

## ДИАГНОСТИКА РАБОТЫ ПАР ТРЕНИЯ

А.В. Баранов, В.А. Вагнер, Г.В. Барсуков

Рост энергонапряженности машин в последнее время значительно обострил проблему трения и изнашивания. Основная часть машин выходит из строя по причине нарушения нормальной работы подвижных сопряжений. Острота, этой проблемы несколько снижается за счет создания новых конструкционных материалов и эффективных смазочных средств. В то же время, до сих пор вопросы трения и изнашивания узлов решаются исключительно на основании эмпирических данных. Ни одно из эффективных средств улучшения фрикционных процессов не было создано на основании теоретических исследований.

Преодолев за последнее время множество тупиковых направлений, теория трения и изнашивания остается на уровне, не отвечающим потребностям практики. Незнание же всех факторов, влияющих на процессы трения, приводит к необъяснимым эффектам, когда в практически одинаковых условиях, одинаковые сопряжения изнашиваются с разбросом скоростей износа в несколько порядков. Причем в любой тяжело нагруженной паре существует вероятность внезапного возникновения заедания, приводящего к известным последствиям. В этих условиях особую роль приобретает вопрос диагностирования работы ответственных узлов трения.

Существующие методы непрерывного контроля подвижных сопряжений (измерение сил трения, линейного 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 этого процесса. Кроме того, реализовать процедуру контроля на, реальных узлах вне лабораторных условия, за редким исключением, невозможно. Этим недостатком лишен метод контроля, основанный на использовании сигналов акустического излучения (АИ), поступающих непосредственно из зоны трения.

Исследования в этой области проводятся уже около полутора десятков лет, в то же время их результаты достаточно противоречивы. 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 [1, 4], представляющей собой машину торцевого трения и комплект аппаратуры для снятия фрикционных характеристик сопряжения. Установка позволяет регистрировать, исследовать и проводить визуальные наблюдения за параметрами сигналов АИ в различных частотных диапазонах с верхней граничной частотой 1 МГц. Частота ограничена возможностью датчика. Сигнал АИ воспринимался пьезопреобразователем (пьезокерамика ЦТС-19), смонтированным в держатель образца на расстоянии около 15 мм от зоны трения. В процессе экспериментов также фиксировалась сила трения и слаботочное переходное электросопротивление контакта. Испытанию подвергались образцы из стали 45 (HB240), скорость скольжения 0,2 м/с, номинальное давление 0,5 МПа. Образцы полностью приработаны.

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 контакта и малое время существования единичных фрикционных связей ( $10^{-4} \dots 10^{-6}$  с), а также производя оценки [1] 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, при условиях трения, указанных выше, обнаружен значительный подъем амплитуды в области частот 80...100 кГц (рисунок 1). Очевидно, эта область и является средней частотой контактирования микронеровностей. С другой стороны замечен следующий факт. Увеличение скорости скольжения не вызывало смещение максимума в соответствующую сторону.

Исключая нелинейность характеристики усилителя и датчика в области этих частот, можно сделать предположение, что этот эффект связан с увеличением динамической жесткости поверхностного слоя. 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.

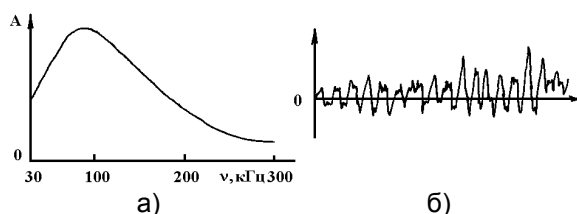


Рисунок 1 – Амплитудно-частотная характеристика (а) и характерный вид (б) осциллограммы (длительность развертки  $2 \cdot 10^{-4}$  с)

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 звуковую волну, однако иначе воспринимаемые датчиком. Основываясь на выводах, сделанных в работе [4], и принимая во внимание множественность источников АИ, а также сложную картину интерференции и отражений волн с изменением направления волновой поверхности, естественно предположить, что средняя амплитуда (А), будет пропорциональна средней величине максимальных главных нормальных напряжений поверхностного слоя дискретных пятен контакта. Тогда, после рассуждений можно прийти к выводу, что

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

где  $P_r$  - фактическое давление;  $f$  - коэффициент трения.

Косвенным подтверждением этого положения может являться следующий эксперимент. 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. Одновременно регистрировали уровень амплитуды АИ. На рисунке 2 приведены результаты одного из экспериментов в виде зависимости относительной амплитуды АИ в функции относительного номинального давления. Полученные кривые имеют вид степенной функции  $A \sim P_a^\nu$ , где значение  $\nu$  по результатам многочисленных экспериментов составило величину 0,13...0,16.

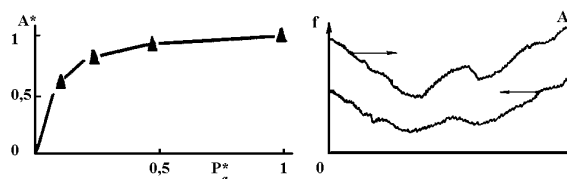


Рисунок 2 – Зависимость относительной амплитуды АИ от относительного номинального давления

Рисунок 3 – Связь изменения амплитуды АИ и коэффициента трения во времени

Анализируя полученные зависимости и, учитывая, что номинальное и фактическое давление связаны также степенной зависимостью [3] с показателем степени 0,14, в первом приближении можно считать установленным факт практически линейной связи между амплитудой АИ и фактическим давлением. Экспериментальным путем также подтвердилась связь между А и коэффициентом трения (рисунок 3).

Таким образом, получая информацию о частоте и амплитуде АИ, можно фактически мгновенно судить о состоянии процессов на дискретных пятках контакта. Для примера рассмотрим кинетику приработки трибосопряжения, смазываемого пластичной смазкой Литол-24.

На рисунке 4 показано характерное изменение средней амплитуды АИ от 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 упругопластического деформирования. При этом, ввиду отсутствия условий для образования граничных слоев, появляются ювенильные участки поверхностей, которые вызывают микросхватывания, что характеризуется резкими падениями и переходного электросопротивления и мгновен-

ными всплесками амплитуд импульсов АИ (рисунок 5 а). 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 (рисунок 5 б). Первый период непродолжителен и в некоторых случаях отсутствует.

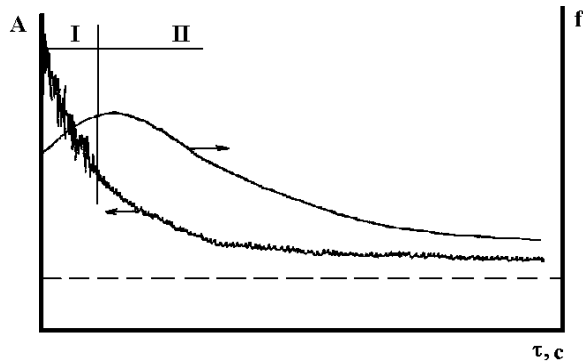


Рисунок 4 – Зависимость амплитуды АИ от времени приработки



Рисунок 5 – Осциллограмма АИ на I (а) и II (б) участках (длительность развертки  $2 \cdot 10^{-3}$  с)

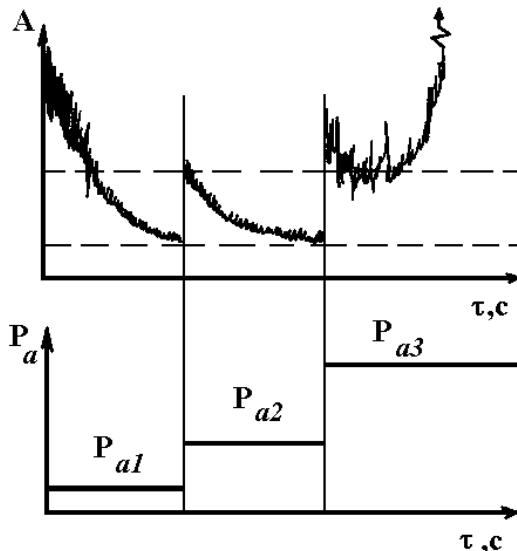


Рисунок 6 – Ступенчатая приработка

Большой практический и научный интерес представляет исследование приработки трибосопряжений при ступенчато растущей нагрузке. В этом случае приработка может быть осуществлена в несколько раз быстрее.

Превышение допустимой нагрузки приводит к задирам и схватыванию прирабатываемых поверхностей, а ее занижение – к увеличению времени приработки. Знание предельно допустимой нагрузки, равной несущей способности в каждый текущий момент времени, позволит оптимизировать этот процесс.

Естественно предположить, что величина амплитуд АИ соответствующая переходу из области I в область II (рисунок 4) характеризует несущую способность поверхностей трения. Тогда, для обеспечения оптимального режима приработки, необходимо, так повышать нагрузку, чтобы А постоянно соответствовала этому критическому уровню (рисунок 6). При значительном превышении этого уровня начинается процесс развития заедания с характерными высокоэнергетическими значениями мгновенных амплитуд АИ (рисунок 7 а). Если в этом случае не перейти на менее жесткий режим трения - произойдет заедание с соответствующим ему видом осциллограммы (рисунок 7 б).

При заедании изменяется также и спектральный состав АИ. На рисунке 8 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. Отметим, что для полного изучения этого явления, необходим более глубокий анализ спектра, излучения, выходящий за рамки возможностей использованной аппаратуры.

В заключении, 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.



Рисунок 7 – Осциллограмма, начала, развития (а) и самого процесса (б) заедания

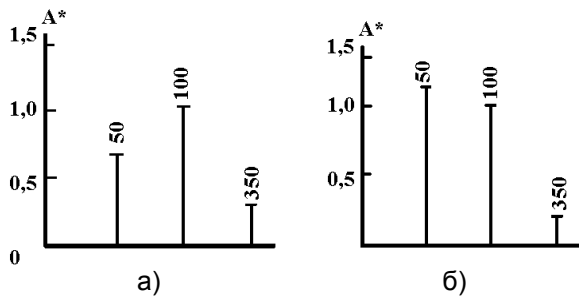


Рисунок 8 – Спектральный состав АИ при нормальной работе (а) и при заедании (б)

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, в том числе с применением вычислительной техники.

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 АИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А.В. Метод прогнозирования и способы повышения ресурса изнашивающихся подвижных сопряжений деталей машин: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. -Л.: ЛПИ, 1988.-175 с.
2. Карасик И.И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения. - М.: Наука, 1978.-136 с,
3. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. -М.: Машиностроение, 1977.-526 с.
4. Лебедев В.М., Баранов А.В. Акустические исследования работы трибосопряжений, смазываемых пластичными смазочными материалами // Долговечность трущихся деталей машин. -М.: Машиностроение, 1988, вып. 3. – С. 234-243.

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.*