

УДК 620.179.16

ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ СТАЛИ ГАДФИЛЬДА

Е.А. Колубаев*, О.В. Сизова, С.А. Пупынин

Томский политехнический университет

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: eak@ispms.ru

Исследована взаимосвязь между параметрами сигналов акустической эмиссии и характером трения стали Гадфильда (Г13). Установлена корреляция между спектром акустической эмиссии и коэффициентом трения. Предложен механизм возбуждения акустических колебаний в результате деградации структуры поверхности трения.

Ключевые слова:

Трение скольжения, коэффициент трения, акустическая эмиссия, акустический сигнал, частотный спектр.

Key words:

Sliding friction, friction coefficient, acoustic emission, acoustic signal, frequency spectrum.

Введение

Процесс трения, согласно современным представлениям, не является стационарным. При скольжении двух тел друг относительно друга происходит схватывание, срыв и срез микронеровностей трущихся поверхностей. Сложность протекающих при этом физико-механических процессов заставляет искать новые методы анализа, которые могут дать информацию о явлениях, происходящих в зоне трения, и оценить реальный ресурс работы пары трения. Среди методов, контролирующих процесс трения в режиме реального времени, наиболее привлекательным является метод акустической эмиссии (АЭ) [1–3]. Метод основан на регистрации акустического излучения, обусловленного возбуждением ультразвуковых колебаний элементов трибосоприжения.

Спектральный состав и интенсивность АЭ связаны с размерами сопряжения и его геометрией, шероховатостью контактирующих поверхностей и свойствами поверхностных слоев сопряженных материалов. Так как взаимодействие при трении происходит на выступах микронеровностей и реальная площадь контакта значительно меньше номинальной поверхности трения, то в зоне контакта развиваются высокие напряжения и протекают деформационные процессы, которые, в свою очередь, приводят к генерации акустических сигналов. Каждое элементарное событие в зоне контакта нельзя зарегистрировать с помощью существующей техники. Однако огромное количество таких элементарных актов формирует последовательность событий, суперпозиция которых может вызывать макроскопически значимые явления, дающие вклад в формирование спектральных характеристик АЭ. Возбуждение упругих колебаний при пластической деформации обусловлено пластическими сдвигами и двойникованием, межзеренным проскальзыванием, а также фазовыми превращениями и разрушением, включая образование микродефектов, трещин и отслоений.

Колебания, являющиеся результатом данных процессов, можно регистрировать и по ним судить

о характере трения. В [3–5] установлено, что пики акустической эмиссии ультразвуковой частоты связаны с периодическим разрушением упрочненных слоев металла на поверхностях трущихся тел. В процессе трения структура поверхностных слоев претерпевает изменения, металл проходит стадии накопления дефектов, образования деформированного поверхностного слоя и его разрушения. Последняя стадия сопровождается возрастанием энергии акустической эмиссии. Затем процесс повторяется вновь — чередуются стадии упрочнения поверхностного слоя и его разрушения.

Таким образом, достоверно существует взаимосвязь энергии акустической эмиссии с процессами разрушения поверхностного слоя при трении, что позволяет с высокой точностью определять время происходящих событий. Остается открытым вопрос — можно ли из анализа параметров АЭ судить о стадиях изнашивания элементов трибосоприжения, которые предшествуют катастрофическому разрушению поверхности? Ниже приведены результаты исследований акустической эмиссии, проведенные с целью выявления корреляционных связей между триботехническими параметрами и характеристиками акустического излучения — спектральными и энергетическими.

Материалы и методы испытаний

В предлагаемой статье представлены результаты исследования процесса трения скольжения высокомарганцовистой стали Г13 (сталь Гадфильда) и связанного с трением возбуждения колебаний трибосистемы в области ультразвуковых частот. Испытания проводили на трибостере фирмы TRIBOtechnic по схеме «палец-диск» при нагрузке от 1 до 5 Н и линейной скорости скольжения от 0,02 до 0,1 м/с. Диски из стали Гадфильда имели диаметр 39,0 мм; в качестве пальца были выбраны инденторы из твердого сплава ВК-6 и шарики из закаленной стали ШХ15.

Сигналы акустической эмиссии записывали с помощью модуля регистрации ЭЯ-2 производства Тольяттинского госуниверситета, который

сохраняет и анализирует сигналы АЭ (при неравномерности 6 дБ) в диапазоне от 30 кГц до 1 МГц. [6]. Прибор позволяет регистрировать АЭ-информацию с частотой дискретизации АЦП каналов 390 кГц ... 50 МГц.

В работе сравнивали изменение коэффициента трения со временем (диаграмма трения) и параметры сигналов акустической эмиссии. Были выбраны такие условия испытаний, при которых стало возможным проследить изменение параметров сигналов АЭ и оценить величину изменения коэффициента трения. Для данного сопряжения в условиях сухого трения характерно адгезионное взаимодействие поверхностей [7], которое, по мере возрастания фактической площади касания, вызывает интенсивный рост энергии акустического сигнала.

Результаты исследований

Испытания показали, что энергия акустического сигнала в процессе трения указанной пары при нагрузке 2 Н проходит стадии возрастания и уменьшения. Таким же образом изменяются медианная частота и коэффициент трения (рис. 1). Из сравнения кривых на рис. 1 видно, что на начальном этапе испытаний величина коэффициента трения менее 0,2, далее наблюдается ее возрастание, сопровождающееся изменениями непериодического характера. Низкий коэффициент трения и малая энергия акустического излучения (АИ) на начальной стадии свидетельствуют об отсутствии интенсивных деформационных процессов на поверхности, что характерно для стадии приработки, когда деградация структуры материала локализуется на выступах шероховатости. Возрастание коэффициента трения связано с адгезионным взаимодействием сопряженных поверхностей и, соответственно, с изменениями площади фактического касания. Такой характер трения обуславливает повышенный износ образца и контртела. Поведение медианной частоты во времени повторяет поведение коэффициента трения, при этом поло-

жения максимумов коэффициента трения и медианной частоты совпадают. Анализ спектров акустической эмиссии, соответствующих разным этапам этого процесса, показал, что возрастание медианной частоты обусловлено появлением в спектре «высокочастотной» составляющей (рис. 2, а), тогда как другие стадии, за исключением начальной, характеризуются спектром АЭ только в области относительно низких частот (рис. 2, б). На начальной стадии спектр не содержит характеристических частот. Наблюдаются лишь шумы с низкой энергией АИ во всем диапазоне регистрации сигналов.

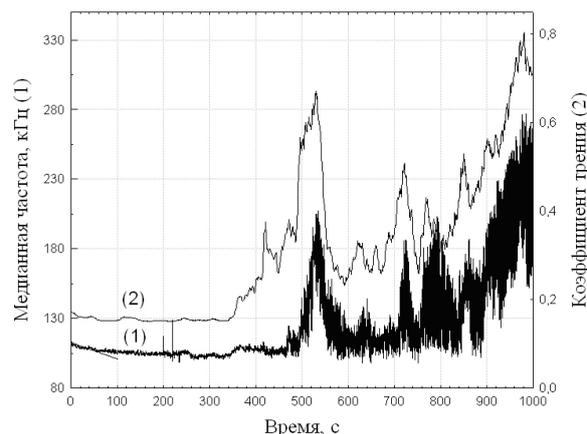


Рис. 1. Зависимость медианной частоты сигнала (1) и коэффициента трения (2) от времени при нагрузке 2 Н на индентор

В условиях трения скольжения сопряженных поверхностей стохастическое взаимодействие выступов шероховатости может перейти в автоколебательное состояние при изменении внешних воздействий, параметров изнашивания и упругопластической податливости элементов трибосопряжения. Такое изменение динамического поведения системы сопровождается изменением частоты акустического излучения от нескольких десятков МГц, соответствующих акустическому шуму при взаимодействии микровыступов, до десятков кГц

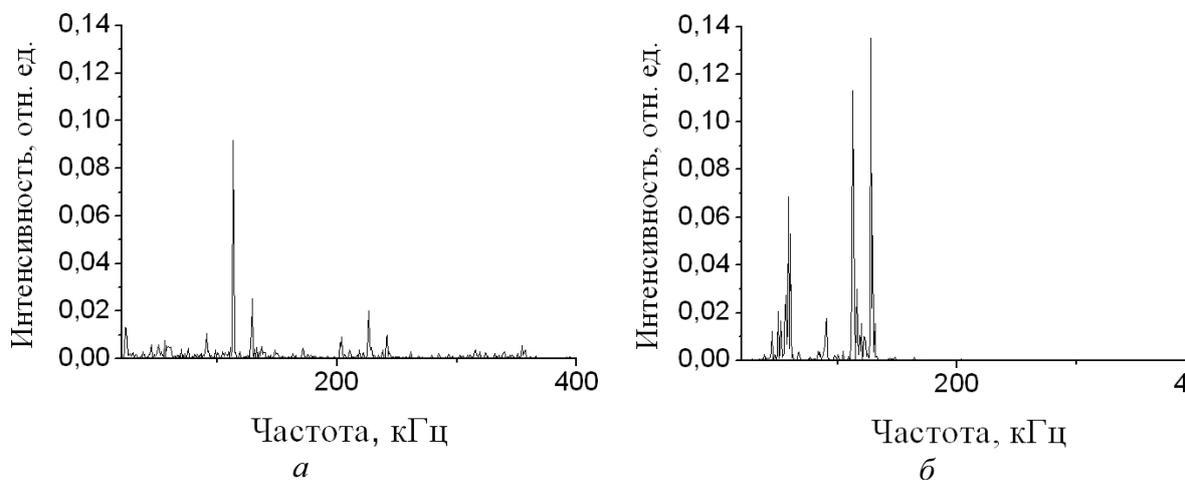


Рис. 2. Спектр сигналов акустической эмиссии при возрастании (а) и падении (б) коэффициента трения

в случае возникновения автоколебаний элементов трибосопряжения, когда трение сопровождается адгезионным схватыванием.

Присутствие характеристических частот в «низкочастотной» области на рис. 2 свидетельствует именно о резонансных колебаниях элементов трибосопряжения, обусловленных адгезией. После приработки эти колебания сохраняются в течение всего времени наблюдений. Появление «высокочастотной» составляющей в спектре АЭ на определенных этапах трения связано с некоторым периодически возникающим процессом. Принимая во внимание то, что более высоким резонансным частотам соответствуют колебания элементов меньшего размера, чем размеры трибосопряжения, можно предположить, что высокочастотная составляющая спектра связана либо с формированием деформированного поверхностного слоя, когда уменьшается вязкость материала на поверхности, либо с массовым отделением частиц износа, либо с тем и другим. Иными словами, появление «высокочастотной» составляющей спектра можно связать с изменением жесткости связи образца и контртела вследствие деградации структуры материала в поверхностном слое.

К аналогичному выводу пришли авторы [8], которые объяснили возрастание силы трения и скорости счета АЭ интенсивным разрушением и постепенным удалением поверхностного слоя. Максимум интенсивности скорости счета АЭ (энергия АЭ) достигался при катастрофическом разрушении поверхности, после чего скорость счета АЭ резко уменьшалась. Наши исследования показали, что скорость 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 от медианной частоты. Как следует из рис. 3, 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 кривой 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 разрывы адгезионных мостиков сварки, отделение частиц износа. Отличия спектров в различных группах определяются, таким образом, процессом, доминирующим в определенный момент времени. Вполне вероятно, что разделение акустических сигналов на два кластера обусловлено различным излучением ультразвука контртелом и образцом в результате деградации поверхностного слоя.

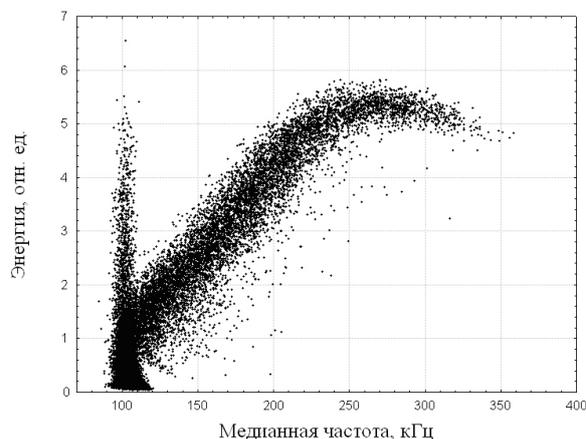


Рис. 3. Зависимость энергии акустического сигнала от медианной частоты при нагрузке на индентор 2 Н

При увеличении нагрузки до 3 Н наблюдался периодический характер изменения коэффициента трения (рис. 4, кривая 2). Период его изменения не зависел от частоты вращения диска, и в процессе испытания изменялся от 70 до 150 с. Как следует из диаграммы трения, на фазу роста коэффициента трения требуется больше времени, чем на этап падения. Такое поведение коэффициента трения может быть обусловлено чередованием процессов образования дефектного слоя и его удаления. Явно выраженная периодичность изменения коэффициента трения указывает на то, что процесс разрушения поверхностей трения образца и контртела либо совпадают по фазе, либо один из них значительно превосходит другой по интенсивности.

Такую же периодичность обнаруживает и изменение параметров сигнала АЭ (рис. 4, кривая 1). Корреляция между коэффициентом трения и акустическим откликом системы объясняется периодическим изменением фактической площади касания в процессе трения, что также зависит от адгезионного взаимодействия. При увеличении площади касания, по мере приработки поверхностей соприкосновения, коэффициент трения и энергия АЭ возрастают, а при лавинообразном разрушении поверхностного слоя 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.

Зависимость энергии от медианной частоты (рис. 5), обнаруженная при регистрации АЭ, также свидетельствует о протекании в зоне трения двух

процессов, имеющих различную природу возникновения. Однако разделение сигналов на два кластера в этом случае менее выражено, чем в предыдущем. Высокая плотность сигналов наблюдается только в области «низких» частот, тогда как «высокочастотная» ветвь сигналов более разрежена по сравнению с испытаниями при нагрузке 2 Н (рис. 3). Это может быть связано с тем, что при данной нагрузке интенсивность износа уменьшается.

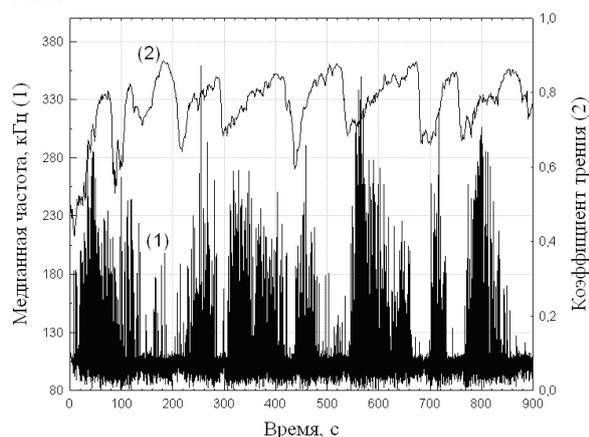


Рис. 4. Зависимость медианной частоты сигнала (1) и коэффициента трения (2) от времени при нагрузке на индентор 3 Н

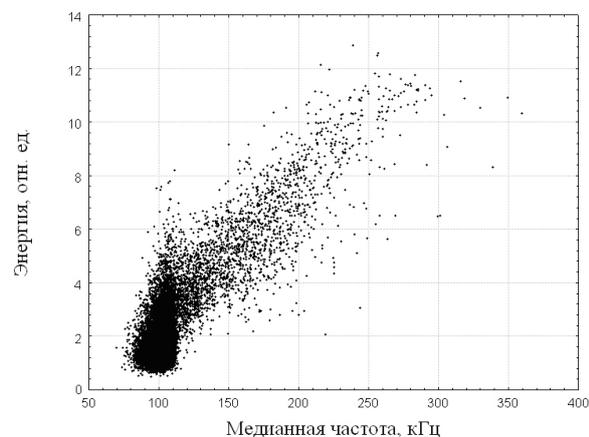


Рис. 5. Зависимость энергии акустического сигнала от медианной частоты при нагрузке на индентор 3 Н

Таким образом, полученные результаты указывают на то, что существенный вклад в процессы, происходящие при трении стали Г13 в паре со сталью ШХ15, вносит адгезия, которая в данном случае является доминирующим фактором. Для уменьшения влияния адгезии на параметры акустической эмиссии вместо стали ШХ15 был использован твердый сплав ВК-6. При исследовании сигналов АЭ варьировали параметрами испытаний, такими как скорость скольжения и нормальная нагрузка.

В результате изменения нагрузки на индентор от 1 до 5 Н при скорости скольжения 0,1 м/с обнаружили, что с ростом нагрузки увеличивается лишь энергия акустического сигнала, тогда как медианная частота практически не изменяется

(рис. 6). Это может служить свидетельством стабильности спектра акустического сигнала при увеличении нагрузки в указанных пределах. По всей видимости, невысокие нагрузки вызывают такие процессы в зоне трения, которые характеризуются однотипными механизмами генерации акустического сигнала и, соответственно, одинаковыми спектральными характеристиками сигнала АЭ.

В [9] было показано, что при увеличении нормальной нагрузки на трибологическую пару алюминиевый сплав АМг3 – чугун Gh190, при испытаниях по схеме «вращающееся кольцо – колодка», наблюдается уменьшение активности высокочастотной составляющей, в то время как активность низкочастотной составляющей сигнала АЭ возрастала. Это обстоятельство может являться следствием увеличения адгезионной составляющей при трении такой пары. В нашем случае применение в качестве индентора твердого сплава ВК-6 не вызвало каких-либо существенных изменений в механизме трения при увеличении нагрузки от 1 до 5 Н; наблюдался лишь некоторый разброс значений медианной частоты.

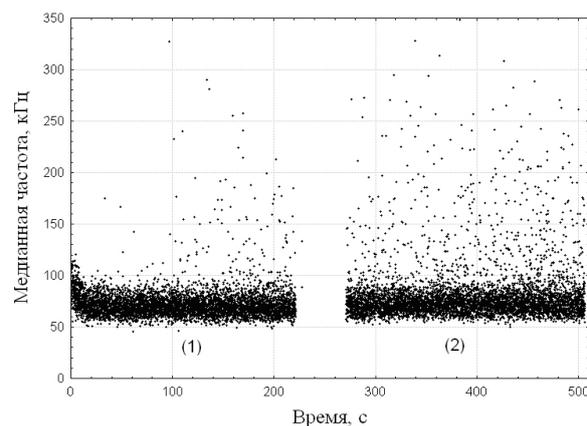


Рис. 6. Зависимость медианной частоты от времени при нагрузках 1 Н (1) и 5 Н (2) на индентор из сплава ВК-6

Проведенные исследования показали, что применение метода акустической эмиссии для диагностики и контроля процессов трения и изнашивания в трибосопряжениях требует анализа различных параметров акустической эмиссии, которые предварительно должны быть сопоставлены с этапами эволюции структуры поверхностного слоя.

Заключение

Установлена взаимосвязь между параметрами сигналов акустической эмиссии и характером трения и изнашивания стали Гадфильда (Г13). При исследовании трения в сопряжении сталь Г13 – сталь ШХ15 выявлено разделение акустического сигнала на две группы, отличающиеся зависимостью энергии от медианной частоты. Группа сигналов, характеризующаяся одновременным возрастанием энергии и медианной частоты, по-видимому, связана с процессом формирования и отделения частиц износа, косвенным подтверждением чему может

служить присутствие высокочастотной составляющей в спектрах данных сигналов. Сигналы другой группы отличаются тем, что они имеют разные энергии при одинаковой «низкой» медианной частоте. Низкочастотная составляющая, скорее всего, вызвана автоколебаниями трибосопряжения, обусловленными адгезионным взаимодействием в паре трения, характерным для трения в отсутствие смазки. При лавинообразном разрушении поверхностного слоя и отделении частиц износа происходит резкое падение коэффициента трения, медианной частоты и энергии акустических сигналов. Исследование акустической эмиссии при тре-

нии стали Г13 в паре с твердым сплавом ВК-6 подтверждает такой характер взаимосвязи параметров акустической эмиссии с параметрами трения. Очевидно, что адгезионная составляющая играет существенную роль в формировании сигналов акустической эмиссии.

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. при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-08-00629-а).

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. Колубаев Е.А., Колубаев А.В., Сизова О.В. Анализ акустической эмиссии при трении скольжения высокомарганцевистой стали // Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36. – В. 16. – С. 55–61.
3. Козырев Ю.П., Седакова Е.Б. Частотный спектр сигналов акустической эмиссии при трении и его связь с периодичностью адгезионного износа // Трение, износ, смазка (электр. ресурс). – 2007. – Т. 9. – № 1 (30). – 7 с.
4. Фадин Ю.А. Динамика разрушения поверхности при сухом трении // Письма в Журнал технической физики. – 1997. – Т. 23. – № 15. – С. 75–78.
5. Фадин Ю.А. Применение акустической эмиссии для оценки массового износа // Трение и износ. – 2008. – Т. 29. – № 1. – С. 29–32.
6. Мерсон Д.Л., Полуниин В.И., Чуудинов 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.
7. Колубаев А.В., Иванов Ю.Ф., Сизова О.В., Колубаев Е.А., Алешина Е.А., Громов В.Е. Влияние упругих возбуждений на формирование структуры поверхностного слоя стали Гадфильда при трении // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78. – № 2. – С. 63–70.
8. Дубравин А.М., Комков О.Ю., Мышкин Н.К. Анализ акустической эмиссии на микротрибометре возвратно-поступательного типа // Трение и износ. – 2004. – Т. 25. – № 4. – С. 363–367.
9. Криштал М.М., Мерсон Д.Л., Чугунов А.В. Спектральные и энергетические характеристики акустической эмиссии при трении в условиях фрикционных автоколебаний // Трение, износ, смазка (электр. ресурс). – 2007. – Т. 9. – № 3 (32). – 3 с.

Поступила 03.03.2011 г.