

05.1;08

## Генерация звука при трении скольжения

© А.В. Колубаев, Е.А. Колубаев, И.Н. Вагин, О.В. Сизова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск  
E-mail: root@ispms.tomsk.ru

*В окончательной редакции 1 апреля 2005 г.*

Изучалась генерация звука при трении скольжения в отсутствие смазки. Одновременно с параметрами звука измеряли коэффициент трения. Установлена корреляция между силой звука, спектром звучания трибоузла и коэффициентом трения. Показано, что не только триботехнические свойства материалов влияют на характеристики звукового сигнала, но и возможно обратное влияние — устранение упругих колебаний в сопряжении, сопровождающихся звуком, приводит к снижению коэффициента трения.

При определенных условиях трения скольжения в сопряжении возникают вибрации или генерируется звук, воспринимаемый как шум, скрип или визг. Применяя специальную аппаратуру, можно зафиксировать и ультразвуковые сигналы [1], которыми сопровождается трение. Все перечисленные эффекты относятся к упругим колебаниям, возникающим в паре трения при относительном перемещении сопряженных поверхностей. Природа появления упругих колебаний при трении изучается в механике давно и к настоящему времени основной причиной, обуславливающей эти колебания, считается ниспадающая зависимость коэффициента трения при увеличении скорости скольжения [2]. Однако механика не указывает на причину снижения коэффициента трения при возрастании скорости скольжения. Существуют предположения, что за возникновение упругих колебаний ответственна флуктуирующая сила трения, которая может быть индуцирована деформацией шероховатостей или их адгезионным взаимодействием с сопряженной поверхностью, а также отделением частиц износа [3–6]. При этом коэффициент трения, который определяет соотношение между силой трения и нормальной нагрузкой, может изменяться. И не исключено, что это изменение будет таким, которое характерно для возбуждения колебаний трибосистемы. На связь упругих колебаний с износом указывают авторы работы [7], которые делают вывод о том, что уровень звука при фреттинг-процессе тем выше, чем больше износ. Снижение

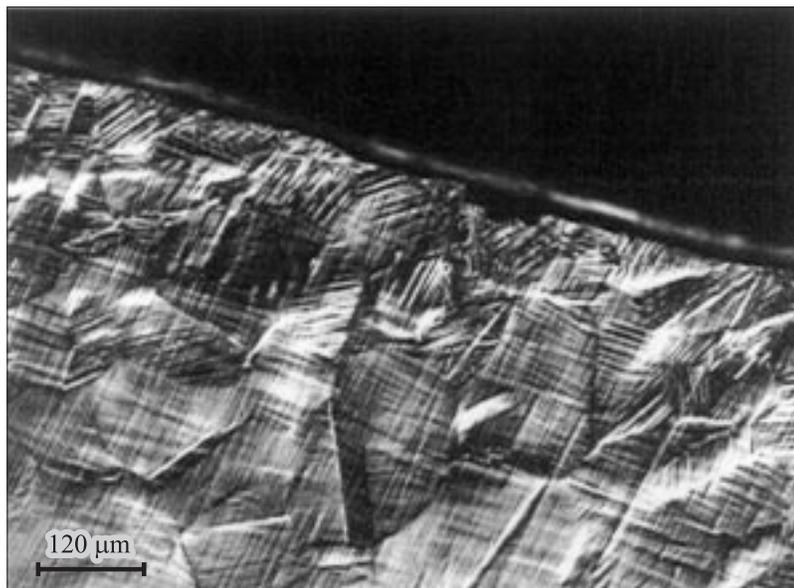
величины износа при устранении ультразвуковых колебаний в паре трения выявлено в работе [8].

Таким образом, можно считать, что упругие колебания, в том числе сопровождающиеся акустоэмиссией, обусловлены триботехническими свойствами материалов, составляющих пару трения — интенсивностью износа и коэффициентом трения. Иной аспект, связанный с возбуждением упругих колебаний при трении скольжения, а именно, их влиянием на характеристики трения, в литературе не обсуждается. Лишь в упоминавшейся выше работе [8] установлено снижение износа на стадии приработки при обеспечении демпфирования образца акустопоглощающими прокладками, исключающими возбуждение ультразвуковых колебаний.

В предлагаемой статье представлены результаты исследований сухого трения скольжения и связанное с ним возбуждение колебаний трибосистемы в области звуковых частот. Сравнивали коэффициент трения, силу и спектр звука. Испытания проводили на машине трения 2168 УМТ по схеме „вал–втулка“ при нагрузках от 250 до 2500 N, с частотой вращения  $0.7 \text{ s}^{-1}$  и продолжительностью 6 h. Втулки из стали Г13 имели внутренний диаметр 31.1, 31.2, 31.3 mm и высоту 10, 20 и 30 mm; сопряженный вал  $\varnothing 31.0 \text{ mm}$  был изготовлен из стали 42ХМ4Ф, термически обработанной на твердость 56 HRC. Втулки и валики были изготовлены по второму классу точности с предельным отклонением по диаметру для втулок —  $\Delta = +25 \mu\text{m}$ , для валиков —  $\Delta = -25 \mu\text{m}$ .

При анализе звукового сигнала использовали стандартную программу цифровой обработки, запись звука и его параметры регистрировались на компьютере. Применяли микрофон ХМ8500, у которого неравномерность амплитудно-частотной характеристики составляет  $\pm 5 \text{ dB}$  в интервале частот от 100 до  $1.5 \cdot 10^4 \text{ Hz}$ . Информация о величине момента силы трения считывалась с датчика через каждую секунду.

Для определения влияния колебаний трибосистемы, сопровождающихся звуком, на коэффициент трения нами было смонтировано специальное устройство для крепления образца и контртела. Устройство допускало установку демпфирующих втулок с внешней, с внутренней или с обеих сторон сопряжения, что позволяло изменять параметры высокочастотных колебаний трибоузла при испытании. При этом звук являлся индикатором работы сопряжения, по нему судили об эффективности демпфирования. Основной целью исследований с использованием



**Рис. 1.** Боковая поверхность втулки в зоне трения после испытаний с устройством, снижающим интенсивность звука при трении.

такого узла было стремление обеспечить варьирование параметрами автоколебаний трибосопряжения при сохранении режимов и условий контактирования. Исследуемые при данных испытаниях втулки имели диаметр 31.2 mm, высоту  $L = 10$  и 20 mm. Нагрузку задавали 300 и 250 N соответственно.

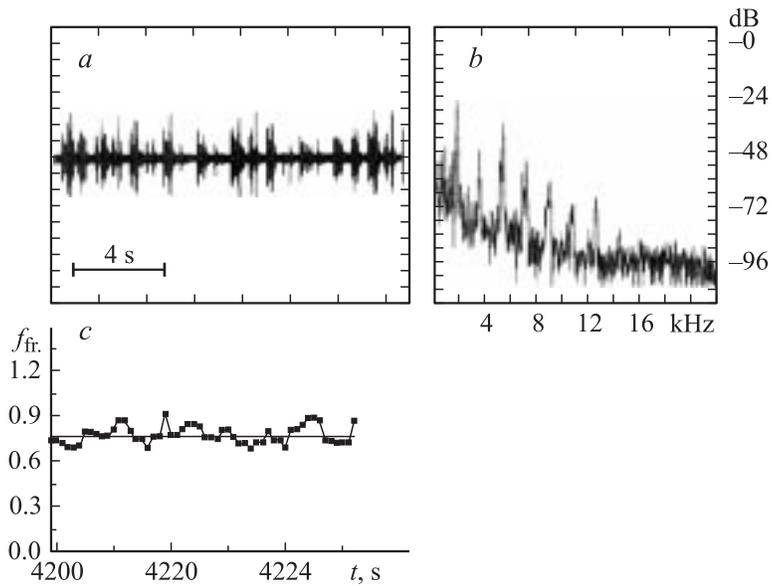
Известно [9,10], что сталь Гадфильда (Г13) обладает высокой износостойкостью, которая обусловлена ее способностью к чрезвычайно интенсивному упрочнению при пластической деформации в слое толщиной до  $50 \mu\text{m}$ . На рис. 1 показана предварительно полированная боковая поверхность втулки в зоне трения после испытаний в течение 6 часов. Видно, что деформация осуществляется на значительно большей глубине, чем указано в цитированной литературе. При всех испытаниях деформационный рельеф на боковой поверхности имел тот же вид, что и на рис. 1, а его глубина зависела только от нагрузки, применялись ли демпфирующие втулки или нет. Следует отметить, что

статическое давление такой же величины, как и при трении (немногом более 1 МПа), не оставляет видимых следов деформирования. Деформация поверхностного слоя, толщина которого достигала 700 мкм, вызвана исключительно упругими возбуждениями. То, что глубина деформационного рельефа оказалась одинаковой как при применении демпфера, так и без него, свидетельствует о значительно большем частотном диапазоне возбуждений, генерируемых при трении, чем регистрируется посредством микрофона. Кроме того, демпфирующее устройство, возможно, изменяет спектр упругих колебаний — устраняя их в одном частотном диапазоне и вызывая появление в другом, не воспринимаемом микрофоном.

Износ втулок после испытаний с применением демпфера или без него определяли по площади контактирования, точнее, по длине дуги, по которой контактировали вал и втулка. Например, длина данной линии у втулок высотой 10 мм (при нагрузке 300 N) была в пределах 25–30 мм и никакой закономерности влияния демпфирующего устройства выявлено не было. Однако при сопоставлении звукового сигнала и коэффициента трения наблюдали корреляцию между силой и спектром звука и коэффициентом трения. Поэтому дальнейшие исследования были сосредоточены на этих характеристиках.

Прежде всего, проведенные испытания на трение скольжения подтвердили имеющиеся в научной литературе представления о зависимости силы звука от величины коэффициента трения ( $f_{fr}$ ). При всех вариантах испытаний было установлено, что уменьшение  $f_{fr}$  ведет к снижению уровня звучания пары трения. Сам же коэффициент трения уменьшался при увеличении давления в зоне трения, которое варьировали либо размерами втулок, либо изменением внешней нагрузки на трибосопряжение. Следует отметить особенность, которая была выявлена при изучении спектра звукового сигнала — по мере увеличения нагрузки снижаются не только коэффициент трения и интенсивность звука, но и уменьшается число характеристических частот звучания.

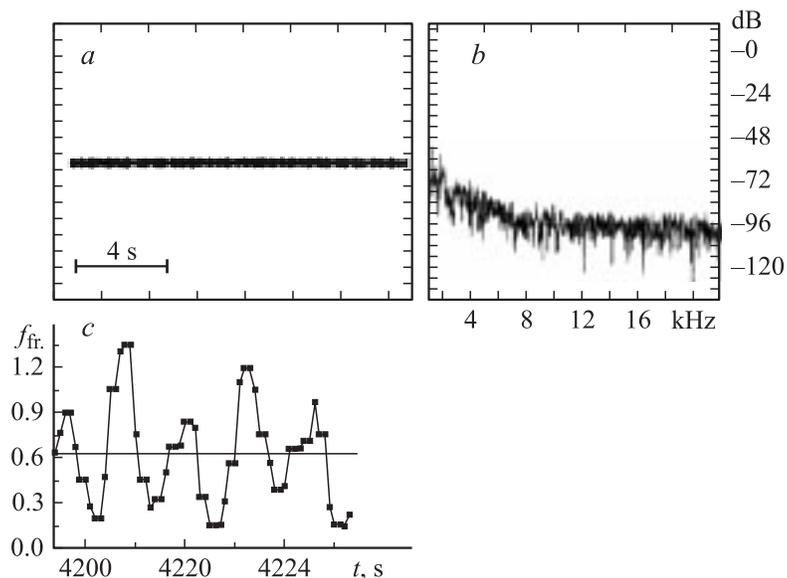
На рис. 2 представлены результаты записи звука и значения коэффициента трения при обычных испытаниях, когда трение скольжения сопровождается генерацией звука. Данные приведены для втулки диаметром 31.2 мм и  $L = 20$  мм при нагрузке 250 N. Звук возбуждается периодически с частотой, равной  $\sim 1.5 \text{ s}^{-1}$ , о чем свидетельствует амплитуда звукового сигнала, показанная на рис. 2, *a*. Спектр звучания (рис. 2, *b*) состоит из набора гармоник, каждая из которых, по-видимому,



**Рис. 2.** Зависимость амплитуды колебаний звуковой волны от времени (*a*) в произвольных единицах, спектр звука (*b*) при трении втулки  $\varnothing 31.2$  mm и соответствующий им коэффициент трения (*c*).

отвечает за возбуждение отдельных частей трибосопряжения, включая элементы машины трения. При этом характер звучания, сила и спектр акустического сигнала не изменялись в течение всего времени испытаний. На рис. 2, *c* показана зависимость коэффициента трения от времени, который изменяется около среднего значения случайным образом с малой амплитудой.

Применение специального узла крепления образца и контртела значительно снизило силу звука (рис. 3, *a*) и изменило спектр звучания данной пары трения (рис. 3, *b*). Исчезли резонансные частоты, а уровень звука лишь незначительно превысил порог слышимости ( $-120$  dB). Такое изменение параметров звучания трибоузла при сохранении условий испытаний (контактирования) не могло не сказаться на коэффициенте трения. Действительно, его среднее значение снизилось (рис. 3, *c*) по сравнению с показанным на рис. 2, *c*. Кроме того, изменение  $f_{fr}(t)$



**Рис. 3.** Зависимость амплитуды колебаний звуковой волны от времени (*a*) в том же масштабе, что и на рис. 2, спектр звука (*b*) и коэффициент трения (*c*) при испытании втулки ( $\varnothing 31.2$  mm) с устройством, снижающим интенсивность звука при трении.

имеет ярко выраженный периодический характер с амплитудой, значительно превышающей флуктуации данной величины, показанной на рис. 2, *c*. Сравнение коэффициента трения, представленного на рис. 3, *c* с аппроксимирующей синусоидальной кривой показало их хорошее совпадение, коэффициент корреляции  $r = 0.87$ . Подсчитанный таким же образом коэффициент корреляции для кривой, представленной на рис. 2, *c*, оказался равным  $r = -0.25$ . Период колебаний коэффициента трения на рис. 3, *c* в несколько раз превосходит время одного оборота втулки, поэтому такое изменение нельзя связать с частотой вращения вала испытательной машины и с ее конструктивными особенностями. Подобное периодическое изменение коэффициента трения, наблюдавшееся нами и при других испытаниях износостойких сталей, скорее всего, обусловлено периодичностью процесса изнашивания, на кото-

рое указывают и в других работах [5]. Изнашивание характеризуется стадией накопления дефектов в поверхностном слое, когда деформация приводит к упрочнению материала, и стадией интенсивного разрушения этого слоя с отделением частиц износа. Отсутствие периодичности в изменении коэффициента трения при испытаниях с обычным креплением трибоузла может быть связано с иным характером изнашивания, когда длительность стадий изнашивания случайным образом изменяется из-за упругих напряжений, вызванных колебаниями элементов трибосопряжения. О возможности подобного влияния упругой волны можно судить по результатам математического моделирования процесса трения [6], когда элементарный акт пластического сдвига на поверхности происходил при достижении фронтом упругой волны этой поверхности. В этом случае напряжение трения и напряжение, связанное с упругой волной, складываются, вызывая пластическую деформацию на поверхности.

Отмеченная выше корреляция между интенсивностью звука при трении скольжения и коэффициентом трения при испытаниях стали Г13 имела место неоднократно при разных нагрузках в сопряжении, при применении специальных держателей образцов и без них. Можно предположить, что величина коэффициента трения определяется не только физико-химическим взаимодействием сопряженных плоскостей, но и энергетическими потерями, связанными с возбуждением высокочастотных колебаний. Таким образом, испытания показали, что на возбуждение колебаний, сопровождающихся звуком, и на коэффициент трения влияет давление в зоне контактирования, а также конструкция узла трения. В ряде случаев коэффициент трения уменьшается при устранении упругих колебаний в трибосопряжении.

Авторы благодарны доктору-инженеру Фольцу (Dr.-Ing. Folz) и В.Л. Попову за инициирование данной работы и любезно предоставленные образцы для исследований.

## Список литературы

- [1] Свириденко А.И., Мышкин Н.И., Калмыкова Т.Ф., Холодилов О.В. Акустические и электрические методы в триботехнике. Минск: Наука и техника, 1987. 280 с.
- [2] Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Браун Э.Д., Буше Н.А., Буяновский И.А. и др. / Под ред. Чичинадзе А.В.: Учебник для технических вузов. М.: Центр „Наука и техника“, 1995. 778 с.

- [3] *Бородич Ф.М., Крюкова И.В.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 6. С. 67–73.
- [4] *Chen G.X., Zhou Z.R.* // Wear. 2003. N. 255. P. 376–384.
- [5] *Фадин Ю.А., Лексовский А.М., Гинзбург Б.М., Булатов В.П.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 5. С. 10–13.
- [6] *Рубцов В.Е., Колубаев А.В.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 11. С. 63–69.
- [7] *Jibiki T., Shima M., Akita H., Tamura M.* // Wear. 2001. N. 251. P. 1492–1503.
- [8] *Гриценко Б.П., Круковский К.В., Кашин О.А.* // Физическая мезомеханика (спец. выпуск). Ч. 1. 2004. С. 415–418.
- [9] *Кориунов Л.Г., Богачев И.Н., Аверин Ю.И.* и др. // ФММ. 1980. Т. 49. В. 1. С. 113–120.
- [10] *Кориунов Л.Г.* // ФММ. 1992. Т. 73. В. 8. С. 3–21.