

05;08

## Анализ акустической эмиссии при трении скольжения высокомарганцевистой стали

© Е.А. Колубаев, А.В. Колубаев, О.В. Сизова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

E-mail: root@ispms.tomsk.ru

Томский политехнический университет

E-mail: fvtn@tpu.ru

Поступило в Редакцию 19 марта 2010 г.

Изучали акустическую эмиссию при трении стали X120Mn12<sup>1</sup>. Измеряли коэффициент трения скольжения в отсутствие смазки и регистрировали параметры акустической эмиссии. Установлена взаимосвязь между спектром акустической эмиссии и коэффициентом трения.

Основная задача современной трибологии — изучение процессов, происходящих в зоне трения сопряженных материалов. Детальное экспериментальное исследование этих процессов является непростой задачей, поскольку зона контакта при трении практически недоступна для непосредственного изучения. В связи с этим актуален поиск новых методов анализа, которые могут дать информацию не только о физике процессов трения, но и о реальном ресурсе работы трибосопряжения и быть полезными при разработке износостойких покрытий и материалов.

Современные представления о природе трения свидетельствуют о том, что этот процесс не является стационарным. При скольжении двух тел относительно друг друга происходит схватывание, срыв и срез микронеровностей трущихся поверхностей. При этом в глубь материала распространяются упругие волны, которые могут вызывать изменения структуры на некоторой глубине поверхности и разрушение. При трении металлических материалов износ носит преимущественно усталостный характер, т.е. отделение дефектного слоя происходит постепенно, и только через определенный промежуток времени значительная часть поверхности трения разрушается. После этого начинается новый процесс деградации структуры, который последовательно проходит этапы формирования дефектного слоя, образования и роста

<sup>1</sup> В стандарте DIN EN.

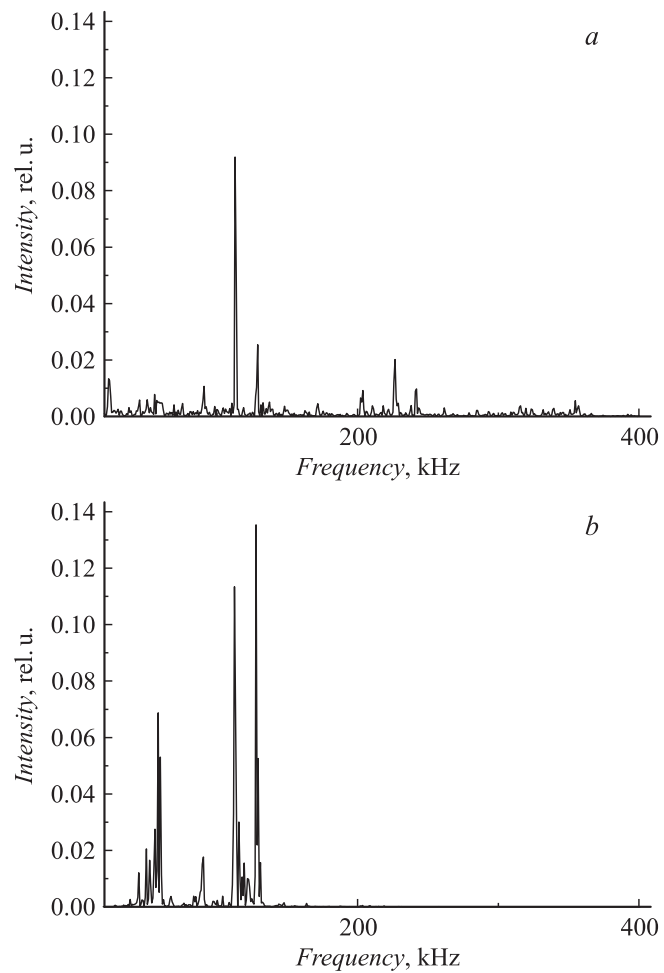
несплошностей с последующим отделением частиц износа [1–3]. Следует подчеркнуть, что деформирование поверхностного слоя, разрушение и удаление отдельных его участков сопровождается возбуждением упругих колебаний трибосистемы. Последнее обстоятельство позволяет воспользоваться методом акустической эмиссии (АЭ) для исследования эволюции структуры поверхностного слоя и последующего его разрушения. Действительно, в работах [2,3] методом акустической эмиссии было показано, что изнашивание представляет собой периодический процесс, который характеризуется последовательностью событий накопления дефектов, образования деформированного поверхностного слоя и его разрушения. Регистрация акустических сигналов позволяет с высокой точностью определить время происходящих событий, которые включают в себя упругое взаимодействие микровыступов сопряженных поверхностей, образование и разрушение адгезионных связей, появление микротрещин и отделение частиц износа. К сожалению, соотнести тип акустического сигнала с тем или иным событием чрезвычайно трудно. Для описания последовательности деградации поверхностного слоя требуется детальный анализ всех сигналов акустической эмиссии и сопоставления их с трибологическими параметрами процесса трения.

В предлагаемой статье представлены результаты исследований особенности трения высокомарганцевистой стали X120Mn12 (сталь Гадфильда) и связанное с ним возбуждение колебаний трибосистемы в области ультразвуковых частот. Испытания проводили на триботестере фирмы TRIBOtechnic по схеме „палец–диск“ при нагрузке 2 и 3 Н, с линейной скоростью скольжения 0.1 м/с. Диски из стали X120Mn12 имели диаметр 39 мм, роль пальца выполнял индентор в виде шарика из стали 100Cr6<sup>1</sup>, термически обработанной на твердость 62 HRC. Сравнивали коэффициент трения (диаграмму трения) и спектр акустоэмиссионного сигнала.

Сигналы акустической эмиссии записывали с помощью модуля регистрации акустической эмиссии ЭЯ-1 производства Тольяттинского государственного университета, который позволяет сохранять и анализировать сигналы АЭ.

Анализ временных зависимостей медианной частоты<sup>2</sup> акустического сигнала и коэффициента трения при испытании с нагрузкой 2Н выявил ряд особенностей этих зависимостей, по которым можно судить о

<sup>2</sup> Медианная частота ( $f_{med}$ ) — частота, делящая площадь под кривой спектральной плотности энергии ( $G(f)$ ) на две равные части.



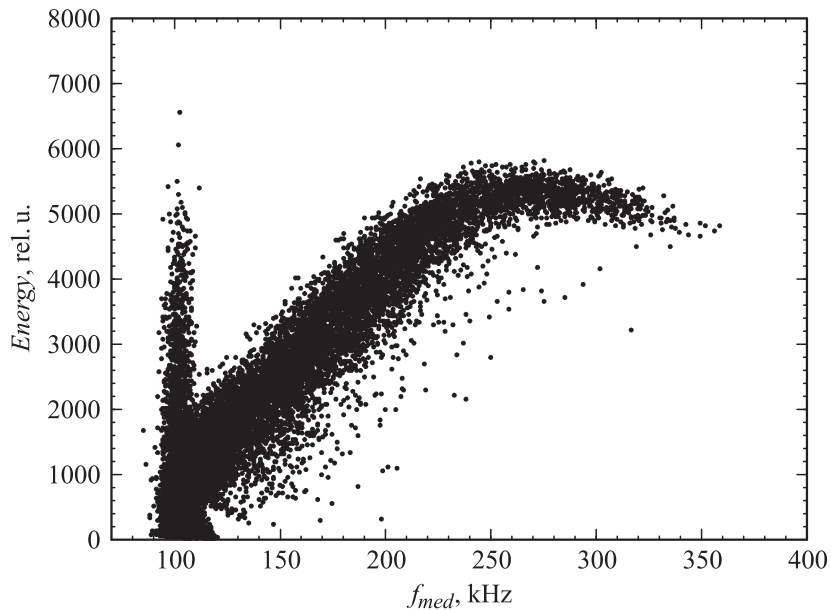
**Рис. 1.** Спектр сигналов акустической эмиссии при возрастании (*a*) и падении (*b*) коэффициента трения.

характере процесса трения. На первом этапе испытаний величина коэффициента трения изменяется незначительно и не превышает 0.2, что свидетельствует о стационарном режиме трения. Далее процесс изменяется, что характеризуется возрастанием величины коэффици-

ента трения, сопровождающимся его колебаниями непериодического характера, которые, по нашим наблюдениям, обусловлены адгезионным взаимодействием сопряженных поверхностей, повышенным износом образца и контртела. С изменениями коэффициента трения связаны такие же изменения и медианной частоты. Изучение спектров акустической эмиссии, соответствующих разным этапам этого процесса, показал, что возрастание медианной частоты обусловлено появлением в спектре „высокочастотной“ составляющей (рис. 1, *a*), тогда как другие стадии, за исключением начальной, характеризуются спектром АЭ только в области относительно низких частот (рис. 1, *b*).

В работе [4] возрастание силы трения и скорости счета АЭ связывают с разрушением и удалением поверхностного слоя. Максимум интенсивности скорости счета АЭ достигается при кататрофическом разрушении поверхности, после чего скорость счета АЭ резко уменьшается. Наши исследования показали, что интенсивность счета акустических сигналов коррелирует с изменениями медианной частоты, максимумы которой отражают моменты разрушения поверхностного слоя в трибоконтакте. Можно предположить, что и разрушение поверхности образца и разрушение контртела сопровождаются соответствующим акустическим сигналом. Однако только по интенсивности счета или по изменениям медианной частоты нельзя достоверно разделить эти процессы. Для этого необходим комплексный анализ всех параметров акустической эмиссии.

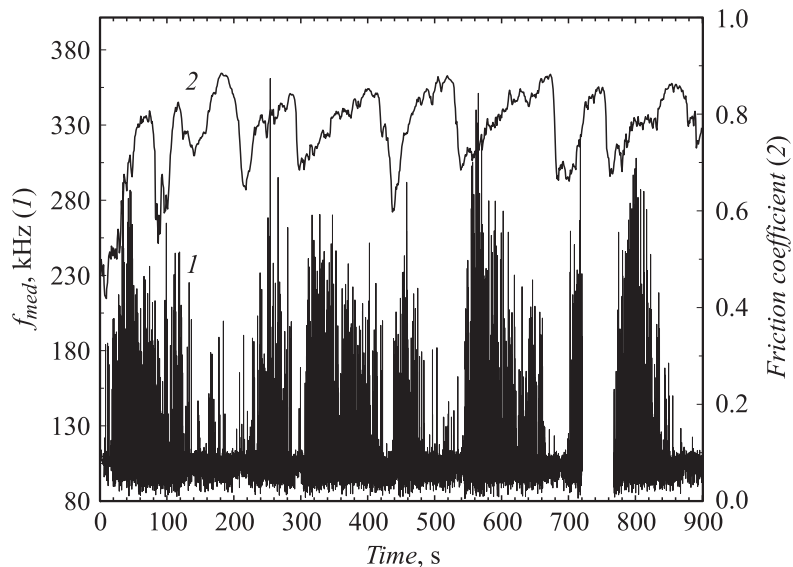
В этой связи интересно проанализировать зависимость энергии акустического сигнала ( $\int_0^{f_{\max}} G(f)df$ ) от медианной частоты. Как следует из (рис. 2), точки на экспериментальной кривой разделились на две группы. Это свидетельствует о том, что в зоне трения преобладают два процесса, протекающие в разных частотных интервалах. Одному из этих процессов соответствует больший частотный интервал акустических сигналов и большая плотность точек во всем интервале частот. Второй процесс характеризуется узким частотным интервалом в „низкочастотной“ области. Существование двух областей на данной зависимости объясняется тем, что основу спектра всех сигналов акустической эмиссии определяет суперпозиция колебаний от одновременно протекающих в контакте процессов, таких как пластическое деформирование, микрорезание, образование и разрыв адгезионных мостиков сварки и т.д. Поэтому вид спектра в различных группах определяется



**Рис. 2.** Зависимость энергии акустического сигнала от медианной частоты при нагрузке на индентор 2 Н.

процессом, доминирующим в определенный момент времени. Можно также предположить, что разделение акустических сигналов на два кластера (две группы) обусловлено различным излучением ультразвука контролем и образцом в результате деградации поверхностного слоя.

При увеличении нагрузки до 3 Н изменение коэффициента трения принимает периодический характер (рис. 3, кривая 2), причем период не зависит от частоты вращения диска и в процессе испытания изменяется от 70 до 150 с. Как следует из рисунка, фаза роста коэффициента трения охватывает больший промежуток времени, чем этап его падения. Если предположить, что периодическое изменение коэффициента трения связано с таким же периодическим изменением структуры поверхностного слоя, то можно объяснить возрастание коэффициента трения постепенным формированием на поверхности образца дефектного слоя, а быстрое его снижение лавинообразным разрушением этого слоя. Периодичность изменения коэффициента трения указывает на то, что



**Рис. 3.** Зависимость медианной частоты сигнала (1) и коэффициента трения (2) от времени при нагрузке на индентор 3 Н.

процесс разрушения поверхностей трения образца и контртела либо совпадают по фазе, либо один из них значительно превосходит другой по интенсивности.

Представляет интерес и обнаруженное периодическое изменение параметров сигнала АЭ (рис. 3, кривая 1). Такую корреляцию между коэффициентом трения и акустическим откликом системы можно объяснить периодическим изменением фактической площади касания в процессе трения. При увеличении площади касания, по мере приработки сопряженных поверхностей из-за пластической деформации, коэффициент трения и АЭ возрастают, а при лавинообразном разрушении поверхностного слоя вследствие уменьшения площади касания величина коэффициента трения и интенсивность акустического сигнала снижаются. При справедливости этих рассуждений такое поведение перечисленных параметров косвенно указывает на преобладание адгезионной составляющей в силе трения. Изучение зависимости энергии от медианной частоты АЭ при нагрузке 3 Н показало, что ее вид

подобен аналогичной зависимости в предыдущем случае, что также свидетельствует о протекании в зоне трения двух процессов, имеющих различную природу. Однако в этом случае разделение сигналов на два кластера менее выражено. Высокая плотность сигналов наблюдается в области „низких“ частот, тогда как „высокочастотная“ ветвь более разрежена по сравнению с испытаниями при нагрузке 2 Н. Чтобы сопоставить параметры АЭ с процессами деградации структуры поверхностей трения сопряженных твердых тел, необходимы комплексные исследования акустической эмиссии, структуры поверхностных слоев и частиц износа, которые планируется провести в дальнейшем.

Таким образом, в работе установлена взаимосвязь между параметрами сигналов акустической эмиссии и характером трения и изнашивания стали X120Mn12. Обнаружено, что возрастание медианной частоты акустических сигналов обусловлено появлением высокочастотных составляющих в спектре сигнала, которые появляются на этапе формирования поверхностного слоя, что также сопровождается возрастанием коэффициента трения. При лавинообразном разрушении поверхностного слоя с отделением частиц износа происходит резкое падение коэффициента трения, медианной частоты и энергии акустических сигналов. Проведенные исследования показали, что для применения метода акустической эмиссии для диагностики и контроля процессов трения и изнашивания в трибосопряжениях необходим анализ различных параметров АЭ, которые предварительно должны быть сопоставлены с этапами эволюции структуры поверхностного слоя.

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.

## Список литературы

- [1] *Фадин Ю.А.* // Трение и износ. 2008. Т. 29. № 1. С. 29–32.
- [2] *Фадин Ю.А.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 15. С. 75–78.
- [3] *Козырев Ю.П., Седакова Е.Б.* // Трение, износ, смазка [www.tribo.ru](http://www.tribo.ru). 2007. Т. 9. № 1 (30).
- [4] *Дубравин А.М., Комков О.Ю., Мышкин Н.К.* // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 4. С. 363–367.