* – усредненной амплитуды; *б* – усредненной энергии; *в* – суммарной энергии результирующего сигнала АЭ при трении поверхностей из КМ

Данная стадия начинается с момента времени ~ 1470 с. С данного момента времени происходит резкое возрастание процентного прироста анализируемых параметров результирующего сигнала АЭ. При подходе к моменту времени, который соответствует переходу узла трения к стадии катастрофического износа, наблюдается стабилизация или отсутствие процентного прироста параметров АЭ. Однако при переходе узла трения к стадии катастрофического износа (стадия 2, рис. 3), которая фиксируется по АЭ, происходит дальнейшее резкое возрастание процентного прироста анализируемых параметров АЭ. Данное возрастание происходит в момент времени ~ 1440 с.

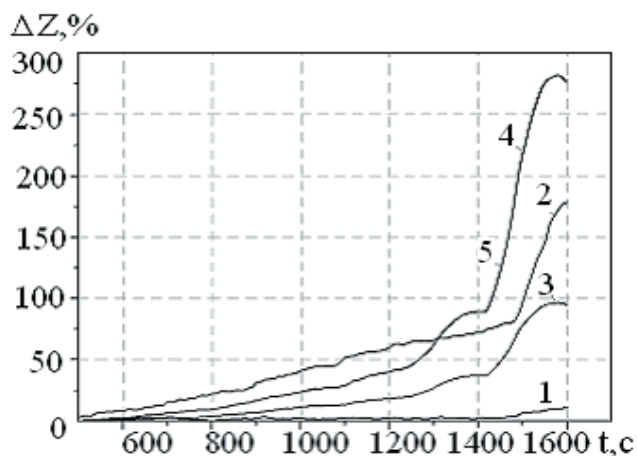


Рис. 4. Зависимости изменения процентного прироста коэффициента трения (1), температуры (2), среднего уровня усредненной амплитуды (3), среднего уровня усредненной энергии (4) и среднего уровня суммарной энергии (5) результирующего сигнала АЭ при трении поверхностей из КМ

Следует отметить, что закономерности изменения процентного прироста среднего уровня усредненной энергии и среднего уровня суммарной энергии (кривые 4 и 5, рис. 4) практически совпадают между собой. В числовом отношении процентные приросты среднего уровня усредненной энергии и среднего уровня суммарной энергии результирующего сигнала АЭ опережают процентный прирост среднего уровня усредненной амплитуды (рис. 4). При этом скачкообразное возрастание амплитудно-энергетических параметров результирующего сигнала АЭ во времени (их процентный прирост) при переходе к стадии катастрофического разрушения значительно опережает во времени процентный прирост температуры и коэффициента трения при переходе к данной стадии.

Полученные результаты показывают, что АЭ является более чувствительной к процессам трения и износа поверхностей фрикционного контакта, по отношению к температуре в зоне трения и коэффициенту трения.

Это обусловлено тем, что АЭ является отображением внутренних локальных процессов разрушения, которые происходят в поверхностных слоях материалов при трении и износе. Результаты проведенных

исследований также показывают, что использование АЭ позволяет определять и стадию, которая предшествует стадии катастрофического износа поверхностей КМ. Другими словами, АЭ позволяет обнаруживать начальные этапы зарождения необратимых процессов, которые ведут к катастрофическому разрушению поверхностных слоев КМ.

5. Выводы

Результаты проведенных исследований показали, что закономерности изменения коэффициента трения, температуры и амплитудно-энергетических параметров АЭ при трении поверхностей КМ различаются между собой. Переход узла трения со стадии нормального к стадии катастрофического износа, который фиксируется по резкому возрастанию анализируемых параметров, определяется в разные моменты времени.

Такой переход по времени при измерении температуры фиксируется на 1,4 % раньше, чем при измерении коэффициента трения. При измерении амплитудно-энергетических параметров АЭ переход к стадии катастрофического износа по времени фиксируется на 2,1 % раньше, чем при измерении температуры, и на 3,5 % раньше, чем при измерении коэффициента трения.

Определено, что на стадии нормального износа не наблюдается процентного прироста коэффициента трения.

На данной стадии процентный прирост температуры возрастает линейным образом. На зависимостях изменения амплитудно-энергетических параметров АЭ выделяется стадия, которая предшествует стадии катастрофического износа. Обработка полученных данных показывает, что зависимости изменения среднего уровня усредненной амплитуды, среднего уровня усредненной энергии и среднего уровня суммарной энергии результирующего сигнала АЭ на стадии нормального износа так же характеризуются практически линейным возрастанием процентного прироста их параметров до момента времени начала стадии, которая предшествует стадии катастрофического износа. Начиная с данного момента времени, происходит резкое возрастание процентного прироста амплитудно-энергетических параметров результирующего сигнала АЭ. Однако в числовом отношении процентные приросты среднего уровня усредненной энергии и среднего уровня суммарной энергии результирующего сигнала АЭ опережают процентный прирост среднего уровня усредненной амплитуды.

Результаты проведенных исследований показывают, что АЭ является более чувствительной к процессам трения и износа поверхностей из КМ, по отношению к температуре в зоне трения и коэффициенту трения.

При этом использование АЭ позволяет определять стадию, которая предшествует стадии катастрофического износа поверхностей КМ, т. е. позволяет обнаруживать начальные этапы зарождения начальных процессов, которые ведут к катастрофическому разрушению поверхностных слоев КМ.

Литература

1. Piatkowska, A. Measurement and analysis of acoustic emission in the tribological system ball-on-disc [Text] / A. Piatkowska, T. Piatkowski // *Diagnostyka*. – 2007. – Vol. 4 (44). – P. 43–48.
2. Hase, A. The relationship between acoustic emissions and wear particles for repeated dry rubbing [Text] / A. Hase, M. Wada, H. Mishina // *Wear*. – 2008. – Vol. 256 (5–6). – P. 831–839.
3. Benabdallah, H. S. Acoustic Emission and Its Relationship with Friction and Wear for Sliding Contact [Text] / H. S. Benabdallah, D.A. Aguilar // *Tribology Transactions*. – 2008. – Vol. 51. – P. 738–747.
4. Raharjo, P. An investigation of surface vibration, airborne sound and acoustic emission characteristics of a journal bearing for early fault detection and diagnosis [Text] / P. Raharjo. – A thesis submitted of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (The University of Huddersfield), 2013. – 234 p.
5. Fan, Y. Modelling acoustic emissions generated by sliding friction [Text] / Y. Fan, F. Gu, A. Ball // *Wear*. – 2010. – Vol. 268 (5–6). – P. 811–815.
6. Filonenko, S. F. Modelling of acoustic emission signals at friction of materials' surface layers [Text] / S. F. Filonenko, V. M. Stadnychenko, A. P. Stahova // *Aviation*. – 2008. – Vol. 12 (3). – P. 87–94.
7. Filonenko, S. F. Definition of contact stress in friction units on the basis of the acoustic emission method [Text] / S. F. Filonenko, V. M. Stadnychenko, A. P. Stahova // *Aviation*. – 2009. – Vol. 13 (3). – P. 72–77.
8. Xu, J. Effect of Cr alloying on friction and wear of sputter-deposited nanocrystalline (MoxCr1–x)5Si3 films [Text] / J. Xu, Z.H. Xie, P. Munroe // *Intermetallics*. – 2011. – Vol. 19 (8). – P. 1146–1156.
9. Guo, J. Zhang Influence of calcination temperature on structure as well as friction and wear behavior of CNx:H films on composite ceramic substrate [Text] / J. Guo, J. Zhang, L. Yu, Z. Wu // *Thin Solid Films*. – 2013. – Vol. 542 (2). – P.60–70.
10. Xu, J. Unraveling the mechanical and tribological properties of a novel Ti5Si3/TiC nanocomposite coating synthesized by a double glow discharge plasma technique [Text] / J. Xu, L. Liu, L. Jiang, P. Munroe, Z.H. Xie // *Ceramics International*. – 2013. – Vol. 39 (8). – P. 9471–9481.
11. Henry, P. Wear mechanisms of titanium and aluminium nitride coatings: A microtribological approach [Text] / P. Henry, M.-J. Pac, C. Rousselot, M.-H. Tuilier // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 223 (25). – P. 79–86.
12. Cao, D. Investigation of acoustic emission and surface treatment to improve tool materials and metal forming process [Text] / D. Cao. – Dissertation Submitted to The School of Engineering of the University of Dayton (Dayton, Ohio), 2010. 116 p.
13. Kang, J. Investigation of a novel rolling contact fatigue/wear competitive life test machine faced to surface coating [Text] / J. Kang, B. Xu, H. Wang, C. Wang // *Tribology International*. – 2013. – Vol. 66. – P. 249–258.
14. Gitis, N. Advanced mechanical testing of thin films and coatings [Text]: Congr`es JFT07 / N. Gitis, C. Dubegny // *Lubrification et tribologie des revetements minces (22-23 mai, 2007, Poitiers, France)*, 2007. – P.1–10.
15. Kalogiannakis, G. Hemelrijck Identification of wear mechanisms of glass/polyester composites by means of acoustic emission [Text] / G. Kalogiannakis, J. Quintelier, P. De Baets, J. Degriek, D. Van // *Wear*. – 2008. – Vol. 264 (3–4). – P. 235–244.
16. Myshkin, N. K. Devices for Tribotests at Micro/Nano Scale [Text] / N. K. Myshkin // *Tribology in industry*. – 2004. – Vol. 26 (3 – 4). – P. 15–20.