

05;08

## **О возможности изучения деформационных процессов в поверхностном слое при трении по акустическим спектрам**

© А.Ю. Смолин, С.А. Добрынин, С.Г. Псахье

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
Томский государственный университет  
E-mail: laesod@ms.tusur.ru

Поступило в Редакцию 8 июня 2009 г.

Упругие волны, генерируемые при трении, рассматриваются как источник информации о процессах деформации, разрушения и адгезионного схватывания в зоне контактного взаимодействия. На основе компьютерного моделирования показано, что вследствие динамической природы процесса трения для анализа регистрируемых сигналов даже в установившемся режиме помимо преобразования Фурье необходимо применять средства частотно-временного анализа. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что закономерности процесса изнашивания могут быть изучены на основе анализа соответствующих акустических спектров.

PACS: 46.55.+d

Трение представляет собой исключительно сложное динамическое явление. Постоянное измерение коэффициента трения скольжения показывает, что эта характеристика пары не всегда является постоянной величиной даже при установившемся режиме процесса, а может изменяться, достигая максимумов и минимумов [1,2]. Проявлением динамической природы трения является также возникновение

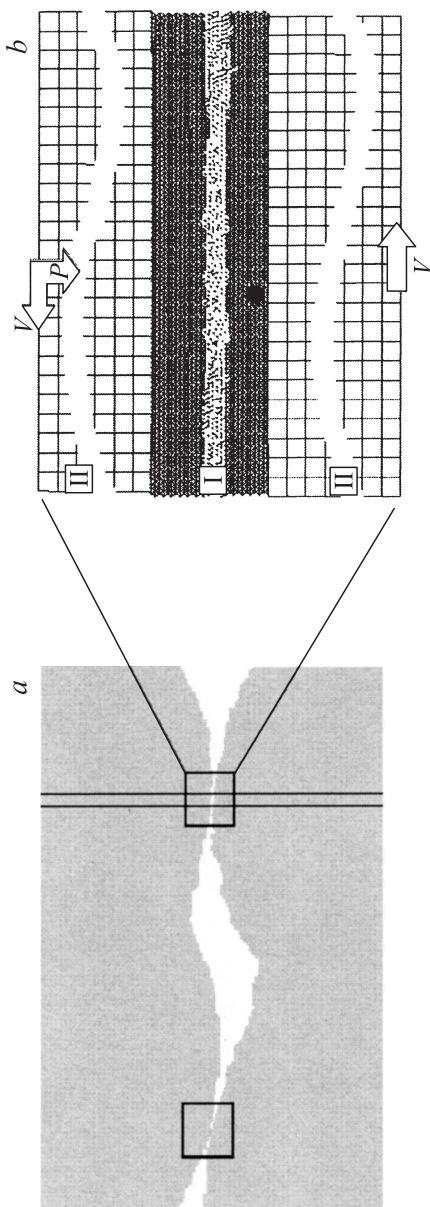
акустических колебаний, которые играют важную роль в поведении взаимодействующих тел, в том числе в их изнашивании [3–6].

Отметим, что подавляющее число публикаций на тему колебаний при трении связано с технологическими проблемами, обусловленными неравномерностью движения в механизмах, или экологическими проблемами, вызываемыми специфическим скрипом при трении. При этом эксперимент показывает, что уменьшение амплитуды акустических колебаний в процессе трения определенными демпферами может приводить к изменению коэффициента трения [4,5] и интенсивности изнашивания. Например, в [6] сообщается, что срок службы деталей узлов трения можно повысить в разы только за счет гашения акустических колебаний демпферами, нанесением поверхностных слоев или за счет подбора геометрии деталей таким образом, чтобы возникающие при трении колебания опасной частоты быстро затухали.

Таким образом, прослеживается взаимосвязь между процессами, протекающими в зоне контакта, и упругими волнами, генерируемыми при контактном взаимодействии и распространяющимися в контактирующих телах. Это позволяет предположить, что на основании изучения спектров акустических колебаний, генерируемых при трении, можно судить об особенностях процессов, происходящих в зоне реального контакта непосредственно в ходе испытаний [7,8]. Отметим, что в большинстве случаев при экспериментальном изучении трения и изнашивания все измерения и наблюдения участков материала непосредственно в зоне взаимодействия производят уже после завершения испытания. Поэтому некоторые из результатов таких исследований могут представлять собой следствие не самого процесса, а его прекращения.

Очевидно, что помимо экспериментального изучения зависимостей между параметрами акустической эмиссии при трении и характеристиками, а также стадиями самого процесса взаимодействия в областях реального контакта, целесообразно проводить компьютерное моделирование этих явлений, поскольку оно дает возможность изучать эти сложные процессы непосредственно в динамике.

На рис. 1, *a* представлено схематическое изображение зоны трения. Области реального контакта, которые составляют несколько процентов от номинальной поверхности взаимодействующих тел, выделены здесь квадратами. Моделировалась часть реального контакта, находящаяся между вертикальными линиями, показанными на рис. 1, *a* и соответствующая наноскопическому масштабному уровню при взаимодействии

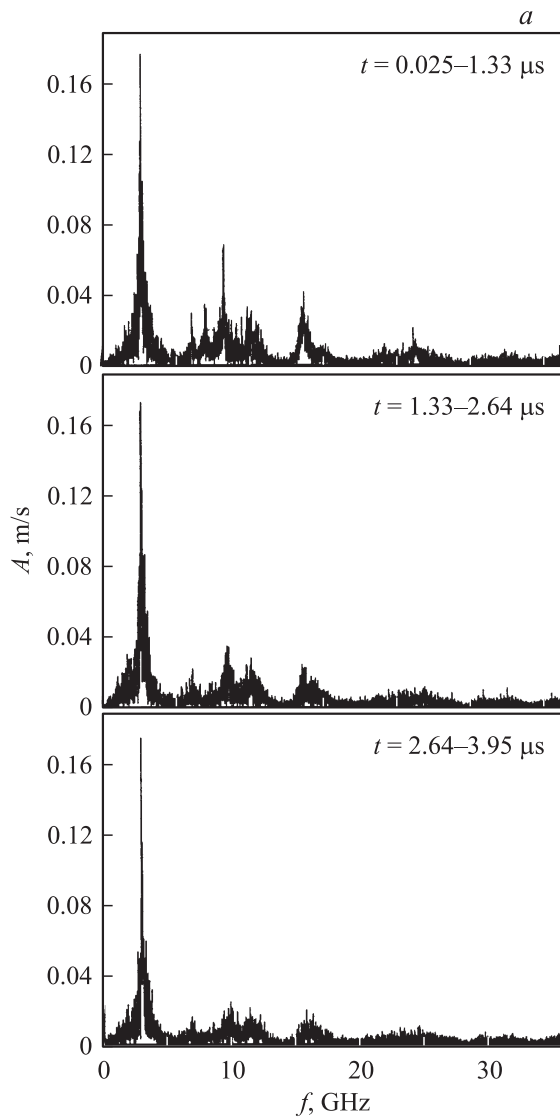


**Рис. 1.** Схема зоны контакта при трении (а), область исследования и общая структура (b).

сталей. Структура расчетной области представлена на рис. 1, *b*. При этом область I моделировалась дискретным методом подвижных клеточных автоматов [9], а для сеточной области II динамические уравнения механики деформируемого твердого тела решались методом конечных разностей [10–12]. Для уменьшения вертикальных размеров рисунка показана только часть сетки. Во время расчета проводилась регистрация упругих волн в „датчике“, изображенном черной точкой на рис. 1, *b*, для которой записывались такие параметры, как  $V_x$  — составляющая скорости вдоль оси  $X$ ,  $V_y$  — составляющая скорости вдоль оси  $Y$ ,  $I$  — интенсивность тензора напряжений и  $P$  — давление.

Моделирование в рамках такого подхода к процессу трения стальных образцов показало, что Фурье-анализ регистраций интенсивности напряжений позволяет выявить различные режимы формирования слоя трения, определяемые правилами взаимодействия дискретных элементов в зоне контакта [11]. Целью данной работы является исследование частотно-временных характеристик упругих волн, генерируемых в модельной паре трения, и выявление зависимости между частотами этих волн и шероховатостью в области контакта.

На спектрах величин, регистрирующих прохождение упругих волн, генерируемых в модели трения, присутствуют как собственные частоты системы, так и частоты, обусловленные характерными размерами модели (ширина расчетной области  $l = 900$  nm и размер автомата  $d = 2.5$  nm) и скоростью относительного движения блоков  $2V = 20$  m/s. Собственные частоты нижнего блока рассчитаны по аналогии с балкой, закрепленной на одном конце  $p_k = v(k - 0.5)/2l$ , где  $v$  — скорость волны, а  $l$  — высота блока. Поскольку скорость поперечного звука  $v_s = 3.19$  km/s, высота  $l = 2.578 \cdot 10^{-7}$  m, то первая гармоника соответствует 3.09 GHz. В образце также распространяются продольные упругие волны. Скорость распространения продольных волн  $v_p = 5.81$  km/s. Следовательно, для таких волн первая гармоника соответствует 5.63 GHz. Поскольку на внешней поверхности верхнего блока задано только давление и для нее нет жесткого закрепления по оси  $Y$ , то собственные частоты для него определяются по аналогии со свободной балкой по формуле  $p_k = vk/2l$ . Следовательно, для продольных волн первая гармоника составляет 11.27 GHz. Гармоники более высоких порядков имеют маленькую амплитуду и, следовательно, слабо идентифицируются на фоне шума. Отметим также наличие неидентифицированных пиков в низкочастотной части спектров, поло-



**Рис. 2.** Спектры Фурье регистрируемых данных для  $V_x$  в различные интервалы времени (a) и вейвлет-преобразования этих же данных с базовой функцией Морле и „мексиканская шляпа“ (b).

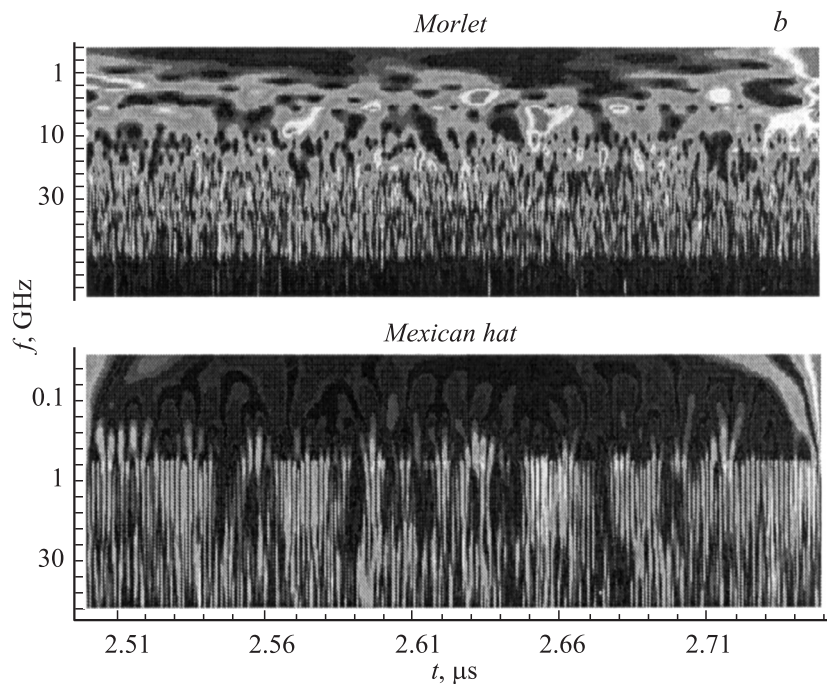


Рис. 2 (продолжение).

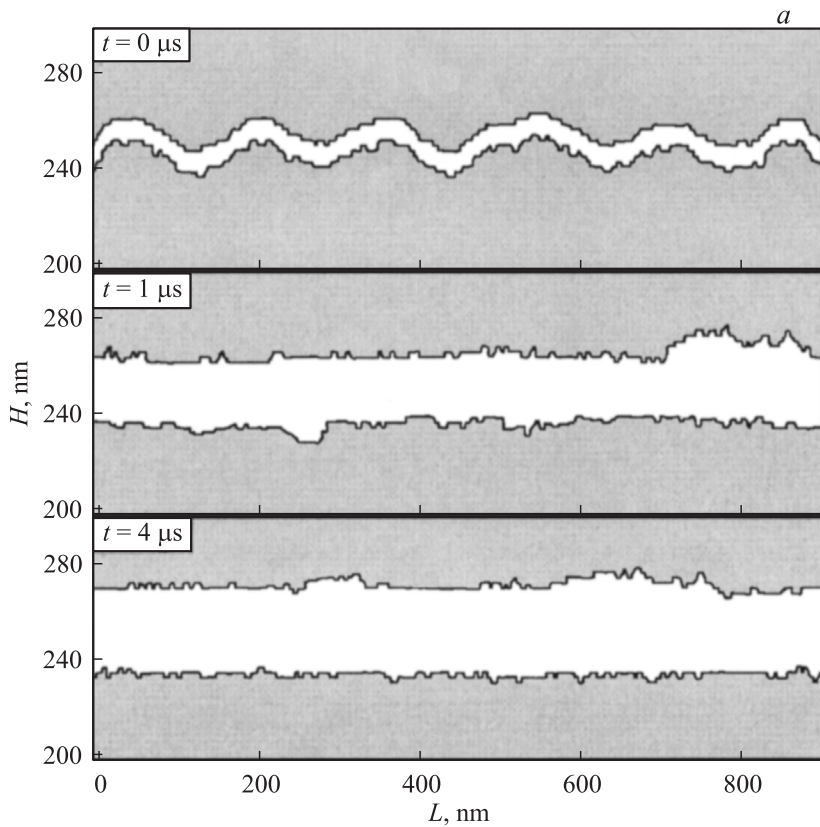
жение и высота которых изменяются со временем. Эти пики хорошо видны на спектрах Фурье регистраций  $V_X$ , построенных в различные интервалы времени (рис. 2, *a*). Для анализа изменения частоты сигнала во времени используются такие методы, как оконный метод Фурье и вейвлет-преобразование [13]. В некотором приближении данные рис. 2, *a* можно рассматривать как результат оконного преобразования Фурье с шириной окна  $1.3 \mu\text{s}$  и шагом, равным тоже  $1.3 \mu\text{s}$ . На рис. 2, *b* представлены вейвлет-преобразования регистрируемых данных для  $V_X$ . В качестве вейвлетов выбирались наиболее распространенные функции — „мексиканская шляпа“ и Морле. Ось ординат на вейвлет-изображениях представлена в безразмерных величинах, называемых масштабом  $a$ , обратно пропорциональных частоте  $f$ . Поэтому на приведенных изображениях область низких частот находится вверху,

а высоких — внизу. Ось абсцисс соответствует времени (номеру записи дискретного сигнала). На вейвлет-изображениях явно видны изменения сигналов во времени (соответственно по частоте и амплитуде). Причиной частотной модуляции упругих волн в модельной паре трения является изменение характерной высоты (а соответственно и собственной частоты) образца вследствие флуктуации „квазизидкого“ слоя [9], представляющего собой область автоматов, не связанных ни с одним из блоков (рис. 1, *b*). Это хорошо видно из формул расчета собственных частот блоков, в которые в качестве параметра входит его высота. Как отмечалось в [5], существует корреляция между коэффициентом трения и акустическими колебаниями, а именно, при уменьшении коэффициента трения уменьшается амплитуда акустических колебаний. Следовательно, амплитудную модуляцию регистрируемых при трении упругих волн можно объяснить флуктуацией мгновенного значения коэффициента трения, который является интегральной величиной механизма рассматриваемых процессов на „микроуровне“.

Дальнейший анализ результатов моделирования показал, что в процессе трения изменяется профиль поверхности, разделяющей „квазизидкий“ слой и „твердую“ часть образцов. Это позволило предположить, что наличие неидентифицированных пиков может быть обусловлено характерным размером шероховатостей таких профилей.

На рис. 3, *a* представлены профили поверхностей рассматриваемых пар трения, построенные в различные моменты времени. За основу алгоритма построения профиля поверхности, разделяющей „квазизидкий“ слой и „твердую“ часть образцов, брался алгоритм, предложенный в [10], который был модифицирован с целью сглаживания выступающих в „квазизидкий“ слой цепочек автоматов. Видно, что с увеличением времени взаимодействия (притирки) толщина слоя трения увеличивается, а поверхности блоков становятся более гладкими.

Наличие периодичности в профилях взаимодействующих поверхностей должно проявляться в соответствующих частотах упругих волн, возникающих при их относительном перемещении. Преобразование Фурье функций, огибающих профиль верхней  $f_u(x)$  и нижней  $f_d(x)$  поверхности дает нам „частотный спектр“ составляющих его микронеровностей. Далее, в зависимости от скорости движения верхнего и нижнего блоков относительно друг друга эти микронеровности будут контактировать друг с другом, с „квазизидким“ слоем и создавать упругие колебания соответствующей частоты. Эта частота может быть

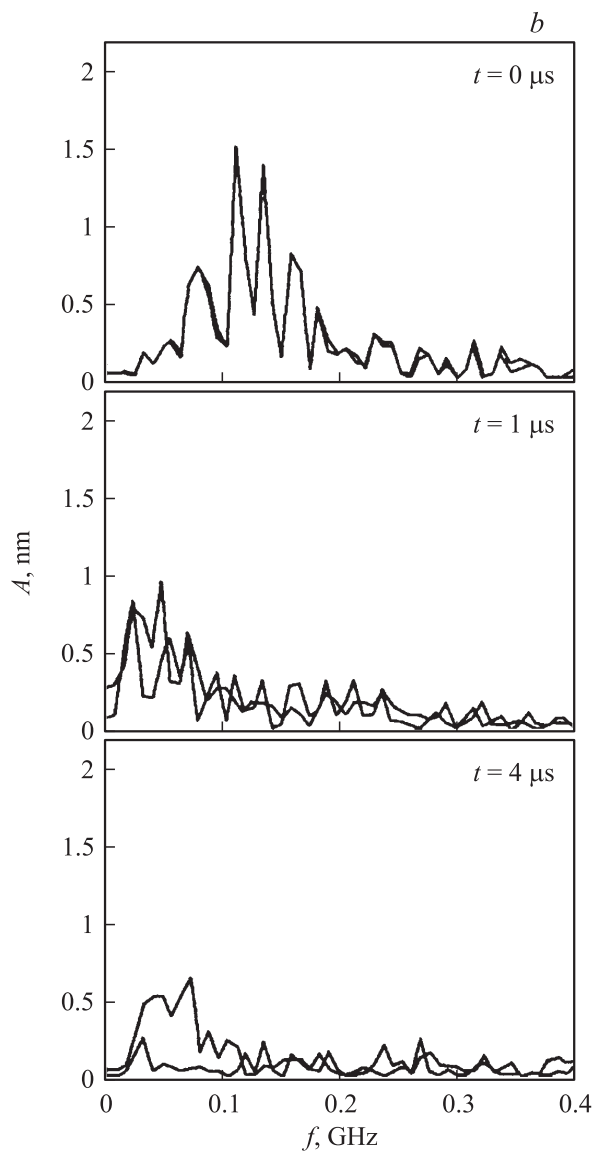


**Рис. 3.** Профили поверхностей верхнего и нижнего блоков в различные моменты времени  $t$  (а) и спектры Фурье ожидаемых частот в эти же моменты времени (б).

рассчитана по формуле  $f = v/l$ , где  $v$  — скорость движения блоков относительно друг друга,  $l$  — длина волны, соответствующей гармонике в Фурье-разложении.

Спектры Фурье-сигналов, которые будут соответствовать полученной в результате моделирования шероховатости поверхностей при заданной скорости движения, представлены на рис. 3, б. На них наиболее





**Рис. 3** (продолжение).

явно выделяются частоты, равные 70, 90, 110 и 160 МГц. Эти же частоты были обнаружены в спектрах данных датчиков модельных пар трения, представленных на рис. 2, а. Причем соответствие было более четким для регистраций давления и интенсивности напряжений.

Таким образом, в данной работе показано, что, несмотря на, казалось бы, случайный характер элементарных актов отделения частиц износа и их последующего приваривания в зоне трения, изменение профиля трущихся поверхностей приводит к частотной модуляции возникающих упругих волн. Это говорит о том, что процессы изнашивания происходят в соответствии с некоторыми закономерностями, которые могут быть изучены на основе анализа соответствующих акустических спектров.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ (грант № 07-08-00192-а), 13.13.3 Программы фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения и процессов управления РАН, интеграционного проекта СО РАН № 127 со сторонними организациями, а также CRDF в рамках программы BRNE (проект RUXO-016-TO-06).

## Список литературы

- [1] *Машков Ю.К., Овчар З.Н., Байбарицкая М.Ю., Мамаев О.А.* Полимерные композиционные материалы в триботехнике. М.: ООО „Недра-Бизнесцентр“, 2004. 262 с.
- [2] *Gardos M.N., Gabelich S.A.* // Tribology Letters. 1999. N 6. P. 79–86.
- [3] *Попов В.Л., Старчевич Я.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 7. С. 85–90.
- [4] *Колубаев А.В., Кроубаев Е.А., Вагин И.Н., Сизова О.В.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 19. С. 6–13.
- [5] *Колубаев Е.А.* Деформирование поверхностных слоев при трении и факторы, влияющие на трибологические свойства металлов: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2005. 139 с.
- [6] *Гриценко Б.П.* // Трение и износ. 2005. Т. 26. В. 5. С. 481–488.
- [7] *Свириденко А.И., Мышкин Н.К., Калмыкова Т.Ф., Холодилов О.В.* Акустические и электрические методы в триботехнике. Минск: Наука и техника, 1987. 280 с.
- [8] *Фадин Ю.А.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 15. С. 75–78.
- [9] *Popov V.L., Psakhie S.G., Dmitriev A.I., Shilko E.V.* // Wear. 2003. V. 254. N 9. P. 901–906.

- [10] *Дмитриев А.И., Смолин А.Ю., Попов В.Л., Псахье С.Г.* // Физ. мезомеханика. 2008. Т. 11. В. 4. С. 15–24.
- [11] *Смолин А.Ю., Коноваленко Иг.С.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 14. С. 34–41.
- [12] *Псахье С.Г., Смолин А.Ю., Стефанов Ю.П., Макаров П.В., Чертов М.А.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 17. С. 7–13.
- [13] *Мала С.* Вэйвлеты в обработке сигналов / Пер. с англ. М.: Мир, 2005. 671 с.