

05:08

## **Использование акустической эмиссии для анализа процессов изнашивания при трении скольжения**

© В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев, А.В. Колубаев, В.Л. Попов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

E-mail: eak@ispms.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет, Россия

E-mail: fvtn@tpu.ru

Берлинский технический университет, Германия

Поступило в Редакцию 8 октября 2012 г.

Рассмотрен акустический отклик двух различных пар трения, в которых при фрикционном контакте реализуются хрупкое разрушение и интенсивная пластическая деформация. При анализе акустических сигналов применялась методика расчета медианной частоты с использованием оконного преобразования Фурье.

Запись сигналов акустической эмиссии (АЭ) при механических испытаниях широко используется уже несколько десятилетий как дополнительный метод получения информации об изменении состояния материала в процессе нагружения, а также как эффективный метод неразрушающего контроля деталей машин, механизмов и конструктивных элементов сооружений [1,2]. Общепринятой практикой является запись акустического излучения в виде последовательности коротких отрезков одинаковой длительности — фреймов, оцифрованных с заданной частотой дискретизации. Затем записанный сигнал подвергается статистической обработке, а также анализируются спектры отдельных фреймов. В результате обработки, как правило, получают усредненные по фреймам параметры АЭ, такие как интенсивность излучения и медианную частоту, которая делит площадь под кривой спектральной плотности энергии на две равные части. Так как для получения усредненных параметров не требуется высокое разрешение по частоте, для записи исходного сигнала используют короткие фреймы, а иногда записывают даже не сам сигнал, а только его огибающую.

Описанный подход является вполне оправданным, если излучение акустического сигнала на протяжении всего испытания обусловлено каким-то одним главным процессом. Он позволяет по изменению интенсивности излучения и медианной частоты проследить за изменениями стадий или режимов наблюдаемого процесса во многих практических случаях. Однако такая методика может оказаться слишком грубой применительно к изучению процесса изнашивания, так как при трении, даже за время записи одного фрейма, на контактной поверхности могут произойти несколько совершенно разнородных событий, вызывающих акустическое излучение, различное по частоте и интенсивности. В этом случае одним из способов повышения информативности метода АЭ может стать применение новых методик исследования сигнала внутри отдельных фреймов, записанных с высокой частотой дискретизации.

В работе [3] авторами выполнен подробный разбор формы, спектра мощности и изменения медианной частоты сигнала внутри фреймов, что дало возможность с высокой степенью достоверности идентифицировать различные стадии изнашивания твердого покрытия. Актуальной задачей представляется дальнейшее развитие методики анализа сигнала АЭ с целью установления взаимосвязи между изменением его параметров внутри фрейма и процессами на поверхности трения, такими как упругое и пластическое деформирование, зарождение и распространение трещин, фазовые превращения, отделение частиц износа и др. Установление однозначных соответствий между событиями на поверхности трения и их „акустическими портретами“ позволит в дальнейшем идентифицировать конкретные события в процессе испытания только по сигналу АЭ без применения других инструментальных методов.

Как показали ранее выполненные исследования [3,4], одним из индикаторов, который способен отражать события разного рода, происходящие на поверхности трения, является изменение медианной частоты внутри фрейма акустического сигнала. Основываясь на этом, в данной работе применена методика расчета медианной частоты с использованием оконного преобразования Фурье и рассмотрен акустический отклик двух различных пар трения, в которых при фрикционном контакте реализуются хрупкое разрушение и интенсивная пластическая деформация.

Трибологические испытания проводили по схеме, в которой осуществлялось протягивание образца в виде пальца диаметром 5 mm и высотой 20 mm с радиусом закругления на конце порядка 3 mm по пластине размером 40 × 300 mm и толщиной 5 mm. Скорость протягивания

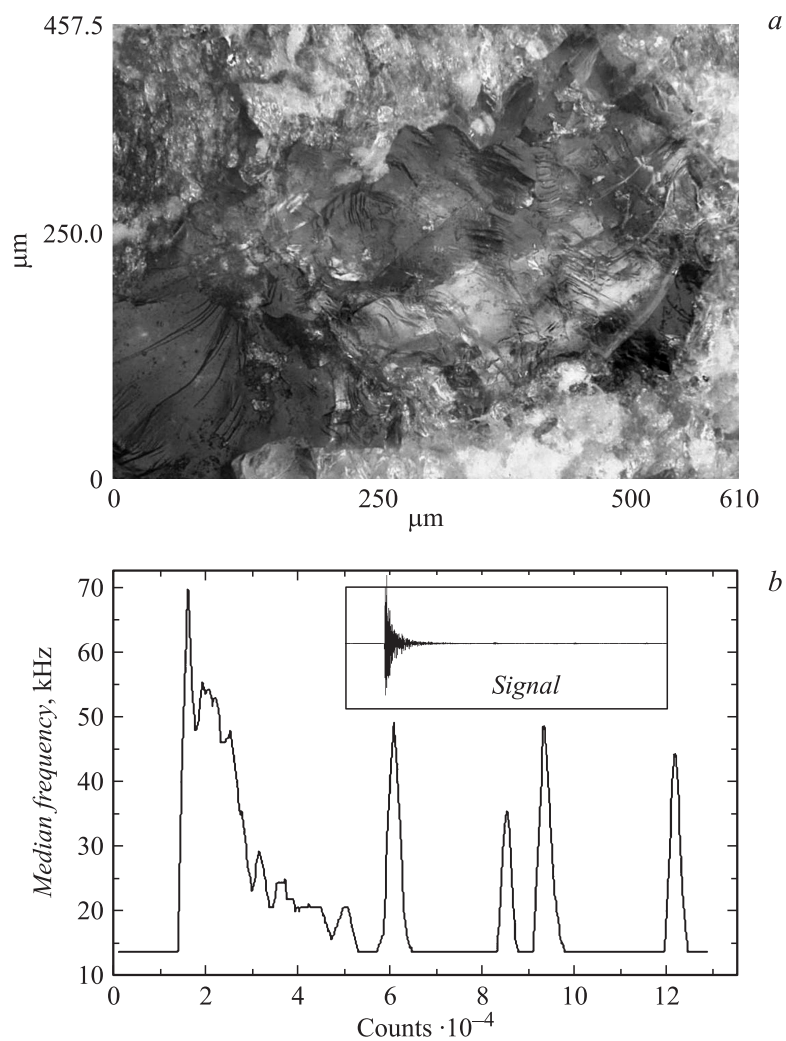
составляла 10 mm/s, нагрузка на сопряжение — 40 N, длина дорожки трения 100 mm. В качестве материалов исследований использовали пару сплав ВК-8—гранит и пару сталь 45—сплав АМг2 (палец—пластина).

Сигнал акустической эмиссии записывали с помощью модуля регистрации акустической эмиссии ЭЯ-2 производства Тольяттинского государственного университета, который позволяет сохранять и анализировать сигналы АЭ [5]. Сложность анализа акустического сигнала при трении обусловлена тем, что на контактной поверхности одновременно может протекать несколько событий разной природы. Поэтому на первом этапе из большого количества записанных фреймов для дальнейшего анализа выбирались те, форма сигнала которых наиболее характерна для данной пары трения. Далее в выбранных фреймах выполнялось оконное преобразование Фурье в прямоугольном окне. Для Фурье-анализа использовались функции библиотеки ALGLIB [6]. Окно одинаковой ширины перемещалось от начала до конца фрейма с одинаковым сдвигом. Таким образом, получали спектр мощности сигнала и по нему рассчитывали медианную частоту для каждого окна на протяжении всего фрейма. Ширина окна и сдвиг подбирались опытным путем так, чтобы обеспечить необходимое разрешение по частоте и по времени. В данном случае использовалась ширина окна 1000 и сдвиг 200 отсчетов сигнала АЭ. Затем, для исключения случайных выбросов проводилось сглаживание полученного графика медианной частоты скользящим прямоугольным окном по 10 соседним точкам.

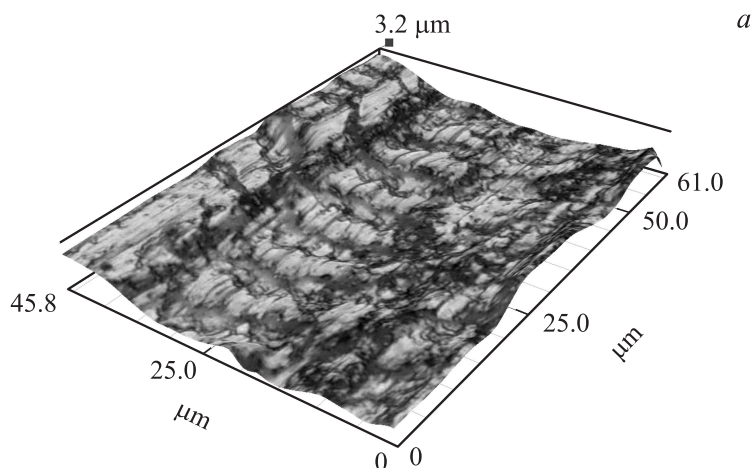
Анализ полученных в экспериментах данных АЭ показал, что каждой паре трения присущи свои, характерные только для нее формы сигналов.

Пару сплав ВК-8—гранит составляют материалы, неспособные деформироваться пластически, поэтому изнашивание представляет собой процесс хрупкого разрушения гранита при контакте с твердосплавным индентором. Участок дорожки трения со следами хрупкого откола частиц износа приведен на рис. 1, *a*. Типичная форма сигнала для данной пары трения и соответствующее изменение медианной частоты внутри фрейма приведены на рис. 1, *b*.

Характерной особенностью акустического сигнала является быстрый рост его амплитуды практически от нуля до максимального значения с последующим быстрым уменьшением до первоначальной величины (рис. 1, *b*). Хорошо видно, что быстрый рост амплитуды сигнала сопровождается таким же быстрым ростом медианной частоты.



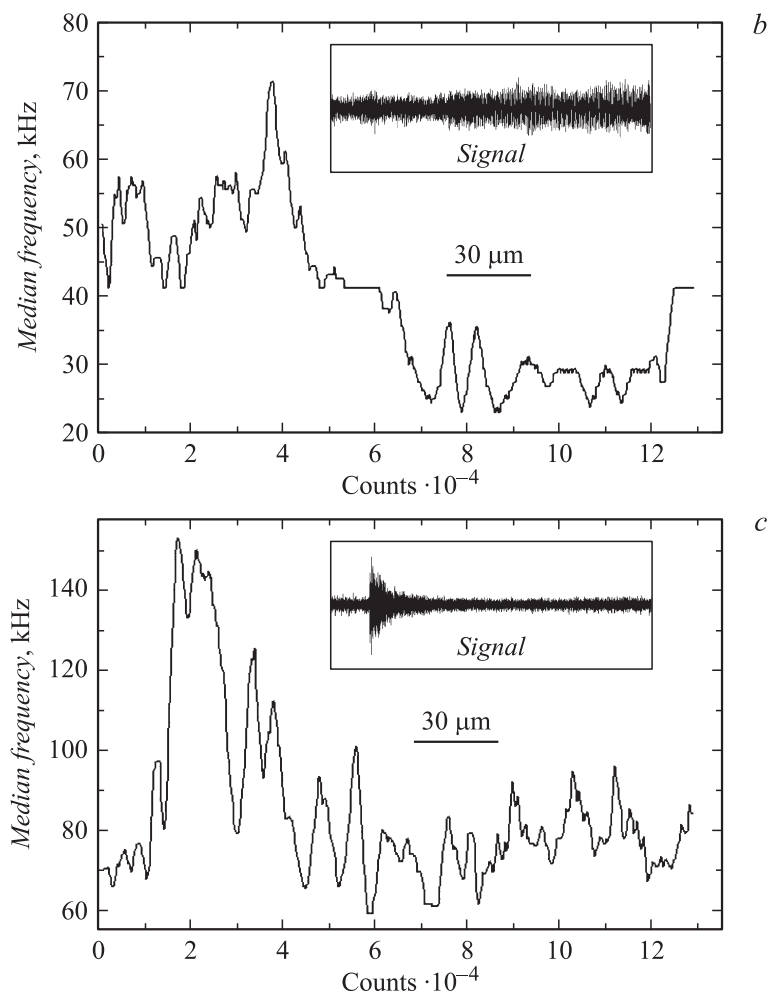
**Рис. 1.** Поверхность трения (а), форма сигнала (сверху) и медианная частота (b) для пары трения ВК-8–гранит.



**Рис. 2.** Вид дорожки трения (*a*); форма сигнала (сверху) и медианная частота для двух типов сигналов (*b*, *c*), наблюдавшихся в паре трения сталь 45–АМг2.

Она увеличивается от  $\sim 12$  kHz — частоты собственных колебаний системы трения, до  $\sim 87$  kHz, а затем уменьшается до начального значения. Последующие, даже едва заметные, изменения амплитуды сигнала также приводят к скачкам медианной частоты в этих областях фрейма (четыре пика на рис. 1, *b*). По-видимому, первый широкий затухающий пик связан с распространением микротрещины, отделяющей частицу износа, а последующие пики меньшей амплитуды связаны с образованием микротрещин на поверхности трения.

В отличие от описанного выше случая, при трении стального индентора по пластине из алюминиевого сплава мы имеем дело уже с двумя пластичными материалами, один из которых значительно тверже другого. Соответственно дорожка трения представляет собой результат интенсивной пластической деформации поверхности менее твердого материала — пластины из сплава АМг2 (рис. 2, *a*). При этом пластическая деформация протекает неоднородно, создавая на дне дорожки трения квазипериодический деформационный рельеф в виде волн, гребни которых перпендикулярны направлению трения (рис. 2, *a*). Средний период волн составляет величину порядка  $10 \mu\text{m}$ .



**Рис. 2** (продолжение).

Для данной пары наблюдаются два отличных друг от друга типа сигналов (рис. 2, *b* и *c*). Сигнал первого типа не имеет каких-либо особенностей, за исключением небольшого повышения амплитуды во второй половине фрейма (рис. 2, *b*). Однако расчет медианной ча-

стоты показал, что здесь в отличие от рассмотренной выше пары сплав ВК-8–гранит ситуация прямо противоположная — с ростом амплитуды происходит не повышение, а существенное снижение медианной частоты (рис. 2, *b*). Кроме того, на этом низкочастотном участке фрейма наблюдаются также квазипериодические колебания медианной частоты. Пространственный период этих колебаний по порядку величины составляет  $10\ \mu\text{m}$ , что соответствует периоду волн деформационного рельефа на дне дорожки трения (рис. 2, *a*). Проведенное в работе [7] моделирование показало, что именно переход от упругого к интенсивному пластическому деформированию ведет к снижению частоты колебаний, генерируемых трибосистемой. Таким образом, опираясь на эти два факта, можно сказать, что участки фреймов АЭ, где с ростом амплитуды сигнала медианная частота уменьшается, отвечают интенсивному пластическому деформированию с формированием рельефа поверхности трения. Второй, характерный для пары трения сталь–алюминиевый сплав, тип фрейма также имеет свои особенности. В его первой половине присутствует сигнал, по форме аналогичный сигналу, излучаемому микротрещиной (рис. 2, *c*). Это подтверждается таким же, как для гранита, быстрым ростом медианной частоты вместе с увеличением амплитуды сигнала. Отличие состоит лишь в меньшей скорости затухания. Природа возникновения такого сигнала требует дальнейшего изучения, однако по аналогии с гранитом можно с большой долей уверенности утверждать, что он генерируется при формировании и раскрытии микротрещины непосредственно перед отделением частицы износа алюминия с поверхности трения. В пользу этого утверждения говорит отсутствие на изнашиваемой поверхности алюминия микротрещин, т. е. других возможных источников возникновения такого сигнала. На протяжении всего фрейма также имеют место квазипериодические колебания медианной частоты, период которых практически совпадает с периодом микрорельефа дорожки трения (рис. 2, *c*). Можно предположить, что это связано с пересечением движущимся индентором гребней волн деформационного рельефа.

Таким образом, проведенные исследования показали, что примененная в работе методика позволяет идентифицировать распространение трещин и пластическую деформацию на поверхности трения. Обнаружено, что характерным признаком сигнала, генерируемого микротрещиной, является одновременное резкое повышение амплитуды и медианной частоты внутри фрейма АЭ. При пластическом деформиро-

вании материала рост амплитуды, наоборот, сопровождается снижением медианной частоты сигнала.

Работа выполнена по проекту № III.20.2.4 „Изучение механизмов трения и эволюции структуры поверхностных слоев металлов, сплавов и композиционных материалов в различных условиях фрикционного контакта на основе многоуровневого подхода“ Программы III.20.2 фундаментальных исследований СО РАН на 2010–2012 гг. при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-08-00629-а).

## Список литературы

- [1] *Семашко Н.А., Шпорт В.И., Марьин Ю.Н.* и др. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. М.: Машиностроение, 2002. 240 с.
- [2] *Фадин Ю.А.* // Трение и износ. 2008. Т. 29. № 1. С. 29–32.
- [3] *Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Колубаев А.В., Лобач М.И., Гончаренко И.М.* // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 5/2. С. 234–238.
- [4] *Колубаев Е.А., Лобач М.И., Гончаренко И.М., Колубаева Ю.А., Сизова О.В.* // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 11/3. С. 246–250.
- [5] *Мерсон Д.Л., Полунин В.И., Чудинов Б.А., Растегаев И.А., Разуваев А.А.* // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2007. № 8. С. 9–13.
- [6] ALGLIB ([www.alglib.net](http://www.alglib.net)), Sergey Bochkhanov and Vladimir Bystritsky.
- [7] *Рубцов В.Е., Колубаев А.В.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 11. С. 63–69.