

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МОНИТОРИНГ РАБОТЫ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

А.В. Баранов, С.В. Тарасевич, В.А. Вагнер

Рассмотрен вопрос диагностики состояния трущихся поверхностей кинематических пар методом ультразвуковой акустической эмиссии. Показано, что состояние дискретных пятен контакта может быть оценено величинами параметров акустического излучения, что открывает возможность оперативного информативного контроля процесса приработки и диагностики состояния контакта трибосопряжений.

Ключевые слова: граничное трение; износ; акустика; акустическая эмиссия; трибоника; окислительное изнашивание; гетерогенные реакции; ультразвуковая диагностика.

Статистические данные по отказам работы механического оборудования свидетельствуют о том, что самыми уязвимыми элементами энергонагруженных механизмов являются подвижные сопряжения их деталей. Рост энергонапряженности кинематических пар привел к тому, что многие из них работают на пределе несущей способности. Кроме того, изменение внешних и внутренних условий иногда спонтанно приводят к их необратимому повреждению, с последующим цепным нарастающим эффектом выхода из строя других частей механизмов. С другой стороны, во многих случаях, катастрофические последствия можно предотвратить, диагностируя проблемные пары трения, заранее выявляя относительно резкие или постепенные нарастающие сопутствующие эффекты ухудшения работы уязвимых мест с последующим, возможно автоматическим, принятием мер по предотвращению опасных явлений.

Существующие методы непрерывного контроля подвижных сопряжений (измерение сил трения, износа, температуры; феррография и т.д.) как правило, оценивают лишь интегральные характеристики фрикционных процессов и информируют о появлении патологических явлений как о свершившемся факте, не предупреждая о начале развития самого процесса заедания. Кроме того, реализовать процедуру контроля на реальных узлах, вне лабораторных условий за редким исключением невозможно. Этим недостатком лишен метод контроля, основанный на анализе параметров сигналов акустического излучения (АИ), поступающих непосредственно из зоны трения.

Исследования в этой области проводятся уже более трех десятков лет, в то же время их результаты достаточно противоре-

чивы. С нашей точки зрения, это в большей мере связано с неодинаковым выбором частотного диапазона исследований и произвольным толкованием природы АИ.

Цель данной работы - несколько расширить имеющиеся представления в этом вопросе.

Экспериментальные исследования проводили на установке (рисунок 1) [1], представляющей собой машину торцевого трения и комплект аппаратуры аналогово-цифрового типа для снятия фрикционных характеристик сопряжений.

Испытанию подвергались контактирующие между собой торцевыми поверхностями образцы из стали 45 (НВ 240). При этом торцевая поверхность образца, имеющая три выступа, прижимается к торцевой поверхности контрообразца нагрузочным устройством рычажного типа. При среднем диаметре дорожки трения 43, ширине 8 мм и длине 6 мм каждой из площадок выступов коэффициент взаимного перекрытия трибосопряжения составил 0,13. Исходная шероховатость трущихся поверхностей $R_a = 0,7$ мкм, скорость скольжения 0,2 м/с, номинальное давление 0,5 МПа.

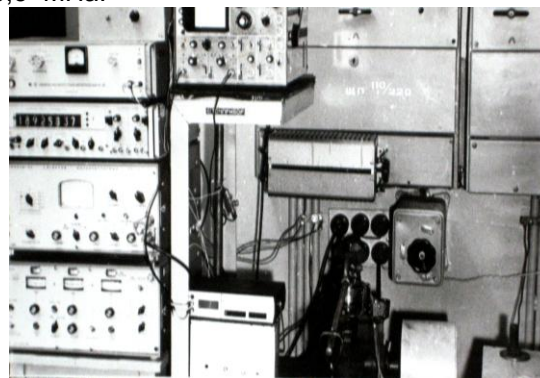
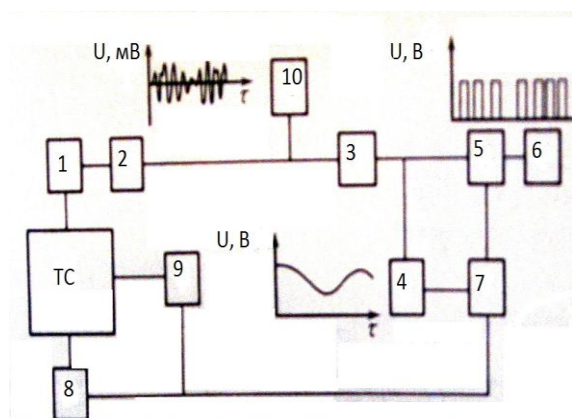


Рисунок 1 - Вид установки

Блок-схема аппаратуры установки для исследования трибологических параметров приведена на рисунке 2. Установка позволяет регистрировать, исследовать и проводить визуальные наблюдения за пиковыми и интегральными характеристиками сигналов АИ в различных частотных диапазонах с верхней граничной частотой 1 МГц, нижней – 30 кГц. Верхняя частота ограничена возможностью датчика. Сигнал АИ воспринимался пьезопреобразователем (пьезокерамика ЦТС-19), вмонтированным в держатель образца на некотором расстоянии параллельно поверхности трения. В процессе экспериментов также фиксировалась сила трения и мгновенные значения переходного электросопротивления контакта с падением напряжения на переходном контакте не более 25 мВ, с целью исключения туннельного эффекта.



1 - предварительный усилитель, 2 – фильтр высокой частоты (нижняя частота среза - 30 кГц), 3 – основной усилитель, 4 - амплитудный пиковый детектор, 5 - преобразователь «частота-напряжение», 6 – частотомер, 7 – записывающий осциллограф, 8 – датчик силы трения, 9 – измеритель падения напряжения на контакте, 10 – лучевой осциллограф.

Рисунок 2 - Блок-схема электронной части аппаратуры установки

Физическая картина процесса генерирования и приема сигналов АИ представляется нам следующим образом.

При трении шероховатых поверхностей происходит эпизодическое деформирование контактирующих микронеровностей. Возмущения в виде деформационной волны распространяются по телу со скоростью звука и воспринимаются пьезодатчиком. Принимая во внимание множественность контактов и малое время существования единичных фрикционных связей ($10^{-4} \dots 10^{-6}$ с), а также

производя оценки по частоте вхождения микронеровностей в контакт, следует ожидать основную составляющую сигнала АИ в ультразвуковом диапазоне при частоте свыше 30 кГц. Именно это значение и составляла нижняя частота среза фильтров высокой частоты аппаратуры.

Исследуя экспериментальные графики амплитудно-частотных характеристик сигналов АИ в диапазоне 30 кГц - 1 МГц, в условиях трения смазываемых стальных поверхностей, обнаружен значительный подъем амплитуды в области частот 80...100 кГц (рисунки 3, 4). Очевидно, эта область является средней частотой контактирования микронеровностей. С другой стороны замечен следующий факт. Увеличение скорости скольжения не вызывает смещение максимума в соответствующую сторону.

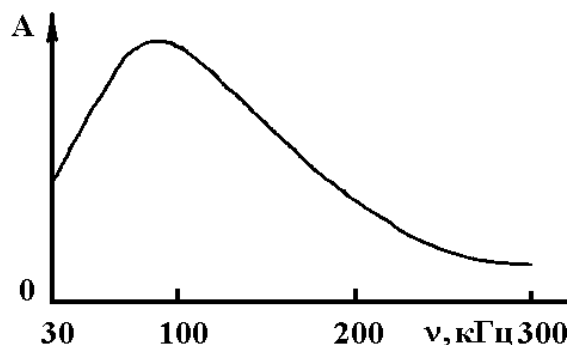


Рисунок 3 – Амплитудно-частотная характеристика сигналов АИ



Рисунок 4 - Характерный вид осциллограммы сигналов АИ (длительность развертки $2 \cdot 10^{-4}$ с)

Исключая нелинейность характеристики усилителя и датчика в области этих частот, можно сделать предположение, что этот эффект связан с увеличением динамической жесткости поверхностного слоя, реологии контакта. Это влечет за собой уменьшение контактного сближения поверхностей, а следовательно, и к уменьшению частоты контактирования. Также причиной могут быть и другие динамические эффекты. Следует отметить, что сдвиг максимума в область низких частот удалось зарегистрировать, но лишь при очень малых скоростях скольжения.

Связь между фактическим давлением и уровнем амплитуд АИ непосредственно вытекает из принятой модели генерирования сигналов. Она должна быть линейной. С другой стороны, в поверхностном слое возникают не только нормальные, но и сдвиговые деформации, также создающие звуковые волны, однако иначе воспринимаемые датчиком.

Для отыскания взаимосвязи между амплитудой АИ и фактическим давлением P_r , представляя взаимодействующие микронеровности сопряженных поверхностей как тела круговой формы, было использовано решение плоской задачи теории упругости о центральном контактировании двух упругих цилиндров по образующей [2]. Компоненты напряжений σ_x и σ_y на поверхности дискретного контакта в плоскости симметрии численно равны P_r и являются главными. В общем случае главные напряжения определяются по формуле

$$\sigma_{1,2} = 0,5(\sigma_x + \sigma_y) \pm 0,5\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

Учитывая, что $P_r = \sigma_x = \sigma_y$ и $\tau_{xy} = f \sigma_x$, где f – коэффициент трения, получим выражение для σ_1 :

$$\sigma_1 = P_r(1 + f). \quad (1)$$

Так как величина f мала по сравнению с единицей, то можно допустить, что плоскость действия σ_1 параллельна поверхности трения. Относительная деформация согласно закону Гука в плоскости поверхностей трения будет пропорциональна величине σ_1 . При трении сопряженных поверхностей возмущения в виде импульсов деформаций, возникающих на дискретных пятнах контакта микронеровностей, распространяются со скоростью звука по телу трения и воспринимаются пьезопреобразователем. В силу этого должно наблюдаться подобие между амплитудой импульсов деформаций, регистрируемой аппаратурой, и значением величины, получаемой в правой части выражения (1):

$$A \sim P_r(1+f),$$

Косвенным подтверждением этого положения могут являться результаты следующих экспериментов.

При установившемся режиме трения без смазочного материала приработанных поверхностей производили быстрое снятие нагрузки с последующим быстрым нагружением

сопряжения до прежнего значения. Такая кратковременность нагрузочного режима, соблюдалась для того, чтобы не допустить приработочного изменения микротопографии образцов, а отсутствие смазочного материала исключает реологические эффекты приграничного слоя. Одновременно регистрировали уровень амплитуды АИ. На рисунке 5 приведены результаты одного из экспериментов в виде зависимости относительной амплитуды АИ в функции относительного номинального давления. Полученные кривые имеют вид степенной функции $A \sim P_a^v$, где значение v по результатам обработки результатов нескольких экспериментов составило величину 0,13...0,16.

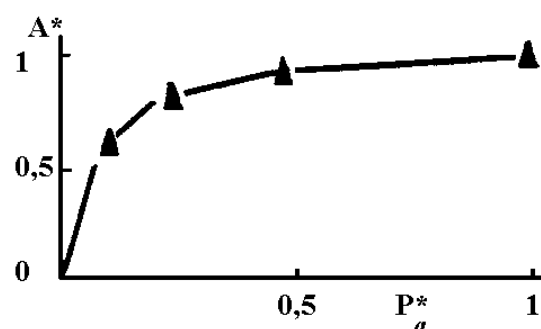


Рисунок 5 - Зависимость относительной амплитуды АИ от относительного номинального давления

Анализируя полученные зависимости и, учитывая, что номинальное и фактическое давление для приработанных поверхностей теоретически связаны также степенной зависимостью [3] с показателем степени 0,14, можно допустить установления фактически линейной связи между амплитудой АИ и фактическим давлением. Экспериментальным путем также подтвердилась качественная связь между средней амплитудой АИ и коэффициентом трения (рисунок 6).

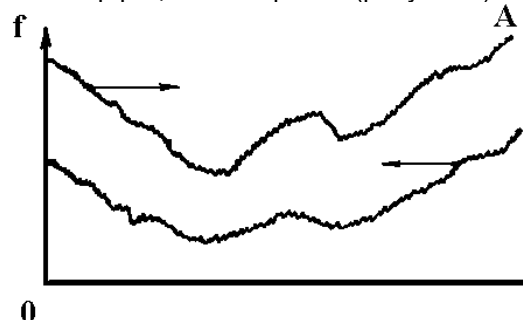


Рисунок 6 – Качественная связь коэффициента трения и амплитуд АИ

Таким образом, получая информацию о частоте и амплитуде АИ, можно фактически мгновенно судить о состоянии процессов на дискретных пятнах контакта.

Для примера рассмотрим кинетику приработки указанных трибосопряжения стальных поверхностей, смазываемых пластичной смазкой Литол 24.

На рисунке 7 показано характерное изменение средней амплитуды АИ в функции времени приработки. Здесь можно выделить два периода. В первом периоде (участок I) при высоком значении амплитуд АИ наблюдаются их значительные колебания. Это вызвано тем, что в зоне фрикционного контактирования из-за больших начальных локальных давлений, протекают процессы упруго-пластического деформирования. При этом, по мере формирования граничных слоев, временами появляются ювенильные участки поверхностей, которые вызывают микросхватывания, характеризующиеся резкими мгновенными падениями переходного электросопротивления и соответствующими всплесками амплитуд импульсов АИ. По мере упрочнения поверхностного слоя и формирования вторичных структур через некоторое время наступает второй период (участок II), характеризующийся постепенным уменьшением амплитуд с незначительным колебанием их значений. Первый период непродолжителен, но всегда присутствует, даже при исследовании полностью приработанных поверхностей при повторных включениях установки.

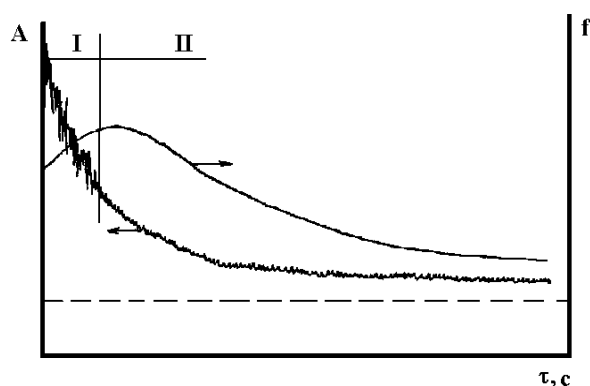


Рисунок 7 - Зависимость средней амплитуды АИ от времени приработки и внешний вид осциллограмм на соответствующих участках (длительность развертки $2 \cdot 10^{-3}$ с)

В серии экспериментов также исследованы предзадирные состояния сопряжений, близкие к развитию заедания. Они характе-

ризуются возникновением отдельных высокоэнергетических пиков на осциллограмме (рисунок 8), частота возникновения которых иногда очень быстро, а иногда постепенно возрастает.



Рисунок 8 - Осциллограмма, начала, развития заедания

Далее наступает необратимый процесс схватывания поверхностей с соответствующим видом осциллограммы (рисунок 9).



Рисунок 9 – Осциллограмма самого процесса заедания

При заедании изменяется также и спектральный состав АИ. На рисунках 10, 11 представлены относительные уровни амплитуд частотных компонентов АИ, выделенных с помощью острорезонансных фильтров на частотах 50, 100 и 350 кГц при нормальной работе сопряжения и при заедании. При нарушении нормальной работы сопряжения, наряду с резкими колебаниями среднего уровня амплитуды, основная энергия излучения смещается в область низких частот являющееся естественным результатом резкого увеличения уровня шероховатости и падения количества пятен фактического контакта. Подобные результаты были также получены в [4,5]. Отметим, что для полного изучения этого явления, необходим более глубокий анализ спектра излучения при различных условиях работы пар трения, выходящий за рамки возможностей использованной аппаратуры.

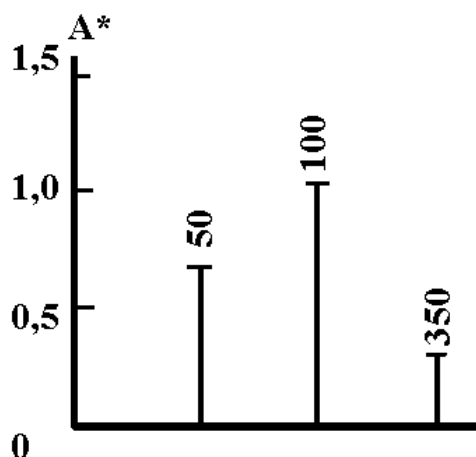


Рисунок 10 - Спектральный состав AI при нормальной работе

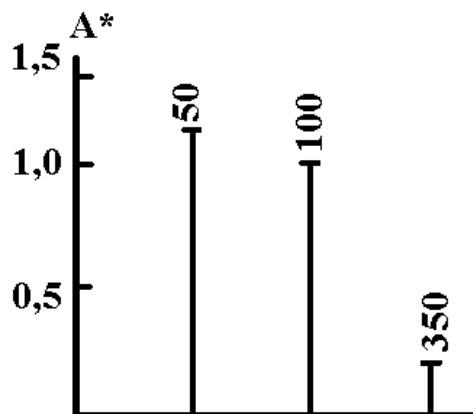


Рисунок 11 - Спектральный состав AI при заедании

В заключение, касаясь вопроса использования рассмотренного метода для исследования пар трения, можно выделить несколько особенностей, открывающих широкую возможность для его применения на практике.

Во-первых. Используя диапазон ультразвуковых частот, удалось полностью отфильтровать сигналы технологических шумов, не связанных с работой пар трения.

Во-вторых. Благодаря значительному поглощению материалами ультразвука, открывается возможность выделять сигналы наиболее интересующей пары трения, располагая датчики в непосредственной близости к фрикционной зоне.

В-третьих. Установка датчиков, как правило, не вызывает затруднений, связанных с переделкой конструкции узла. Акустическая связь может быть осуществлена даже с движущимися объектами через тонкий слой жидкости (например, масла).

В-четвертых. Имеется возможность автоматического контроля работы сопряжений с автоматическим принятием решений без участия оператора.

Подводя итоги исследованиям акустических сигналов пар трения, можно отметить, что в настоящее время этот метод является наиболее удобным и оперативным средством выявления как патологических, так и переходных фрикционных процессов. В связи с этим возникает задача, более глубокого изучения данного вопроса с целью повышения его информативности, привлекая к изучению все многообразие параметров AI.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев, В.М. Акустические исследования работы трибосопряжений, смазываемых пластичными смазочными материалами / В.М. Лебедев, А.В. Баранов // Долговечность трущихся деталей машин. -М.: Машиностроение. - 1988.- №3.- С. 234-243.
2. Александров, В.М. Контактные задачи в машиностроении / В.М. Александров, Б.Л. Ромалис. - М.: Машиностроение. - 1986. - 176 с.
3. Криштал, М.М. Спектральные и энергетические характеристики акустической эмиссии при трении и износе / М.М. Криштал, Д.Л. Мерсон, А.В. Чугунов // Тяжелое машиностроение. - 2007.- №12. - С. 14-18.
4. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. -М.: Машиностроение. - 1977. -526 с.
5. Баранов, А.В. Высокочастотная акустическая диагностика работы пар трения / А.В. Баранов, В.А. Вагнер // Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин. - Барнаул.: АГТУ. - 2000. - № 2. - С. 87-89.

Баранов А.В., доцент, к.т.н., доцент каф. ДМ, e-mail: bar_a@mail.ru, тел. (3852)290874,

Тарасевич С.В., к.т.н., доцент каф. МАПП, **Вагнер В.А.**, профессор, д.т.н, зав.каф. ДМ, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»