

На правах рукописи



БЕЗЕНКИНА Ольга Сергеевна

КИНЕТИКА ИЗНАШИВАНИЯ КЕРАМИК

05.02.04 – трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт – Петербург – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт – Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: - Фадин Юрий Александрович
доктор технических наук , профессор кафедры «Машиноведения и основ конструирования» ФГБОУ ВПО «Санкт – Петербургский государственный политехнический университет»

Официальные оппоненты: - Мусалимов Виктор Михайлович
доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский НИУ Информационных технологий, механики и оптики

- Красный Виктор Адольфович
кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

Ведущая организация: - ООО «Вириал»

Защита состоится « 26 » декабря 2013 года в « 12.00 » часов на заседании диссертационного совета Д 002.075.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем машиноведения РАН по адресу: г. Санкт – Петербург, Большой проспект В. О., 61

С диссертацией можно ознакомиться в диссертационном совете Д002.075.01 ФГБУН Институт проблем машиноведения РАН по адресу: г.Санкт – Петербург, Большой проспект В. О., 61

Автореферат разослан «__» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.075.01,
доктор технических наук



В.В. Дубаренко

Актуальность темы. Количественная оценка износа в процессе трения и без его остановки представляет собой интересную научную и практическую задачу. В научном плане данные о текущем износе могут дать детальную информацию о физических механизмах износа и об изменениях свойств материалов во времени. В практическом плане методика получения этих данных может быть использована для целей мониторинга ответственных узлов машин, (а узлы трения относятся именно к таким деталям) поскольку их отказы происходят по причинам, связанным с состоянием материалов. Для организации обратной связи в таких системах используются сигналы от датчиков, которые характеризуют параметры состояния системы.

Работа в этом направлении только начинается, и она опирается на две группы исследований по изнашиванию, которые были проведены ранее. Это – теоретико - расчетные методы моделирования и прогнозирования износа, в которые большой вклад внесли И. В. Крагельский, Б. И. Костецкий, Ю. Н. Дроздов, В. В. Комбалов, Л. И. Панин, Погодаев, Н. П. Добычин, И. Г. Горячева, Ф. П. Боуден, Д. Тейбор, К. Лудема, и физические методы контроля различных проявлений изнашивания, которые были развиты в работах Д. Г. Громаковского, А. Н. Свириденка, Н. К. Мышкина, Л. В. Марковой, А. Л. Жарина, Е. А. Марченко, Р. Г. Пинчука, В. М. Баранова, Е. М. Кудрявцева, Г. А. Сарычева, В. М. Шавелина, Д. Мба, Д. А. Дорнфельда.

Сказанное выше относится ко всем типам материалов триботехнического назначения. Керамики относятся к перспективным материалам для трибоузлов ввиду таких свойств как: высокая прочность, низкая изнашиваемость, коррозионная стойкость и способность работать при высокой температуре, в агрессивных средах. Следует отметить, что кинетика изнашивания керамических материалов изучена явно недостаточно, однако такой недостаток, как низкая пластичность керамик требует использовать активные средства контроля и непрерывной диагностики в ответственных узлах трения, основанные на принципах обратной связи, которые могут отслеживать критические состояния материалов. Таким образом, актуальными становятся задачи оценки реально изменяющихся свойств керамических материалов в режиме *in – situ*.

Цель работы состояла в изучении закономерностей возникновения акустической эмиссии при трении керамических материалов при разных условиях испытаний. В соответствии с целью работы решались следующие задачи исследования:

1. Осуществление выбора наиболее информативных параметров сигнала акустической эмиссии, возникающей при трении керамик в условиях, наиболее приближенных к реальным условиям эксплуатации керамических материалов

2. Установление связи между параметрами сигнала АЭ и процессами трения в керамических материалах с использованием математического аппарата и современных методов цифровой обработки данных.

Достоверность и убедительность полученных в работе выводов подтверждалась сопоставлением теоретических и экспериментальных данных исследований, достигалась рациональным выбором круга задач, объектов испытаний - керамических материалов и условий исследования с использованием автоматизированных алгоритмов расчета в современных программных средах.

Научная новизна. Впервые установлена связь между массовым износом керамических материалов и спектральными характеристиками акустической эмиссии при коротких и длительных испытаниях в процессе трения.

Положения, выносимые автором на защиту:

1. Метод определения величины массового износа керамических материалов с помощью оценок спектральной плотности мощности сигналов акустической эмиссии
2. Использование разработанной методики для ранней диагностики критических стадии износа керамических материалов
3. Применение разработанной методики для оценки некоторых механических свойств керамических поверхностей.

Научная (практическая) значимость работы состоит в демонстрации возможности мониторинга износа керамических материалов in-situ с помощью методики определения весового износа посредством цифровых методов обработки сигнала АЭ в процессе трения.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV Международном симпозиуме по транспортной триботехнике «ТРАНСТРИБО - 2010» (Санкт – Петербург, 2010 г.), на V Международной конференции «Полимерные композиты в триботехнике. Проблемы создания и применения. Опыт эксплуатации» (Санкт – Петербург, 2012), на международных научно – практических конференциях «Неделя науки СПбГПУ» (Санкт - Петербург 2010, 2011, 2012, 2013 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 статьях в журналах, рекомендованных к размещению публикаций Высшей аттестационной комиссией (ВАК) и 4 тезисах докладов на международных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, списка литературы, включающего 102 наименования. Работа изложена на 100 страницах машинописного текста, содержит 4 таблицы, 53 рисунка. Общий объем диссертации – 109 страниц.

Отдельные главы диссертации поддержаны грантами РФФИ (№№ 10-08-00966-а, 10-0890006-Бел-а)

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель работы и способы ее выполнения, характеризуется научная и практическая ценность данного исследования.

В первой главе приводится анализ работ, посвященных исследованию закономерностей процессов трения керамических материалов. Определяются возможности применения к ним разных методов исследования, в том числе и метода акустической эмиссии. Обсуждаются механизм возникновения повреждений в процессе трения керамических материалов и влияние на него таких факторов как нагрузка, скорость, среда. Рассматриваются особенности возникновения сигналов акустической эмиссии при трении керамик. Приводятся описание современных зарубежных систем извлечения полезной информации акустических сигналов.

В заключение главы определяются цель исследования и детализируются этапы ее достижения.

Во второй главе подробно описываются объекты исследования, раскрываются физико – механические свойства, современные методы получения керамических материалов. Керамики SiC, Si₃N₄, ZrO₂ и Al₂O₃ исследовались в паре с другими керамиками при сухом трении и трении в воде, в паре с электрокорундом (ГОСТ 2424-83) - при исследовании абразивного износа и в паре со сталью 45 (ГОСТ 1050 - 88) и сталью 9ХВГ (ГОСТ 5950 – 51) – при исследовании умеренного износа. Исследования на трение и износ проводились по схеме палец – диск. Образцы из керамик имели форму правильных параллелепипедов с размерами 5x5x50 мм и колец с размерами D = 50 мм; d = 24 мм; S=10 мм. В качестве образца «диск» использовались диски D=100 мм, S=3 мм из стали и диски D=140 мм, S=20 мм из электрокорунда.

Исследования проводились на следующих универсальных трибологических установках, имитирующих условия эксплуатации керамик, приближенные к реальным:

1. трибоустановка для исследования жесткого (абразивного) износа и умеренного износа керамик с нагружением и без (рис. 1);
2. трибоустановка для исследования длительного износа керамик при сухом трении и трении в воде (рис. 2);

Установка (рис. 1) также позволяет проводить опыты на торможение и с нагружением образцов. Начальная скорость торможения может достигать 25 м/с. Максимальная нагрузка на образец - 200 Н. Неподвижный образец имеет форму параллелепипеда, в качестве подвижного используются стальные образцы или абразивные круги.

Установка, изображенная на рис. 2, обеспечивает скорости скольжения до 2 м/с. Можно осуществлять испытания в режимах керамика по керамике, керамика по стали, керамика по абразиву. На этой же установке можно проводить длительные испытания и испытания в воде. Установка позволяет регистрировать момент трения на аналоговом приборе в течении всего времени испытания.

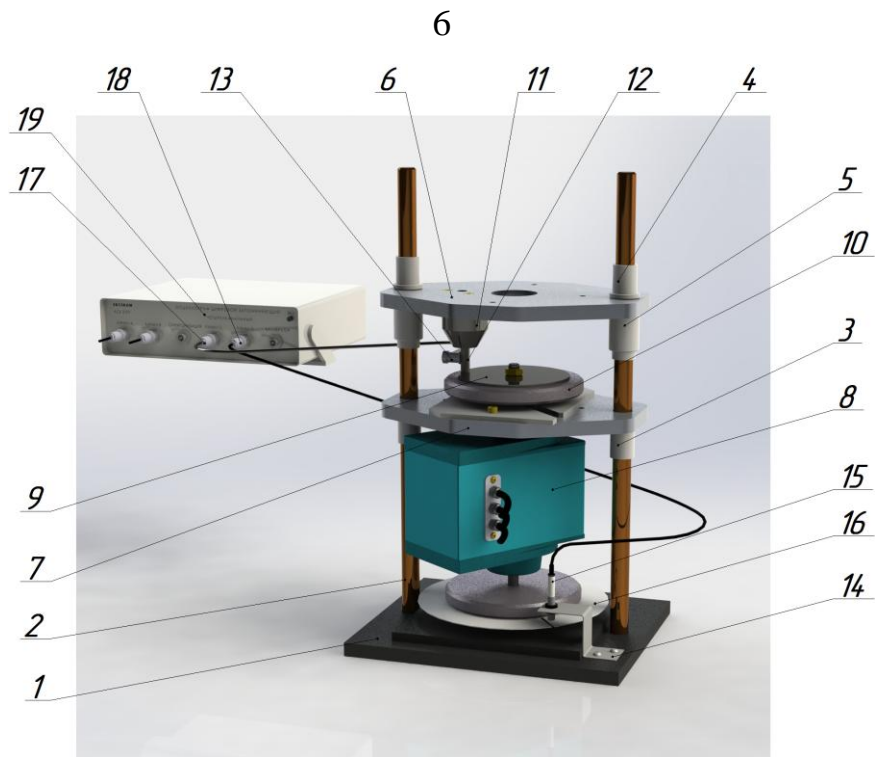


Рис. 1 Инерционная универсальная трибоустановка

1 - основание; 2 – направляющие; 3,4 - втулки; 5 - резьбовые муфты; 6, 7 - верхняя и нижняя траверсы; 8 - двигатель переменного тока; 9 - образец «диск»; 11 - зажимной патрон; 12 - образец «палец»; 13 - пьезодатчик; 16 - диск с отметкой для счета оборотов; 15 - датчик счета оборотов; 17, 18 - разъемы; 19 - цифровой осциллограф

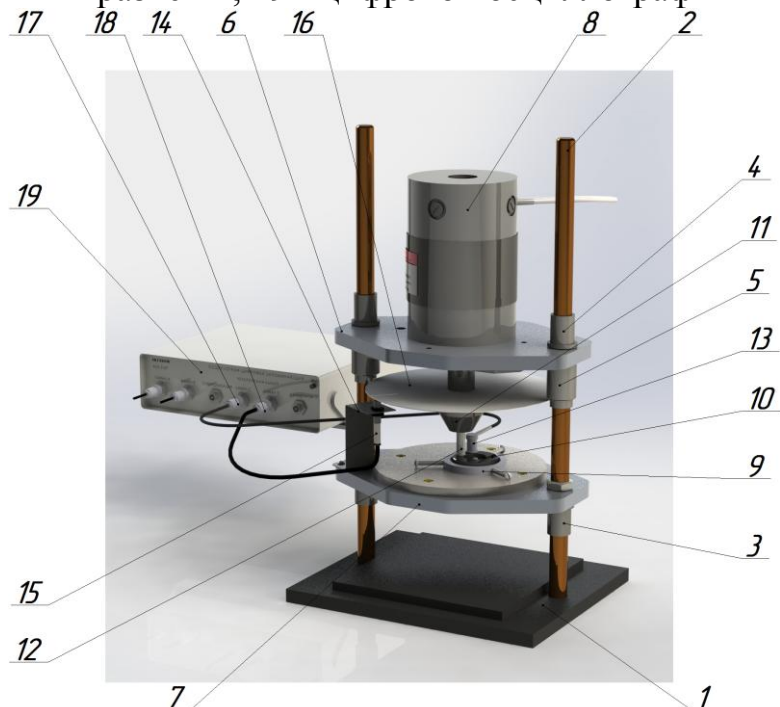


Рис. 2 Универсальная трибоустановка для исследования длительного трения

1 - основание; 2 – направляющие; 3,4 - втулки; 5 - резьбовые муфты; 6, 7 - верхняя и нижняя траверсы; 8 - двигатель постоянного тока; 11 - цанговый зажим; 12 - вращающийся образец «палец»; 9 - винтовой зажим; 10 - неподвижный образец «кольцо»; 13 - пьезодатчик; 16 - диск с отметкой для

счета оборотов; 15 - датчик счета оборотов; 17, 18 - разъемы; 19 - цифровой осциллограф.

В настоящей работе использовалась система регистрации акустической эмиссии, созданная в ИПМаш РАН им. Благонравова (рис. 4). Построенная схема позволяла регистрировать экспериментальные данные двумя способами: один - наиболее общепринятый – с использованием блока фильтрации, второй – принципиально новый, при котором данные с датчика поступали в аналогово – цифровой преобразователь (АЦП) и персональный компьютер (ПК), минуя стадию фильтрации (рис. 3).

Для канала 8 по указанной схеме (рис. 3) сигналы с датчиков поступают в предварительный усилитель (ПУ), в качестве которого используются предварительные усилители от прибора АФ-15 с коэффициентом усиления 40 дБ. Предварительно усиленный сигнал АЭ поступает на усилитель-формирователь (УФ). В качестве УФ также использовались соответствующие блоки от прибора АФ-15. Общее усиление ПП и УФ достигало от 49 до 60 дБ. Субблок УФ предназначен для усиления, частотной фильтрации и преобразования АЭ радиоимпульса в импульсы информативных параметров. В качестве таких импульсов в настоящей установке выбраны импульсы "событие", "амплитуда", "осцилляции".

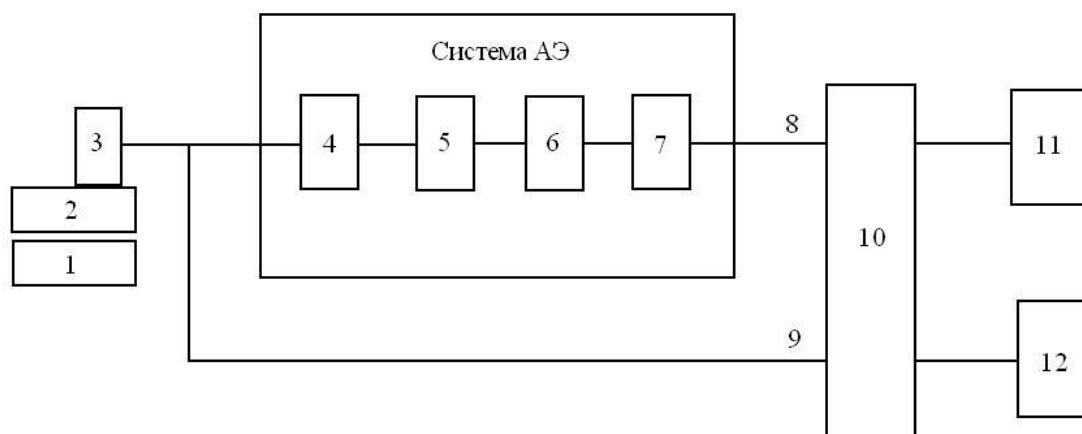


Рис. 3 Схема установки для регистрации акустической эмиссии.

1-подвижный образец, 2-неподвижный образец, 3-пьезопреобразователь, 4-предварительный усилитель, 5-основной усилитель, 6-фильтры, 7- блок обработки, 8-первый канал осциллографа, 9-второй канал осциллографа, 10-осциллограф 3107 «АКТАКОМ», 11-ПК 1, 12-ПК 2

После прихода в вычислительное устройство импульса "событие" определяется время его прихода по внутренним часам, и ему присваивается порядковый номер. Одновременно с этой операцией производится счет осцилляций и оцифровка значения амплитуды. Значение амплитуды записывается в память персонального компьютера ПК1 с учетом коэффициента усиления в виде приведенном ко входу ПУ. Таким образом формируется массив данных на диске ПК1.

Для канала 9 по указанной схеме (рис. 3) сигналы с датчиков поступают в АЦП осциллографа 10 (в случае необходимости сигналы могут быть подвержены стадии предварительного усиления), после чего данные записываются в память ПК2.

Система позволяет сформировать массив данных с помощью специального программного обеспечения выводить сигнал на экран, записывать данные с каждого канала в отдельный файл на диск и выводить данные на печать принтера.

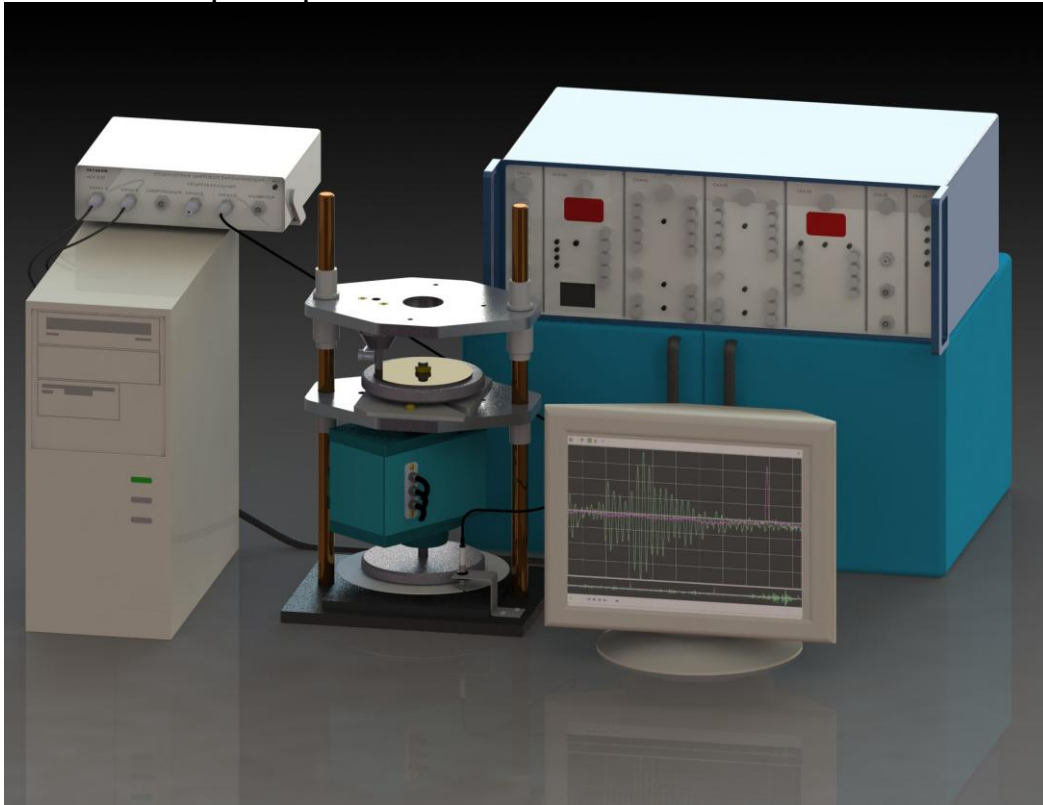


Рис. 4 Система регистрации сигналов АЭ

Оценка износа материалов, которая проводится по сигналам АЭ, поступающим по первому каналу производится следующим образом. Как было показано ранее [1], для случая дискретной АЭ, когда сигналы АЭ не накладываются друг на друга, возможно разделение всего потока АЭ сигналов по их длительности и максимальной амплитуде на сигналы, ответственные за износ и возникающие по другой физической причине. Отбор сигналов по определенному критерию - по амплитуде и длительности позволяет построить процедуру оценки износа материала в реальном времени.

Назначение второго канала в экспериментальной установке следующее. Если сигналы АЭ перекрываются, и эмиссия становится непрерывной, то выделение полезных сигналов по указанным выше принципам становится невозможным. Поэтому предполагается, что применение спектрального анализа к регистрируемому квазинепрерывному сигналу АЭ позволит получить необходимую информацию о процессе износа и его количественной оценке. Также предполагается, что при переходе от

непрерывной к дискретной эмиссии, спектральный метод будет работать, и его результаты будут сопоставимы с результатами первого метода.

В третьей главе приводятся экспериментальные результаты изучения закономерностей протекания процессов изнашивания в керамиках, их связь с параметрами сигналов в случаях дискретной и непрерывной акустической эмиссии. Рассматриваются особенности спектрального анализа квазинепрерывного сигнала АЭ при трении керамик. Приводятся оценки величин износа при разных способах обработки акустоэмиссионных сигналов и их сравнение с реальным весовым износом. В этой же главе рассматриваются примеры применения разработанного подхода оценки износа для решения различных трибологических задач: исследования изнашивания материалов при длительных испытаниях в зависимости от нагрузки, режима трения и среды, ранняя диагностика опасных (критических) состояний, исследование механизмов износа, исследование изнашивания обоих контртел в паре трения, определение механических характеристик поверхностного слоя непосредственно во время работы (например, параметров усталости керамик).

Экспериментальное исследование кинетики изнашивания керамик для пар SiC/SiC, Si₃N₄/Si₃N₄, Al₂O₃/Al₂O₃, ZrO₂/ZrO₂ (рис.5) при сухом трении и скорости скольжения менее 1м/с проводилось по методике [1], основанной на регистрации сигналов АЭ из зоны контакта.

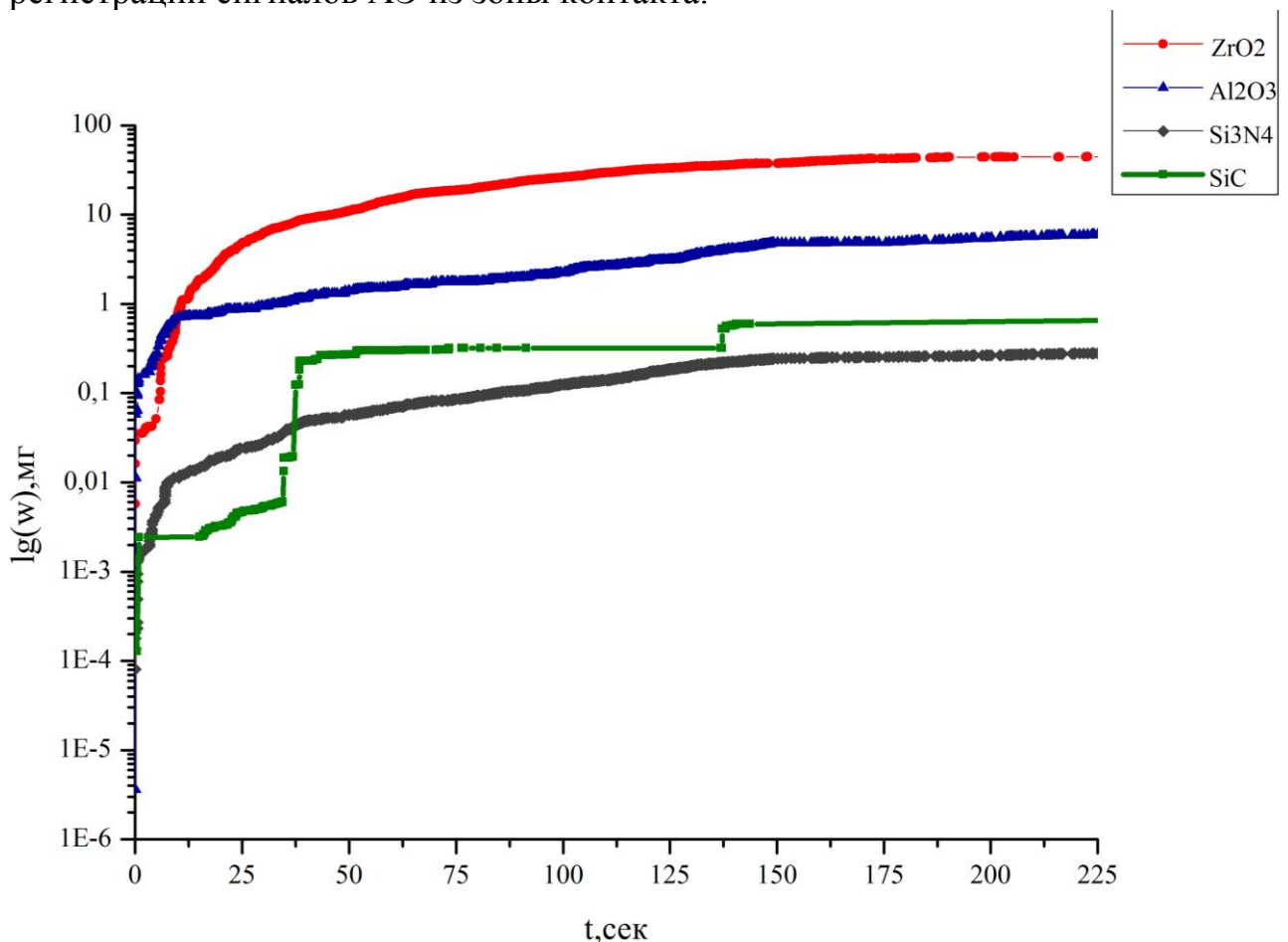


Рис.5. Кинетика изнашивания керамик при сухом трении

Методика позволяет получать вполне приемлемую количественную оценку износа материалов ($\pm 30\%$) без остановки трения. В её основе лежит экспериментально обнаруженная связь между формой сигнала (точнее, суммарной энергией АЭ сигналов определенной формы) и величиной массового износа. Применение этой методики возможно, только при дискретном характере акустической эмиссии, поскольку именно в этом случае, при индивидуальной регистрации каждого сигнала АЭ, возможно их распознавание. В случае квазинепрерывной АЭ эмиссии, когда сигналы АЭ перекрываются, полезная информация для оценки износа может быть извлечена с помощью спектрального анализа.

Математический аппарат спектрального анализа сигналов АЭ заключается в следующем.

Частотный спектр сигнала есть просто его преобразование Фурье. Для сигнала $x(t)$

$$X(f) = F[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (1)$$

Сигнал можно восстановить по его спектру с помощью обратного преобразования Фурье

$$x(t) = F^{-1}[X(f)] = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \exp(-j2\pi ft) df \quad (2)$$

По теореме Парсеваля энергию $x(t)$ можно вычислить двумя способами:

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df \quad (3)$$

Величину

$$\Psi_{xx}(f) = |X(f)|^2 = X(f)X^*(f) = X(f)X(-f) \quad (4)$$

называют энергетическим спектром, ее размерность – энергия сигнала/Гц.

Для успешного применения указанных выше зависимостей использовался метод спектрального анализа, назначение которого – оценка частотного состава случайного сигнала. Одним из таких методов является метод периодограмм, который заключается в вычислении оценки СПМ $\hat{S}(\omega)$ конечной случайной последовательности длины N , которая называется периодограммой.

$$\hat{S}(\omega) = \frac{|X(e^{j\omega T})|^2}{Nf_D}, \quad (5)$$

где $X(e^{j\omega T})$ - спектральная плотность последовательности $x(n)$

Для уменьшения эффекта растекания спектра при вычислении периодограммы с помощью преобразования Фурье и, как следствие, сглаживания периодограммы применяют весовые функции (окна) [2], и видоизмененная периодограмма, называемая модифицированной периодограммой $\hat{S}(\omega)$, принимает вид:

$$\hat{S}(\omega) = \frac{1}{f_d} \frac{|X_w(e^{j\omega T})|^2}{\sum_{n=0}^{N-1} |w(n)|^2}, \quad (6)$$

Где $w(n)$ – весовая функция (окно) длины N ; $X_w(e^{j\omega T})$ – спектральная плотность произведения $x(n)w(n)$:

$$X_w(e^{j\omega T}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)w(n)e^{-j\omega Tn}. \quad (7)$$

Полученная функция периодограммы 6 и 7 измеряется в Вт/Гц. Соответственно функцию периодограммы в дБ/Гц можно получить с помощью [2]:

$$\hat{S}(f) = 10 \lg \hat{S}(f) \quad (8)$$

Среднеквадратичное отклонение (СКО) СПМ совпадает с размерностью оценки СПМ и характеризует интенсивность (усредненную амплитуду) ее осцилляций. Вследствие чего для аддитивной смеси сигнала с шумом метод периодограмм является наиболее информативным, т.к. для диаграммы СКО шумового фона меньше, как правило, и на этом фоне выделить полезный сигнал легче (рис. 6).

Методика оценки износа для квазинепрерывной эмиссии сводилась к следующему. После проведения износных испытаний керамик SiC, Si₃N₄, Al₂O₃ с регистрацией данных АЭ были проанализированы оценки спектральной плотности сигналов акустической эмиссии. Производилась разбивка спектра на частотные интервалы. Оценка спектральной плотности мощности составляющих в каждом интервале сопоставлялись с общим весовым износом. Задача считалась выполненной, если в рассматриваемом интервале степень корреляции с весовым износом составляла более 0,9.

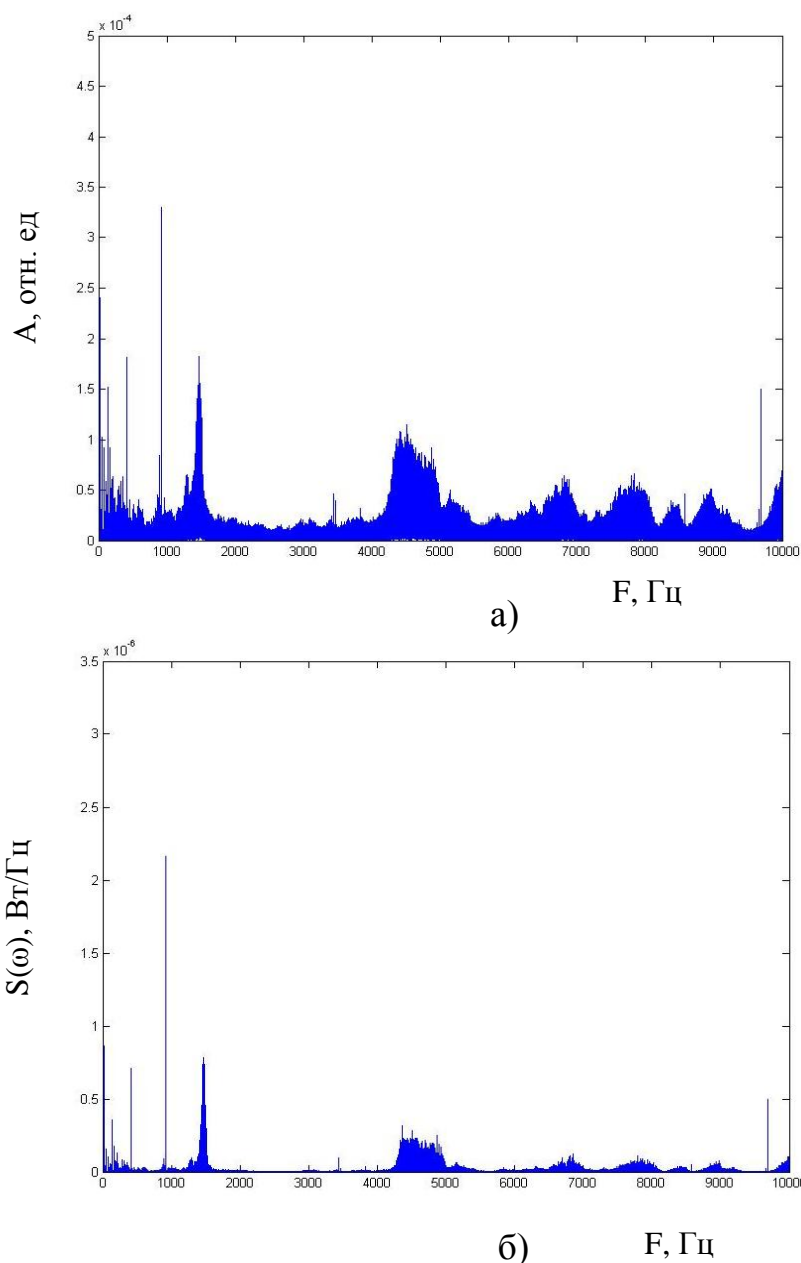


Рис.6. Обработка сигналов АЭ при сухом трении для пары SiC/SiC.

Нагрузка $N=25$ Н, скорость $v=0,5$ м/с.

а) Фурье-преобразование выборки сигнала $x(n)$ (длина выборки $n=1048576$ элементов);

б) Спектральная плотность мощности выборки сигнала $x(n)$

Отладка этой методики проводилась на паре SiC- абразивный диск из Al_2O_3 с размерами зерна $\mu_1=600$ мкм; $\mu_2=200$ мкм на установке для исследования абразивного износа. Абразивные диски с разным размером зерна, за одинаковое время обеспечивают достаточный износ, который может быть выявлен на аналитических весах. На рис. 7 приведены результаты по оценке износа керамик, полученные по данной методике. Весовое соотношение износов составило $\Delta m_1/\Delta m_2=3,5$. Результаты оценки весового износа, полученные с помощью спектрального метода АЭ (рис. 7)

демонстрируют соответствие прямому методу измерений и имеют близкое к полученному значение износа.

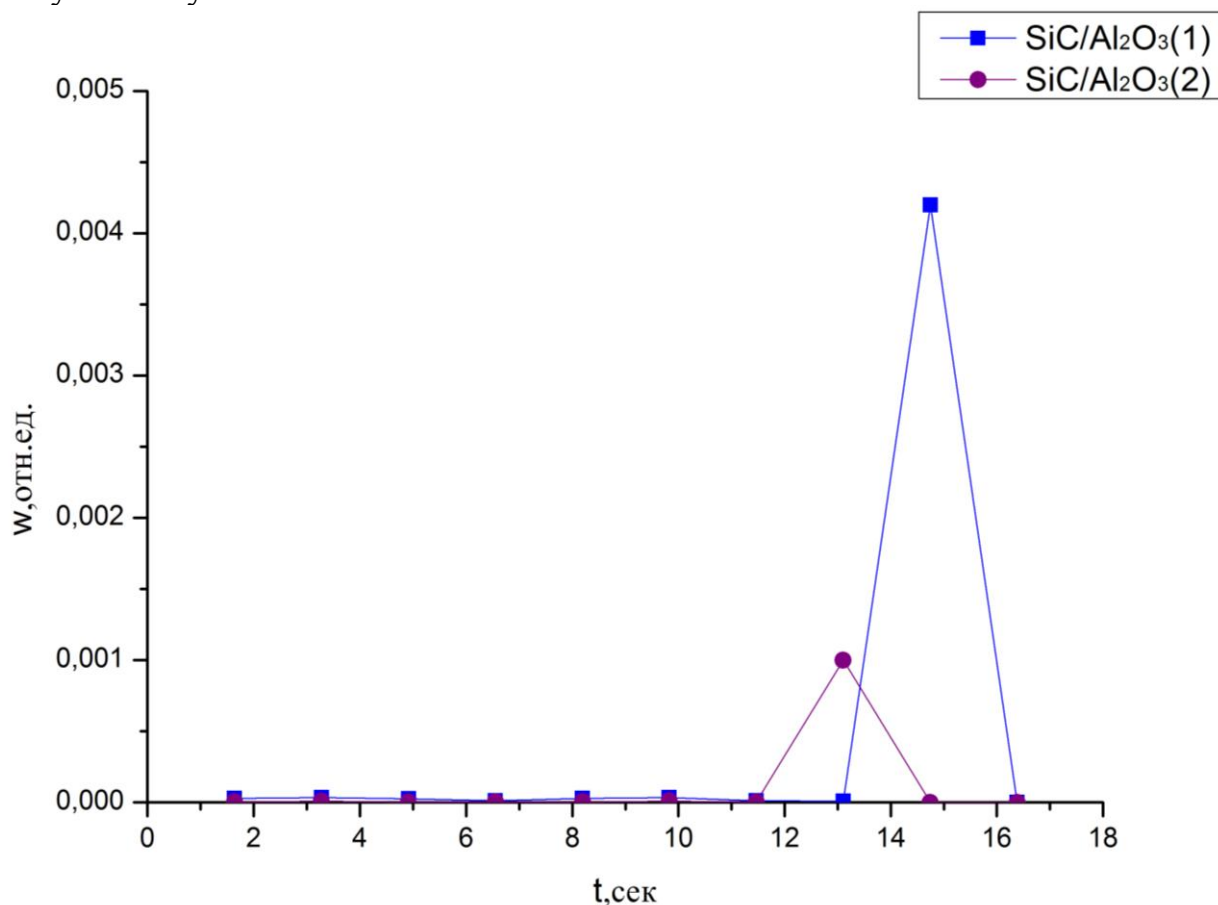


Рис. 7 Результаты оценки износа для пары $\text{SiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$.
Нагрузка $N=25$ Н, скорость $v=9$ м/с (1- размер зерна – 600 мкм; 2- размер зерна - 200 мкм)

Другой пример применения спектральной методики показан на рис.8. Был рассмотрен случай трения пары керамика. SiC – сталь 9ХВГ при двух разных нагрузках 15 и 25 Н. Известно, что такие испытания даже при длительном трении не дают возможность измерить износ, т.к. масса износа лежит в микрограммовой области. Приведенные на рис.8 расчетные оценки имеют разумные величины и можно ожидать, что разрабатываемый метод применим при исследовании кинетики изнашивания, например, в смазочных средах.

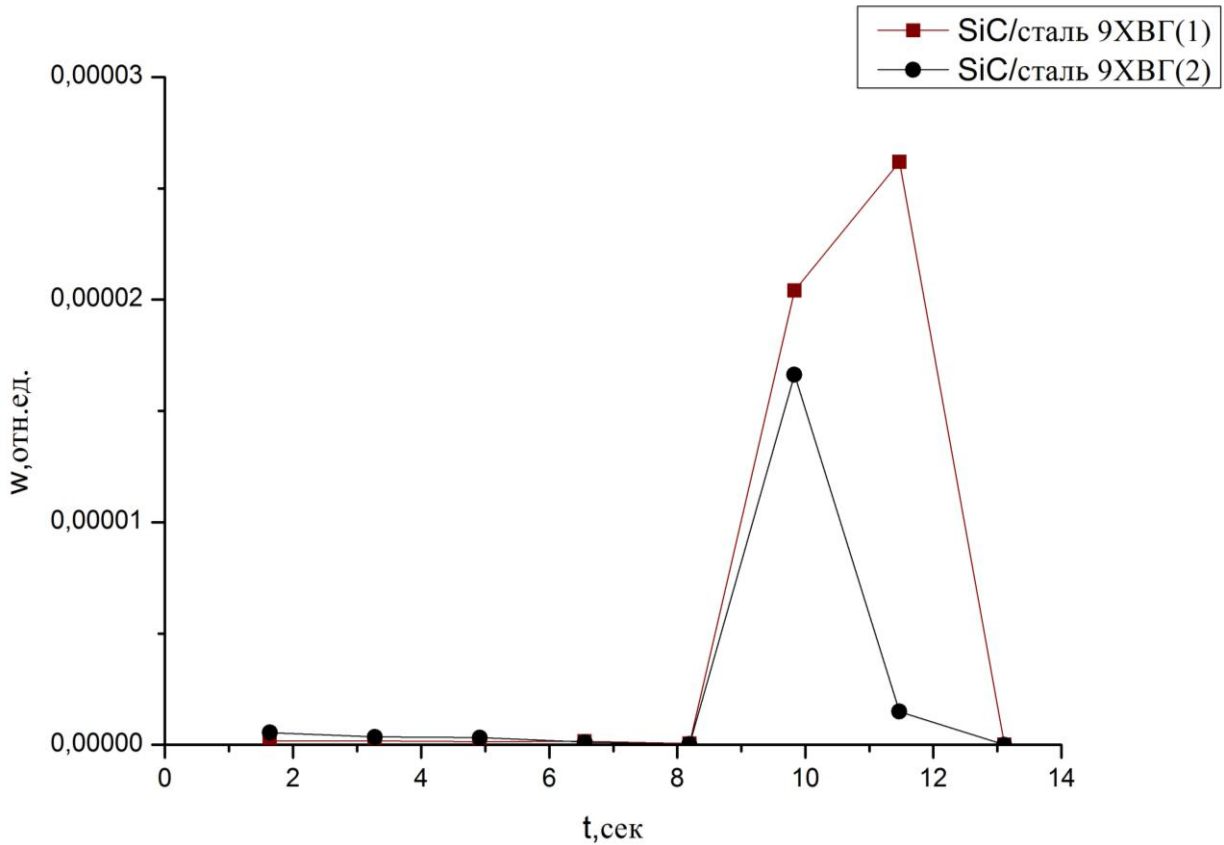


Рис. 8 Изменение массового износа для пары SiC/сталь 9ХВГ.

Скорость $v=12$ м/с (1 - $N=25$ Н; 2- $N=15$ Н)

Полученные методом спектрального анализа результаты предоставляют важную информацию для оценки износа при длительных испытаниях. На рис. 9 (б) показана диаграмма изменения коэффициента трения при сухом трении пары SiC/SiC, заканчивающаяся задиром и полной остановкой трения. Исследование кинетики изнашивания этой пары показывает, что резкое увеличение износа началось за 100 сек до катастрофического задир (рис. 9, а), что в относительных единицах составляет довольно большую цифру – 6% от времени жизни образца (времени эксплуатации). Это говорит о том, что разработанная методика может использоваться для ранней диагностики опасных повреждений поверхности. Этот же эксперимент позволяет оценить погрешность метода. При длительности эксперимента в ~1570 сек. массовый износ, полученный прямым методом измерения на аналитических весах OHAUS, составил - 13,4 мг, а с помощью метода СКО СПМ – 12,6 мг.

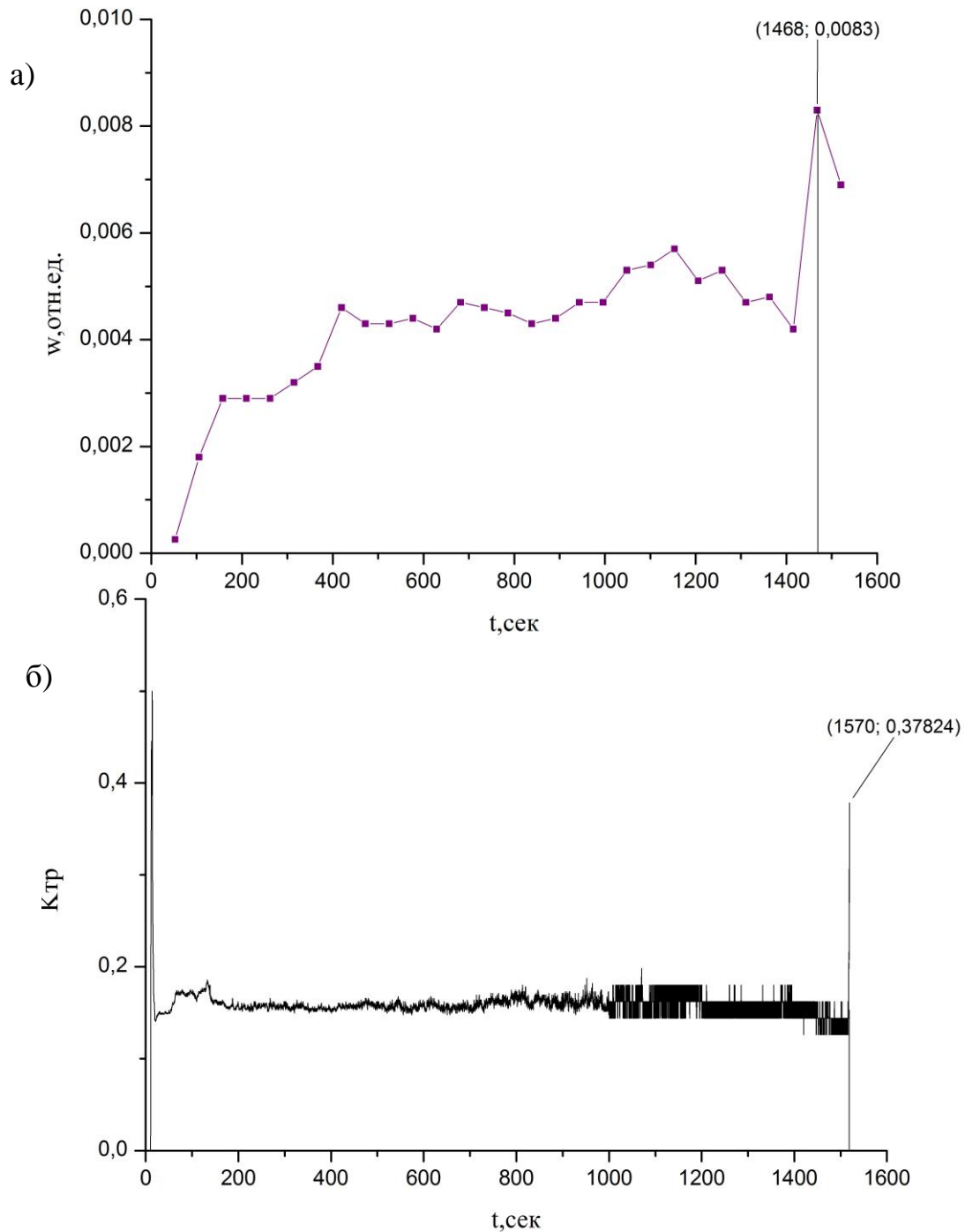


Рис. 9 Ранняя диагностика повреждений поверхности.
 а) кинетика изнашивания для пары SiC/SiC;
 б) коэффициент трения при сухом трении пары SiC/SiC.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведенное экспериментальное исследование особенностей трения керамических материалов в парах с металлами и другими керамиками позволило выявить связь между параметрами акустической эмиссии и закономерностями, протекающими в процессе трения керамик.

На основании проведенных исследований в работе сделаны следующие выводы:

1) Получена высокая корреляция данных между величиной оценок спектральной плотности мощности АЭ и величиной весового износа керамик, позволяющая наблюдать кинетику изнашивания керамик на протяжении всего процесса трения без его остановки.

2) Использование метода оценок спектральной плотности мощности сигнала акустической эмиссии позволяет определить во временном интервале начало стадии критического износа. Показана возможность временного отслеживания состояния керамических материалов, позволяющая применять широкий спектр методов для диагностики с использованием простых алгоритмов.

3) Установлена взаимосвязь между уровнем спектральной плотности мощности и механическими свойствами взаимодействующих поверхностей.

4) Показано, что для контроля процессов трения и износа в стандартных устройствах регистрации АЭ должны быть отключены постоянные фильтры высоких частот с частотой среза 20 кГц.

5) Установлено, что при трении скольжения керамик со скоростями меньше 10 м/с взаимодействие поверхностных шероховатостей происходит на частотах порядка 1000-3000 Гц и сопровождается звуковой эмиссией.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы, в том числе:

Публикации перечня ВАК:

1. Кузнецова О.С., Данилович Д. П., Орданьян С.С., Фадин Ю.А. Кинетика изнашивания керамик // Вопросы материаловедения, 2012, №4(72) – С.370-375

2. Кузнецова О.С., Сычев С.В., Фадин Ю.А., Чулкин С.Г. Применение акустической эмиссии для исследования изнашивания хрупких материалов// Научно-технические ведомости СПбГПУ,-2012, №3-2 - С.174-177

3. Сычев С.В., Кузнецова О.С., Фадин Ю.А., Чулкин С.Г. Исследование процесса приработки поверхности износостойких керамик// Научно-технические ведомости СПбГПУ,-2012, №3-2 - С.185-188

4. Фадин Ю.А., Киреенко О.Ф., Кузнецова О.С., Сычев С.В. Начальная стадия контакта хрупких тел при трении //Трение и износ, 32, - 2011, №3 - С. 30-33

Прочие публикации :

5. Кузнецова О.С., Фадин Ю.А., Чулкин С.Г. Оценка износа контртел во время трения // Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на транспорте: Труды четвертого международного симпозиума по транспортной триботехнике « Транстрибо-2010». Под общ. ред. С.Г.

Чулкина и П.М. Лысенкова- СПб.: Изд-во «ЛОМО-Инфраспек», 2010.- С.53-57

6. Кузнецова О.С., Фадин Ю.А. Поверхностная усталость хрупких тел при трении//XXXIX Неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Ч. IV.СПб: Издательство Политехнического университета, - 2010.-С.69-70.

7. Кузнецова О.С., Фадин Ю.А. Особенности регистрации акустической эмиссии при экстремальных условиях трения хрупких тел//XL Неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Ч. IV.СПб: Издательство Политехнического университета, - 2011.-С.89-90.

8. Безенкина О.С., Фадин Ю.А. Исследование изнашивания керамик с использованием метода определения массового износа//XLI Неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Ч. IV.СПб: Издательство Политехнического университета, - 2012.-С.52-53

Список цитируемой литературы:

1. Фадин Ю.А. Применение акустической эмиссии для оценки массового износа // Трение и износ. –2008.– Т.29, № 1.–С. 29–32.

2. Солонина А. И., Клионский Д. М., Меркучева Т. В., Перов С. Н. Цифровая обработка сигналов и MATLAB – СПб.: БХВ-Петербург, 2013.- 512 с.