

УДК 534.32:531

АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА МИКРОТРИБОМЕТРЕ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ТИПА

А. М. ДУБРАВИН, О. Ю. КОМКОВ⁺, Н. К. МЫШКИН

Описана система регистрации акустической эмиссии, используемая совместно с микротрибометром возвратно-поступательного типа. Параметры измерительного канала позволяют выделить моменты разрушения поверхностных слоев на фоне процессов упругого и пластического взаимодействия микронеровностей поверхностей трения.

Ключевые слова: микротрибометр, сила трения, акустическая эмиссия, поверхностный слой, тонкие пленки, разрушение.

Введение. Исследование триботехнических характеристик мономолекулярных самоорганизующихся полимерных покрытий, а также других тонких пленок, используемых в технологии микроэлектромеханических систем, является важным этапом при отработке их состава и режимов нанесения. Определяющими параметрами подобных покрытий являются коэффициент трения и степень их изнашивания при использовании в рабочих узлах. Не менее важна также информация о состоянии поверхностных слоев и механизмах изменения их структуры на различных этапах проведения трибологических испытаний.

Для оценки физико-химических процессов, происходящих при фрикционном взаимодействии тел, используются различные электронные, оптические, акустические и другие методы [1]. Регистрация упругих механических волн, возникающих в области взаимодействия трущихся тел с помощью датчиков акустической эмиссии (АЭ), позволяет определить с высокой точностью моменты разрушения покрытий, оксидных и смазочных слоев. В качестве основных источников акустического излучения, в случае проведения трибологических испытаний, называются процессы упругого и пластического взаимодействий микровыступов поверхностей, образование и разрушение адгезионных связей, появление микротрещин в поверхностных и приповерхностных слоях материалов [2]. Анализ спектрального распределения скорости счета и пиковой амплитуды импульсов АЭ позволяет судить о преобладании того или иного процесса [3, 4] на различных этапах фрикционного взаимодействия образцов.

Цель работы — описание, разработанной для использования совместно с микротрибометром возвратно-поступательного типа [5], системы регистрации и анализа АЭ.

Узел крепления образцов и датчик АЭ. Схематично конструкция узла крепления образцов в разрезе показана на рис. 1. Предназначенный для тестирования образец 3 представляет собой кремниевую подложку размером 10×10 мм с нанесенным на ее поверхность исследуемым покрытием.

Подложка помещается во фторопластовую кювету 2 с запрессованной в центре металлической вставкой 6. Использование съемной кюветы позволяет проводить исследования процессов трения для образцов, находящихся в жидкости.

Перед началом тестирования кювета фиксируется на основании 1. Образец прижимается к металлическому дну кюветы и, таким образом, фиксируется. Одновременно создаются условия для передачи акустических колебаний через прокладку 7, изготовленную из диэлектрика, на пьезопреобразователь 8. Преобразователь АЭ, представляющий собой цилиндр диаметром 5 мм толщиной 1,5 мм, изготовлен из керамики ЦТС-19 и имеет собственную резонансную частоту 1,5 МГц. Электрически пьезопреобразователь изолирован от пары трения, что позволяет уменьшить влияние электромагнитных помех на входную цепь измерительного канала и увеличить отношение сигнал—шум до уровня 100÷120

Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого Национальной Академии Наук Беларуси (ИММС НАНБ). Беларусь, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32а.

+ Автор, с которым следует вести переписку.

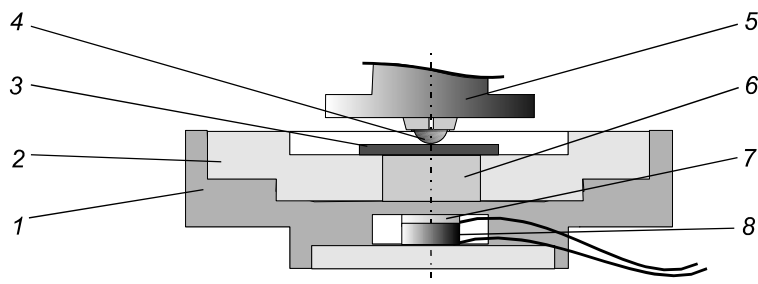


Рис. 1. Узел крепления образцов и датчик АЭ (обозначения расшифрованы в тексте)

дБ. Формируемый электрический сигнал снимается с обкладок преобразователя и с помощью экранированного кабеля подается на входной усилитель электронного блока.

Во время тестирования конструкция закрепляется на подвижном столике микротрибометра и совершает возвратно-поступательные колебания. Контртелом является сферический индентор 4, закрепленный в цанговом зажиме 5 микротрибометра.

Измерительный канал. В связи с тем, что выходная мощность датчиков АЭ генераторного типа мала, они подключаются на вход усилителя с высоким входным сопротивлением и малой входной емкостью [2]. В нашем случае предварительный усилитель с коэффициентом усиления $800 \div 1000$ состоит из полевого транзистора КП302А ($K = 1$) с большим входным сопротивлением и малым уровнем шума для согласования датчика и основного усилителя, собранного на базе отечественной микросхемы КР538УН3А ($K = 1000$).

Для устранения помех сети переменного тока с частотой 50 Гц, а также возбуждаемых на частоте 10–15 кГц индуктивных преобразователей перемещения, используемых в микротрибометре, служит фильтр высокой частоты с частотой среза 100 кГц и уровнем затухания сигнала 24 дБ/окт. Рабочий диапазон частот измерительного канала после фильтрации составляет $100 \text{ кГц} \div 1,5 \text{ МГц}$.

Промежуточный усилитель с коэффициентом усиления 150–200 поднимает уровень полезного сигнала до нескольких вольт для обеспечения корректной работы амплитудного детектора.

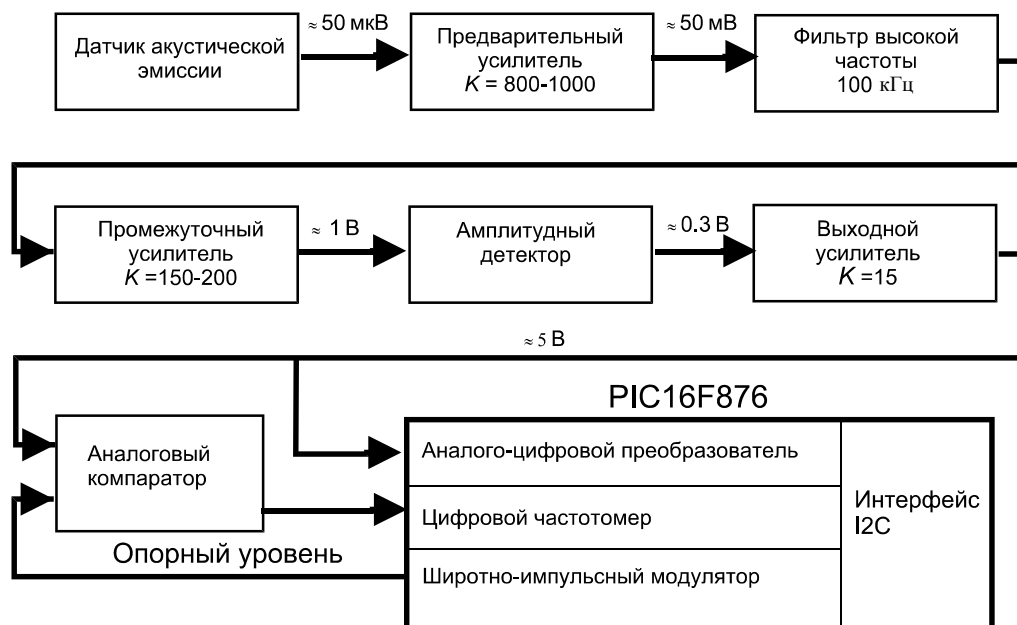


Рис. 2. Структура измерительного канала

Для выделения низкочастотной огибающей высокочастотного сигнала преобразователя АЭ служит амплитудный детектор с постоянной времени детектирования $\tau \approx 20 \text{ мкс}$. Выходной усилитель служит для согласования по уровню сигнала амплитудного детектора и дискриминатора.

Основой дискриминатора, определяющего количество событий, амплитуда которых превышает заданный порог, является аналоговый компаратор. Опорный уровень для дискриминатора формируется с помощью широтно-импульсного модулятора, собранного на базе микроконтроллера PIC16F876. Одновременно микроконтроллер используется в качестве счетчика превышений полезного сигнала над заданным уровнем и детектора усредненной амплитуды сигнала за заданное время. Для выбора

оптимальных параметров и сбора информации во время тестирования образца, с помощью интерфейса I2C, организован обмен данными микроконтроллера с основным процессором DSP2181, управляющим работой микротрибометра.

Определяемая с помощью измерительного канала, величина скорости счета АЭ E передается основным процессором микротрибометра на персональный компьютер. Обработка и сохранение оцифрованных значений скорости счета АЭ производится одновременно с поступающими значениями величины силы трения с помощью специализированного программного обеспечения.

Параметры системы. Множество источников АЭ, доступных для наблюдения и качественной оценки, определяется, в основном, настройкой амплитудно-частотных параметров измерительного канала. Так, для поверхности с шероховатостью $R_a = 0,1$ мкм, величина среднего шага неровностей профиля составляет 10 мкм [2]. При максимальной скорости движения образца 10 мм/с, частота актов взаимодействия микронеровностей составляет 1кГц. В нашем случае уровень сигналов с частотами такого порядка существенно уменьшается при фильтрации. Таким образом, помимо подавления паразитных сигналов, применение фильтра позволяет выделить импульсы высокочастотных источников АЭ, имеющих малую амплитуду, на фоне низкочастотных импульсов большой амплитуды, инициируемых процессами упругого и пластического взаимодействий микронеровностей поверхностей трения.

Калибровка пьезоэлектрического преобразователя АЭ производилась при падении стального шарика на поверхность закрепленного образца [6]. Потенциальная энергия падающего шарика определена согласно формуле

$$W = mgh,$$

где m – масса шарика; g – ускорение свободного падения; h – высота падения.

В нашем случае, для шарика диаметром 4 мм, при $h = 10$ мм, потеря энергии при падении составляет $2,45 \cdot 10^{-4}$ Дж. Параметры измерительного канала определены при тех допущениях, что большая часть потенциальной энергии шарика преобразуется при его падении в энергию упругой волны, и что возбуждаемые волны, возникающие при падении шарика, преобразуются датчиком в электрический сигнал аналогично волнам, формируемым реальными источниками АЭ. В таком случае, с учетом суммарного коэффициента усиления измерительного канала, верхним пределом энергии измеряемых импульсов является уровень $0,6 \cdot 10^{-7}$ Дж. Нижний предел определяется величиной собственных шумов системы и составляет $\approx 10^{-14}$ Дж.

Тестирование системы и обсуждение результатов. Тестирование системы производилось для пары кремниевая подложка—стальной шарик диаметром 4 мм. Во время проведения испытаний контролировались величины коэффициент трения и скорость счета АЭ (рис. 3, I), а также осциллограммы импульсов АЭ (рис. 3, II). Осциллограммы *a* и *b* на рис. 3, II соответствуют точкам *a* и *b* на рис. 3, I.

Полученные с помощью атомно-силового микроскопа изображения участков дорожки трения на этапах тестирования, соответствующих точкам *a* и *b*, приведены на рис. 4.

Совокупность имеющихся данных позволяет качественно охарактеризовать динамику изменения скорости счета АЭ при разрушении поверхностных слоев образца. На начальном этапе происходит растрескивание окисного слоя и обнажение основы образца; сила трения и скорость счета АЭ при этом резко возрастают. В дальнейшем сила трения продолжает плавно возрастать за счет дальнейшего удаления окисного слоя и взаимодействия индентора непосредственно с кремнием. Достигая максимума интенсивности в момент катастрофического разрушения пленки окисла, скорость счета АЭ резко уменьшается. Дальнейшее появление пиков интенсивности скорости счета АЭ, предположительно, соответствует этапам локального разрушения островков оксида кремния на поверхности дорожки трения.

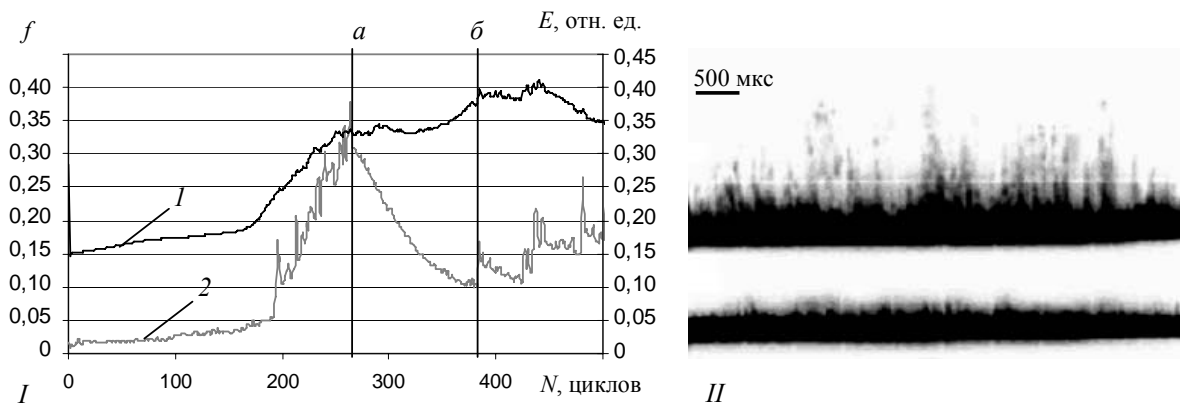


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения $f(I)$ и скорости счета АЭ $E(2)$ от количества циклов тестирования $N — I$; Осциллограммы сигнала АЭ — II . Нормальная нагрузка $P = 300$ мН, скорость скольжения $v = 4$ мм/с, длина трека $s = 6$ мм

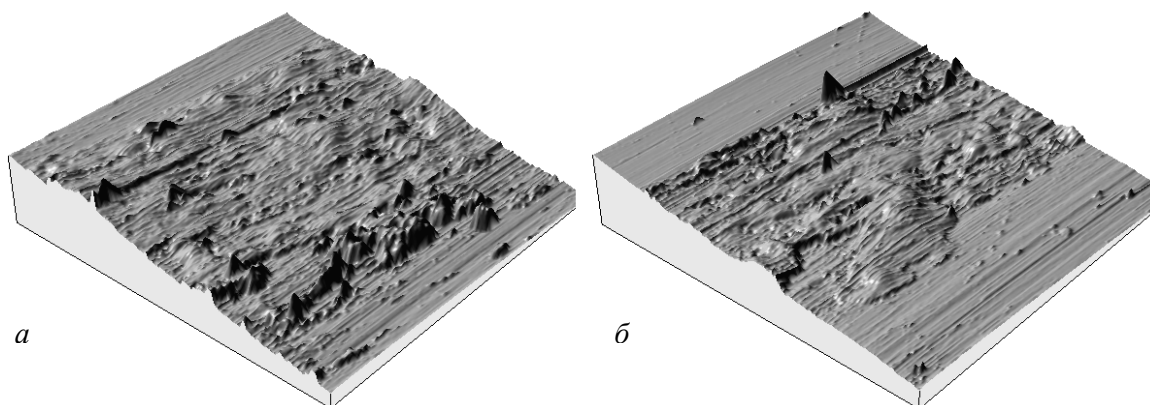


Рис. 4. АСМ-изображения, полученные на краю дорожки трения. Размер полей сканирования 50×50 мкм

Уровень сигнала на выходе усилителя в момент разрушения оксида кремния, согласно результатам калибровки канала, соответствует $(8 \div 25) \cdot 10^{-10}$ Дж, что достаточно хорошо соотносится с уровнями амплитуды импульсов АЭ при образовании микротрещин [2].

Предварительные испытания системы производились при различных параметрах входного фильтра и было отмечено, что выделение высокочастотной составляющей сигнала АЭ обеспечивает высокий уровень воспроизводимости результатов измерений при разрушении оксидной пленки. В то же время, практически теряется информация о приработке пары трения, доступная при отсутствии на входе измерительного канала фильтра высокой частоты.

Заклучение. Оснащение трибометра устройством регистрации АЭ позволяет получить дополнительную информацию о процессах, происходящих при фрикционном взаимодействии тел.

Различные источники АЭ обладают уникальными амплитудно-частотными характеристиками, что делает возможным их выделение при соответствующей настройке измерительного канала. Использование нескольких каналов, имеющих различные полосы пропускания, позволяет осуществить комплексный анализ процессов изменения структуры поверхностных слоев непосредственно во время проведения трибологических испытаний.

Обозначения

E — скорость счета АЭ; τ — постоянная времени детектирования сигналов АЭ; K — коэффициент усиления; W — энергия падающего шарика; m — масса шарика; g — ускорение свободного падения; h — высота падения; f — коэффициент трения; P — нормальная нагрузка; s — длина трека; v — скорость скольжения; N — количество циклов тестирования.

Литература

1. Свириденко А. И., Мышкин Н. К., Калмыкова Т. Ф., Холодилов О. В. Акустические и электрические методы в триботехнике / Под ред. В. А. Белого. – Минск: Наука и техника. – 1987

2. **Баранов В. М., Кудрявцев Е. М., Сарычев Т. А., Щавелин В. М.** Акустическая эмиссия при трении. – М.: Энергоатомиздат. — 1998
3. **Фадин Ю. А.** Динамика разрушения поверхности при сухом трении // Письма в ЖТФ. – 1997 (23), № 15, 75–78
4. **Doraiswami Ravi, Sethuramiah A.** Acoustic emission in dynamic compression and its relevance to tribology // Tribology Int. –1995 (25), N 5, 301–306
5. **Комков О. Ю.** Микротрибометр возвратно-поступательного типа, работающий в области малых нагрузок: конструктивные особенности и методика испытания образцов // Трение и износ. – 2003 (24), № 6, 642—648
6. **Yan T., Jones B. E.** Traceability of acoustic emission measurements using energy calibration methods. Rapid communication // Meas. Sci. Technol. — 2000, N 11, 9–12

Поступила в редакцию 20.07.04.

Dubravin A.M., Komkov O.Yu., and Myshkin N.K. **Analysis of acoustic emission with a microtribometer of the reciprocating type.**

A system of registration of acoustic emission is described that is used in combination with a reciprocating microtribometer. The parameters of the measuring channel enable to identify the moments of failure of surface layers against the background of the process of elastic and plastic interactions between microprojections on friction surfaces.