

ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ СУХОМ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ*

Е.А. КОЛУБАЕВ^{1,2}, кандидат физ.-мат.наук
В.Е. РУБЦОВ¹, кандидат физ.-мат.наук
А.В. КОЛУБАЕВ^{1,2}, доктор физ.-мат. наук, профессор
¹(ИФПМ СО РАН, г. Томск)
²(НИУ ТПУ, г. Томск)

Статья получена 15 января 2013 года

Колубаев Е.А. – 634021, г. Томск, пр. Академический 2/4,
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, e-mail: eak@ispms.ru

Рассмотрены особенности генерации акустического сигнала в паре трения сталь–алюминиевый сплав, в которой при фрикционном контакте реализуется интенсивная пластическая деформация. При анализе акустических откликов системы применялась методика расчета медианной частоты с использованием оконного преобразования Фурье.

Ключевые слова: трение скольжения, поверхность трения, пластическая деформация, акустическая эмиссия, акустический сигнал, частотный спектр.

Введение

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]. Такие процессы, как деформация и разрушение, всегда сопровождаются появлением сигналов акустической эмиссии. Поскольку данные процессы наблюдаются при трении и изнашивании материалов, применение метода АЭ в трибологии продолжает оставаться перспективным направлением, так как позволяет получать информацию о поведении материалов в процессе трения и стадийности изнашивания в реальном времени [3,4].

Обычно при исследовании акустической эмиссии сигнал записывается в виде фреймов,

последовательности коротких отрезков одинаковой длительности, оцифрованных с заданной частотой дискретизации. Затем записанный сигнал подвергается обработке, в результате которой, 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.

Такой подход является оправданным, если излучение акустического сигнала на протяжении всего испытания обусловлено каким-то одним 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 достаточно 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, вы-

* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.В37.21.2065.

зывают 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.

Как показали ранее выполненные исследования [5, 6], одним из индикаторов, который способен отражать события разного рода, происходящие на поверхности трения, является изменение медианной частоты внутри фрейма акустического сигнала. В данной работе рассмотрены особенности генерации акустического сигнала в паре трения сталь–алюминевый сплав, в которой при фрикционном контакте реализуется интенсивная пластическая деформация.

Материалы и методика исследований

Трибологические испытания проводили по схеме, в которой осуществлялось протягивание образца в виде пальца диаметром 5 мм и высотой 20 мм с радиусом закругления на конце порядка 3 мм по пластине размером 40×300 мм и толщиной 5 мм. Скорость протягивания составляла 10 мм/с, нагрузка на сопряжение – 40 N, длина дорожки трения 100 мм. В качестве материалов исследований использовали пару сталь 45 – сплав АМг2 (палец – пластина). Исследования поверхности материала после трения проводили на цифровом 3D-микроскопе Keyence VHX1000.

Сигналы акустической эмиссии записывали с помощью модуля регистрации акустической эмиссии ЭЯ-2 производства Тольяттинского госуниверситета, который позволяет сохранять и анализировать сигналы АЭ [7]. 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 [8]. 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.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования, выполненные с использованием оптического 3D-микроскопа, показали, что при трении стальной индентор формирует на поверхности образца из алюминиевого сплава четко выраженную дорожку трения глубиной около 10 мкм (рис. 1, а). Образование дорожки трения происходит как вследствие интенсивной пластической деформации алюминиевого сплава, так и вследствие разрушения его поверхности при движении индентора. Свидетельством деформации являются буртики по краям дорожки трения высотой несколько микрометров (рис. 1, б), сформировавшиеся вследствие пластического отеснения материала образца при движении по нему более твердого стального индентора. Разрушение поверхности трения подтверждается присутствием на ней частиц износа алюминиевого сплава и образованием трещин и разрывов материала.

Известно, что процесс сухого трения скольжения является нестабильным, что связано с ниспадающей зависимостью коэффициента трения от скорости. В этом случае в контакте наблюдается режим скольжения «stick-sleep», что проявляется в периодическом изменении скорости проскальзывания индентора по образцу. При исследовании дорожки трения с большим увеличением (рис. 2, а) оказалось, что на ее дне существуют области с квазипериодической структурой рельефа, сформированной при скольжении индентора. Это хорошо прояв-

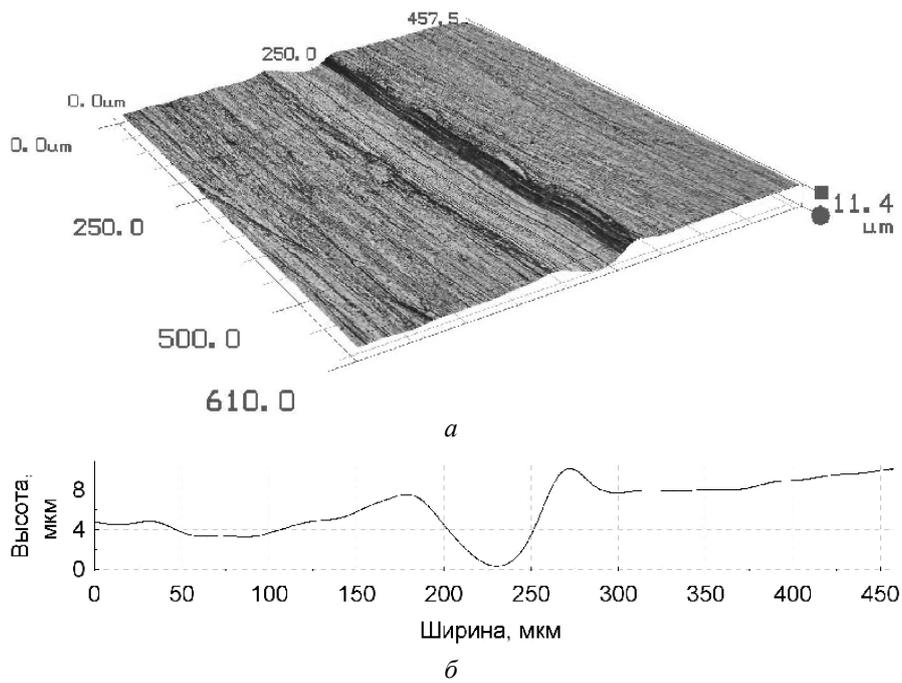


Рис. 1. 3D-изображение участка поверхности с дорожкой трения (а) и поперечный профиль поверхности (б)

ляется на профиле поверхности, построенном вдоль направления скольжения (рис. 2, б). Дно дорожки представляет собой последовательность сменяющих друг друга гребней и впадин с максимальной разницей высот около 1 мкм. Период рельефа составляет величину порядка 10...15 мкм.

Анализ акустического излучения системы трения показал, что имеется два характерных типа фреймов с существенно различающейся формой сигнала. Фреймы одного типа (тип I) характеризуются скачкообразным ростом сигнала от некоторого постоянного до максимального уровня с последующим более плав-

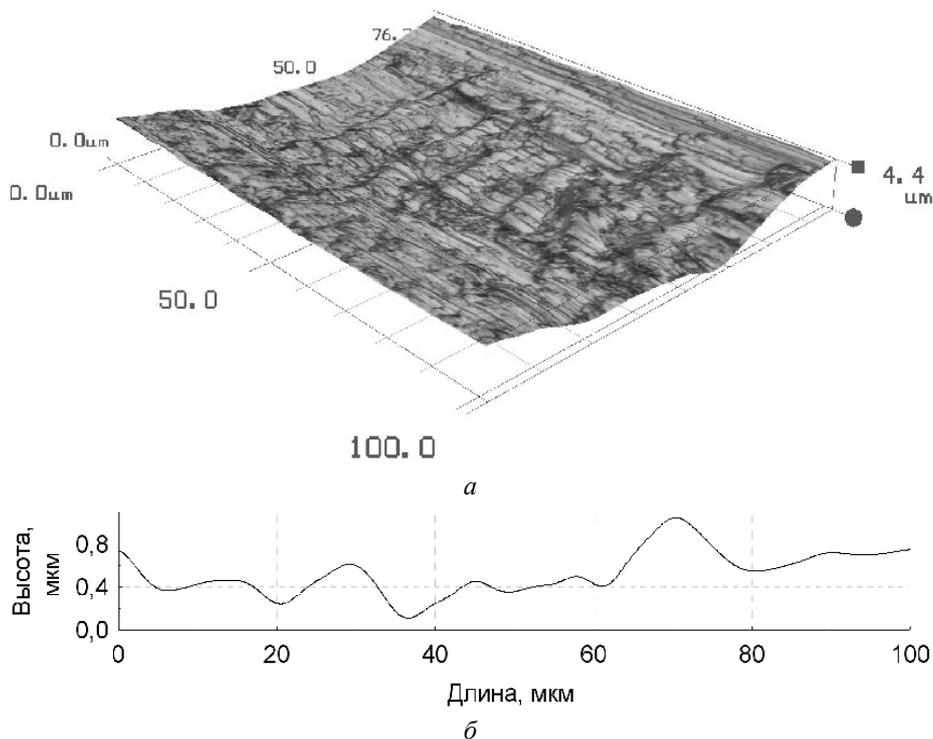


Рис. 2. 3D-изображение участка дна дорожки трения (а) и продольный профиль поверхности этого участка (б)

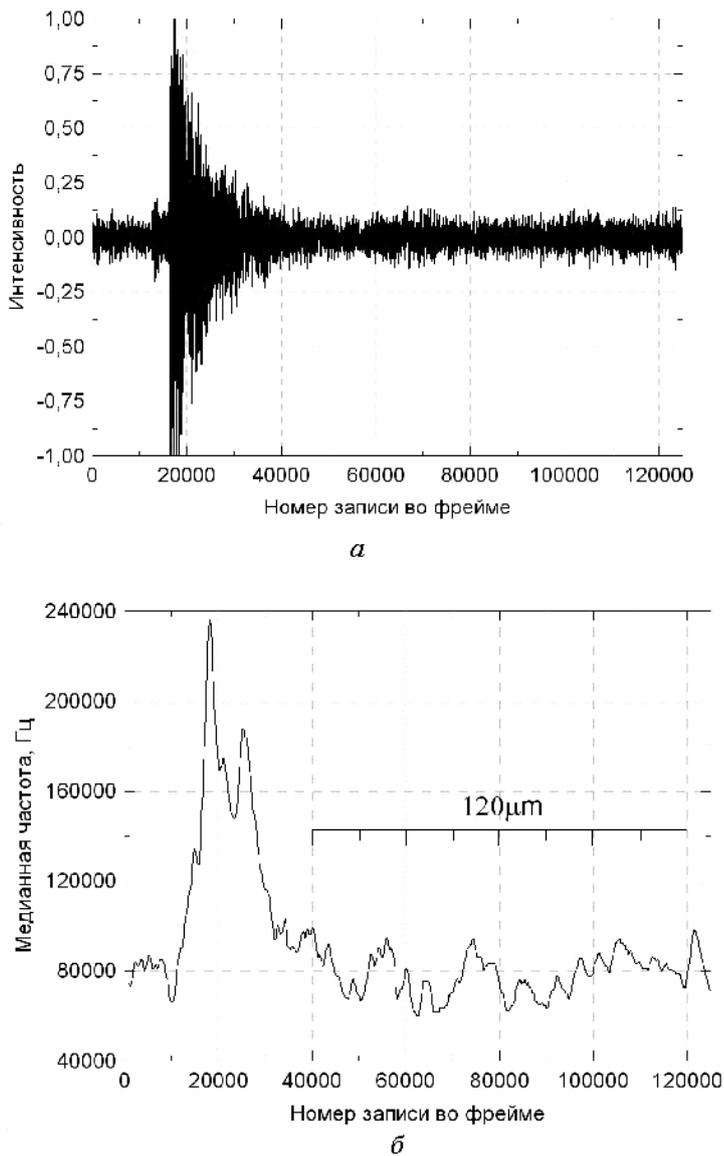


Рис. 3. Нормированный акустический сигнал (а) и медианная частота (б) внутри фрейма (тип I)

ным падением до первоначальной величины (рис. 3, а). Повышение амплитуды сигнала сопровождается также резким повышением медианной частоты от 80 до 240 кГц и дальнейшим снижением до первоначального значения (рис. 3, б). Наблюдаемый сигнал по форме аналогичен сигналу, полученному при хрупком разрушении графита в процессе трения в паре с твердосплавным индентором [9]. Здесь, как и в случае с гранитом, вместе с увеличением амплитуды сигнала быстро растет медианная частота. Различия состоят только в меньшей скорости затухания и большей интенсивности низкочастотной части фрейма. Таким образом, по аналогии с гранитом, можно сказать, что в данном случае сигнал описанного типа может

генерироваться при раскрытии микро-трещины, отделяющей частицу износа алюминиевого сплава с дорожки трения. Отсутствие на изнашиваемой поверхности других возможных источников такого сигнала в виде микро-трещин также говорит в пользу сделанного утверждения.

От момента снижения медианной частоты и до конца фрейма имеют место квазипериодические колебания медианной частоты от 60 до 100 кГц (рис. 3, б), при этом сам сигнал не претерпевает значительных изменений (рис. 3, а). Для оценки пространственного периода колебаний медианной частоты на рис. 3, б приведена шкала, отражающая путь, проходимый индентором во время записи фрейма. Как можно видеть из рис. 3, б, период колебаний медианной частоты составляет 10...30 мкм, что по порядку величины совпадает с периодом микро-рельефа дорожки трения (рис. 2, б). Можно предположить, что акустический сигнал на данном участке фрейма возникает за счет квазиупругого механического контакта индентора с гребнями волн деформационного рельефа в режиме «stick-sleep».

Второй характерный тип фреймов (тип II, рис. 4, а) по форме сигнала отличается от описанного выше более высокой средней интенсивностью сигнала и отсутствием ярко выраженных пиков. Главное различие между двумя типами фреймов состоит в поведении медианной частоты. Тип II характеризуется значительно более низкой медианной частотой (рис. 4, б). На большей части фрейма она составляет ≈ 40 кГц. Кроме того, наблюдаются квазипериодические изменения медианной частоты с периодом 15...60 мкм, когда ее значение опускается ниже 30 кГц. Моделирование, проведенное в работе [10], показало, что уменьшение частоты генерируемых трибосистемой колебаний происходит вследствие интенсивного пластического деформирования поверхностного слоя материала. Расчеты также показали, что в условиях адгезионного трения пластическая деформация поверхностного

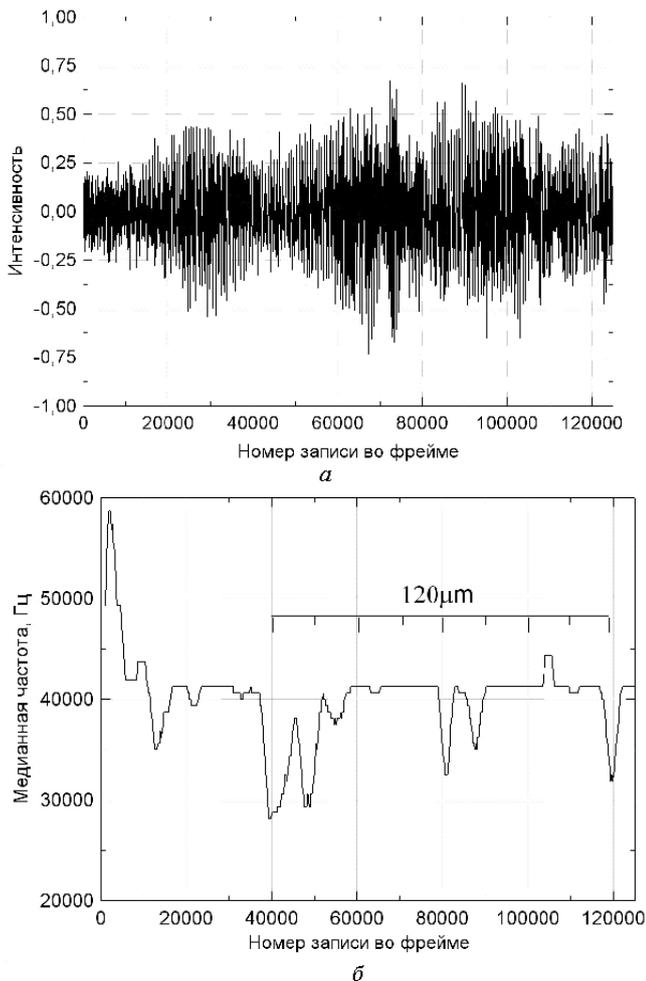


Рис. 4. Нормированный акустический сигнал (а) и медианная частота (б) внутри фрейма (тип II)

слоя носит не непрерывный, а квазипериодический характер [11].

На основании этих двух факторов можно сказать, что фреймы типа II излучаются трибо-системой при интенсивном пластическом деформировании. При этом процесс деформирования не является стационарным и протекает по схеме, аналогичной «stick-sleep». Скорость пластической деформации меняется циклически от минимального до максимального значения, что приводит к формированию деформационного рельефа дорожки трения (см. рис. 2, а).

Заключение

При анализе акустического сигнала, генерируемого при трении стального индентора по образцу из алюминиевого сплава, обнаружено два характерных типа фреймов, каждый из которых отвечает своему набору событий,

происходящих на дорожке трения. Первый тип характеризуется значительным ростом медианной частоты с увеличением амплитуды сигнала и излучается при отделении частицы износа. Особенностью второго типа фреймов, наоборот, является снижение медианной частоты при более высокой амплитуде сигнала. Сигнал этого типа появляется при интенсивном нестационарном пластическом деформировании и формировании квазипериодического рельефа на поверхности износа.

Работа выполнена по проекту № III.23.2.4 «Разработка научных основ создания мультимодальных функциональных материалов и покрытий триботехнического назначения на основе динамики контактирования поверхностей» Программы III.23.2 фундаментальных исследований СО РАН на 2013–2016 гг., при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 2.G25.31.0063) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218.

Список литературы

1. Семашко Н.А., Шпорт В.И., Марьин Б.Н. и др. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. – М.: Машиностроение, 2002. – 240 с.
2. Фадин Ю.А. Применение акустической эмиссии для оценки массового износа // Трение и износ. – 2008. – Т. 29. – № 1. – С. 29–32.
3. Ferrer C., Salas F., Pascal M., Orozco J. Discrete acoustic emission waves during stick-slip friction between steel samples // Tribology International. – 2010. – N 43. – P. 1–6.
4. Hase A., Mishina H., Wada M. Acoustic emission in elementary processes of friction and wear // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. – 2009. – V. 3. – N 4. – P. 333–344.
5. Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Колубаев А.В., Лобач М.И., Гончаренко И.М. Особенности акустической эмиссии на разных стадиях изнашивания твердого покрытия при сухом трении / Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 5/2. – С. 234–238.
6. Колубаев Е.А., Лобач М.И., Гончаренко И.М., Колубаева Ю.А., Сизова О.В. Особенности получения нанокристаллических покрытий системы Ti–Al–N и исследование их разрушения при трении скольжения с использованием метода акустической эмиссии // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 11/3. – С. 246–250.

7. Мерсон Д.Л., Полунин В.И., Чудинов Б.А., Растегаев И.А., Разуваев А.А. Изучение процессов разрушения поверхностей, деформируемых трением, методом акустической эмиссии // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 8. – С. 9–13.
8. *ALGLIB* (www.alglib.net), Sergey Bochkanov and Vladimir Bystritsky.
9. Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Колубаев А.В., Попов В.Л. Использование акустической эмиссии для анализа процессов изнашивания при трении скольжения // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – В. 4. – С. 79–86.
10. Рубцов В.Е., Колубаев А.В. Пластическая деформация и квазипериодические колебания в трибологической системе // ЖТФ. – 2004. – Т. 74. – В. 11. – С. 63–69.
11. Рубцов В.Е., Тарасов С.Ю., Колубаев А.В. Неоднородность деформации и сдвиговая неустойчивость материала при трении // Изв. вузов (Физика). – 2011. – Т. 54. – № 11/3. – С. 215–220.

Features of acoustic signal emission in dry sliding friction

E.A. Kolubaev, V.E. Rubtsov, A.V. Kolubaev

This paper describes the features of acoustic signals in friction pair of steel - aluminum alloy, in which intensive plastic deformation in frictional contact is realized. In the analysis of the acoustic response of the system method of median frequency calculating using windowed Fourier transform was used.

Key words: sliding friction, friction surface, plastic deformation, acoustic emission, acoustic signal, frequency spectrum.