

05;08

## **Частотно-временной анализ акустических сигналов звукового диапазона, генерируемых при трении стали Гадфильда**

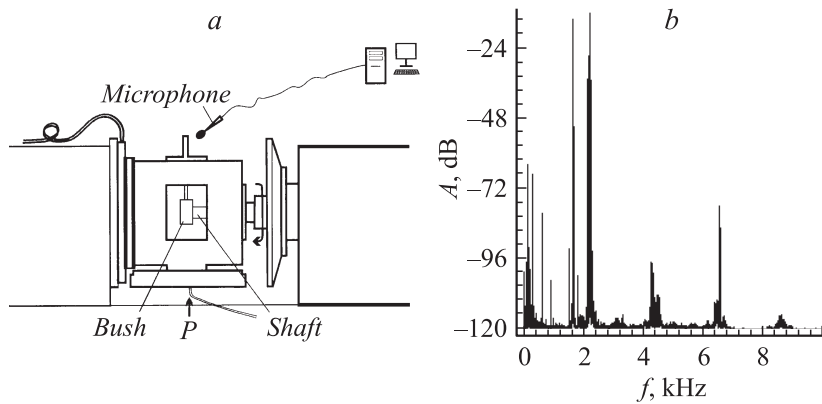
© С.А. Добрынин, Е.А. Колубаев, А.Ю. Смолин,  
А.И. Дмитриев, С.Г. Псахье

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск  
Томский государственный университет  
Томский политехнический университет  
E-mail: asmolin@ispms.tsc.ru

*В окончательной редакции 3 марта 2010 г.*

С помощью вейвлет-преобразования и оконного преобразования Фурье выполнен частотно-временной анализ звуковых волн, регистрируемых микрофоном при трении стали Гадфильда. Предложенная методика позволила установить связь между появлением квазипериодических всплесков интенсивности на регистрируемых акустических сигналах с процессами, отвечающими за формирование частиц износа. Показано, что частотно-временной анализ акустической эмиссии трибосистемы наряду с традиционными подходами может быть использован для исследования особенностей процесса изнашивания.

Изучению процессов, связанных с упругими колебаниями, генерируемыми при трении скольжения, в последние годы уделяется пристальное внимание [1–3]. Известно, что спектр акустических колебаний, генерируемых в паре трения, чрезвычайно разнообразен и труден для анализа. В первую очередь он представляет собой „смесь“ собственных частот различных составных элементов системы и узла трения в целом. В нем присутствуют также частоты случайной и периодической природы, звукового и ультразвукового диапазонов, которые зависят от режима скольжения и условий нагружения. Необходимо принимать во внимание суперпозицию упругих волн, излучаемых множеством отдельных пятен фактического контакта, возникающих при перемещении сопряженных поверхностей. При этом генерация этих волн может сопровождаться модуляцией, а их распространение — интерференцией. Эффективным



**Рис. 1.** Схема испытаний „вал-втулка“ с записью звука при трении (а) и спектр регистрируемого сигнала (b).

подходом при решении проблемы исследования акустических колебаний в триботехнических системах может стать использование различных средств частотно-временного анализа сигналов, в частности с использованием оконного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования. Так, в работе [4] в результате моделирования трения на уровне пятна контакта было показано, что Фурье-анализ упругих волн позволяет исследовать особенности формирования слоя трения в модельной системе. Кроме того, отмечалось, что акустические колебания при трении могут быть амплитудно- и частотно-модулированными, а поэтому для их изучения целесообразно применять частотно-временной анализ.

Целью данной работы было определение частотно-временной структуры акустического сигнала при трении стали Гадфильда, а также установление связи между параметрами сигнала и характеристиками процесса изнашивания.

Триботехнические испытания по типу „вал–втулка“ проводились на машине трения 2168 УМТ-1 (рис. 1, а). В данных испытаниях использовались образцы-втулки с внутренним диаметром 31.1 mm, внешним диаметром 39 mm, шириной 10 mm. Втулки были изготовлены из стали Гадфильда (110Г13Л). Сталь Гадфильда (0.9–1.4%С; 13.0% Mn; 0.8–1.0% Cr) обладает уникальными свойствами — высокой пластичностью, способностью к интенсивному деформационному упрочнению,

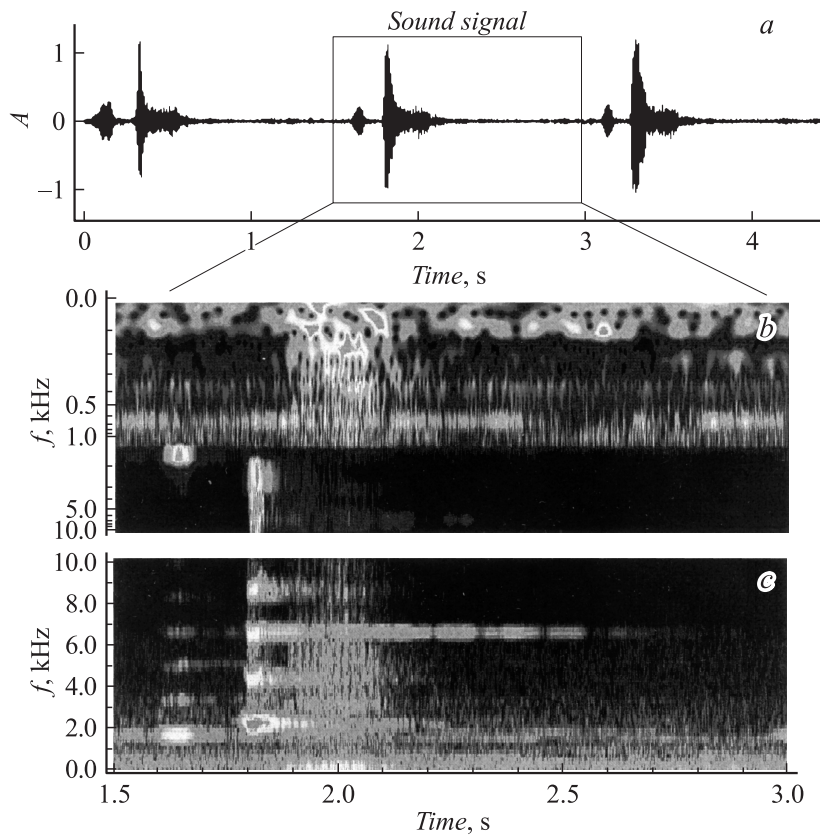
а также низкой скоростью изнашивания при трении скольжения. Для предотвращения проворачивания втулки в держателе была сделана выточка и выполнена фиксация винтом. Контртелом служили валы диаметром 30.0 mm из стали 42ХМ4Ф, термически обработанной на твердость 56 HRC. Скорость вращения составляла  $\sim 40 \text{ min}^{-1}$ , что соответствовало линейной скорости 0.067 m/s. Нагружение производилось с помощью пневмомеханизма через втулку для создания давления порядка 1–3 МПа в зоне контакта вала и втулки. Испытания проводились в условиях сухого трения.

Для регистрации звука применяли микрофон Behringer XM8500, у которого неравномерность амплитудно-частотной характеристики составляет  $\pm 5 \text{ dB}$  в интервале частот от 100 до  $1.5 \cdot 10^4 \text{ Hz}$ . Микрофон закреплялся на расстоянии 30 cm от узла трения. Звуковой сигнал и его параметры регистрировали на персональном компьютере.

На рис. 1, *b* показано Фурье-преобразование звукового сигнала, полученного на описанной выше установке [5]. Заметим, что в проведенных экспериментах микрофон регистрирует звуковые волны в воздухе, которые фактически являются колебаниями давления (продольными волнами). Естественно ожидать на этом спектре собственные частоты элементов экспериментальной установки. Однако сам спектр не позволяет ответить на вопрос, по каким причинам и в какие моменты времени в процессе эксперимента обусловлено возбуждение тех или иных частот системы.

Для ответа на этот вопрос воспользуемся средствами частотно-временного анализа и рассмотрим типичный звуковой сигнал (рис. 2, *a*). На нем видны квазипериодические всплески интенсивности колебаний, которые коррелируют с периодом вращения вала. В работе [6] было показано, что износ стали Гадфильда происходит в основном за счет окисления и разрушения поверхностного слоя. Также отмечалось, что в процессе трения на поверхности образца образуется наноструктурный слой толщиной  $\sim 5 \mu\text{m}$ , в котором локализуется и накапливается деформация. По мере накопления критической деформации происходит срыв наноструктурного слоя с формированием частиц износа. По-видимому, подобные срывы и вызывают резкое повышение интенсивности акустического сигнала, в том числе и в звуковом диапазоне.

На рис. 2, *b* представлено вейвлет-преобразование [7] регистрируемого сигнала. Оно показывает, что всплески интенсивности акустических колебаний происходят на фоне некоторого постоянного сигнала,



**Рис. 2.** Звуковой сигнал (a), его вейвлет-преобразование (b) и оконное преобразование Фурье (c).

который имеет однородную структуру. Частоты этого фонового сигнала лежат в диапазоне от 10 до 900 Hz, а сами колебания являются амплитудно-модулированными некоторым непериодическим сигналом. Если учесть, что собственные частоты  $p$  простых однородных тел (стержень, пластина) связаны с их характерными размерами  $l$  и скоростью звука  $v$  как  $p \sim v/l$  [8], то можно заключить, что фоновые колебания соответствуют собственным частотам элементов здания (стены, балки,

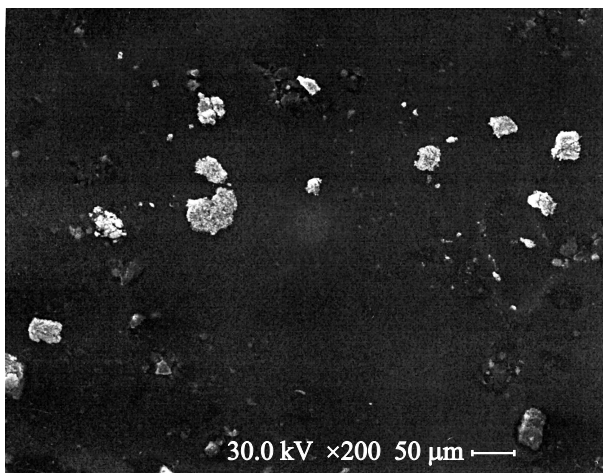
перекрытия), а также массивных частей установки. Следует отметить, что колебания этого диапазона наблюдаются при работе установки и без узла трения и в дальнейшем нами не рассматривались.

Оконное преобразование Фурье регистрируемого сигнала представлено на рис. 2, *с*. Вследствие линейного масштаба частот здесь удобнее анализировать высокочастотную составляющую сигнала. Однако ограничение пакета „LastWave“ [9], применяемое для анализа сигналов, не дает возможности увидеть из оконного преобразования Фурье детальные временные особенности фонового сигнала в области низких частот, которые видны на вейвлет-изображениях рис. 2, *б*.

Что касается самих всплесков интенсивности акустических колебаний, то они имеют более высокую частоту и их спектр не перекрывается со спектром фона (рис. 2). Типичные частоты этих всплесков — 1.7 kHz для первого и 2.2, 4.4, 6.6, 8.6 kHz для второго. Для различных давлений прижимающей нагрузки эти частоты отличаются незначительно (до 5%). Следует отметить также корреляцию частот всплесков с собственными частотами таких элементов экспериментальной установки, как держатель втулки и вал с контртелом.

Как отмечалось выше, резкое повышение интенсивности акустического сигнала, возможно, связано с разрушением поверхностного наноструктурного слоя. На рис. 3 представлено электронно-микроскопическое изображение получаемых частиц износа стали Гадфильда. Видно, что по характерному размеру их можно разделить на две группы: малые частицы оксида железа со средним размером  $d = 1-3 \mu\text{m}$  и крупные частицы стали, иногда покрытые слоем оксида, со средним размером  $d = 30-40 \mu\text{m}$ . При движении с относительной скоростью  $V$  поверхностей с характерным размером шероховатостей, соответствующим крупным частицам износа, будут происходить множественные соударения, вызывающие генерацию упругих волн, с частотой  $p = V/d$ . Принимая во внимание скорость относительного движения  $V = 0.067 \text{ m/s}$ , частота упругих колебаний будет  $\sim 1.7$  и  $\sim 2.2 \text{ kHz}$ , что соответствует основным частотам первого и второго всплесков интенсивности акустического сигнала. Остальные наблюдаемые частоты можно интерпретировать как гармоники более высоких порядков.

Таким образом, предложенная в работе методика, основанная на частотно-временном анализе акустических колебаний, позволила на примере Гадфильда установить связь между появлением квазипериодических всплесков интенсивности акустической эмиссии при трении



**Рис. 3.** Частицы износа стали Гадфильда при трении скольжения.

скольжения с процессами, отвечающими за формирование частиц износа. Полученные результаты открывают возможность использования частотно-временного анализа акустической эмиссии как дополнительного аппарата для исследования особенностей процесса изнашивания наряду с традиционными подходами.

В заключение отметим, что экспериментальные акустические сигналы, получаемые при трении, являются достаточно сложными для анализа и содержат разнородную информацию даже в звуковом диапазоне. В связи с этим для более глубокого понимания структуры спектра таких сигналов следует привлекать средства компьютерного моделирования, в рамках которого можно детально исследовать процессы, протекающие в пятнах контакта, и анализировать влияние отдельных факторов на акустический спектр излучаемых упругих волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ (№ 07-08-00192-а, 09-03-12039-офи\_м), Программы фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения и процессов управления РАН № 13.13.3, интеграционного проекта СО РАН № 127 со сторонними организациями, а также CRDF в рамках программы BRHE (проект RUX0-016-TO-06).

## Список литературы

- [1] Баранов В.М., Кудрявцев Е.М., Сарычев Г.А., Щавелин В.М. Акустическая эмиссия при трении. М.: Энергоатомиздат, 1998. 256 с.
- [2] Кристал М.М., Мерсон Д.Л., Чугунов А.В. // Тяжелое машиностроение. 2007. № 12. С. 14–18.
- [3] Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф., Бенин А.В. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 2. С. 31–35.
- [4] Смолин А.Ю., Коноваленко Иг.С. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 14. С. 34–41.
- [5] Колубаев А.В., Иванов Ю.Ф., Сизова О.В., Колубаев Е.А., Алешина Е.А., Громов В.Е. // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 2. С. 63–70.
- [6] Иванов Ю.Ф., Алешина Е.А., Колубаев Е.А., Колубаев А.В., Сизова О.В., Громов В.Е. // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 6. С. 83–90.
- [7] Мала С. Вэйвлеты в обработке сигналов / Пер. с англ. М.: Мир, 2005. 671 с.
- [8] Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высш. школа, 1980. 408 с.
- [9] Welcome to LastWave's Home Page [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://www.cmap.polytechnique.fr/~lastwave/>. — 10.06.2009.