

1. КОНСТРУИРОВАНИЕ, ПРОЧНОСТЬ, ДИНАМИКА, ТРИБОЛОГИЯ

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ МЕТАЛЛОВ

Баранов А. В., Вагнер В. А., Тарасевич С. В., Маломыжев О.Л. (Алтайский государственный технический университет)

По статистике 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 постепенно 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 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 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 (рис.1) [1], представляющей собой машину торцевого трения и комплект аппаратуры аналогово-цифрового типа для снятия фрикционных характеристик сопряжений. Установка позволяет регистрировать, исследовать и проводить визуальные наблюдения за текущими пиковыми и интегральными характеристиками сигналов АИ в широком частотном диапазоне с верхней граничной частотой 1 МГц. Частота ограничена возможностью датчика. Сигнал АИ воспринимался пьезопреобразователем (пьезокерамика ЦТС-19), вмонтированным в держатель образца на некотором расстоянии и параллельно поверхности трения. В процессе экспериментов также фиксировалась сила трения и мгновенные значения переходного электросопротивления контакта.

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

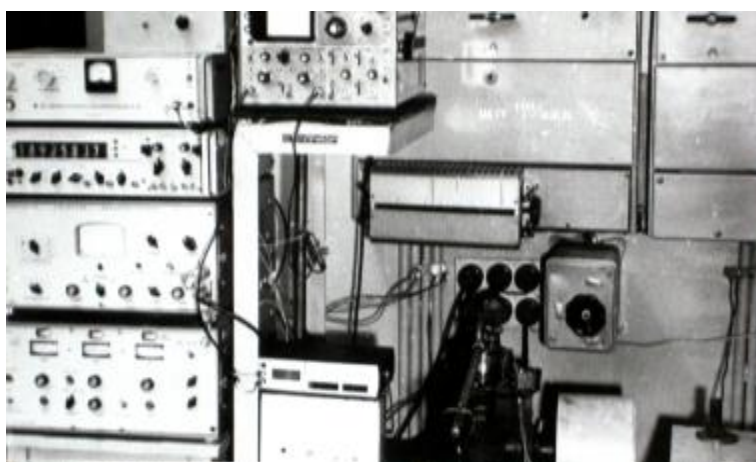


Рис.1. Вид установки

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 (рис.2). Очевидно, эта область является средней частотой контактирования микронеровностей.

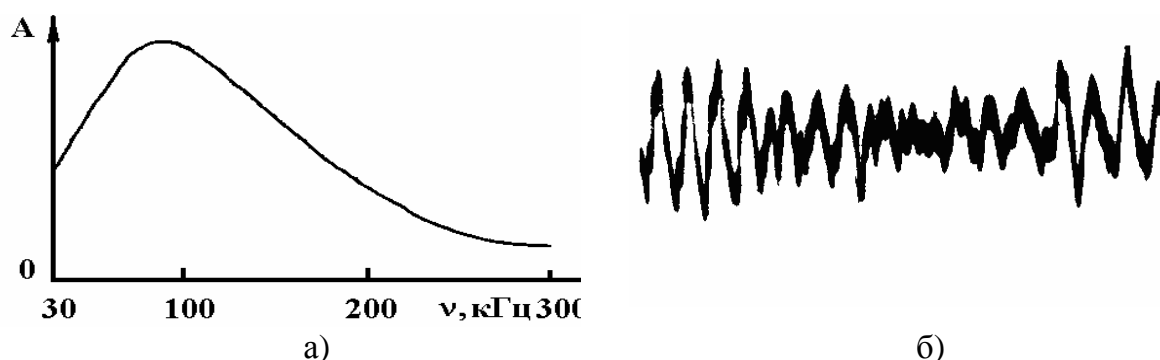


Рис.2. Амплитудно-частотная характеристика (а) и характерный вид (б) осциллограммы сигналов АИ (длительность развертки $2 \cdot 10^{-4}$ с)

С другой стороны замечен следующий факт - увеличение скорости скольжения не вызывает смещение максимума амплитуд сигналов АИ 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 уменьшение 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. Фактически 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

$$s_{1,2} = 0,5(s_x + s_y) \pm 0,5\sqrt{(s_x - s_y)^2 + 4t_{xy}^2}.$$

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

$$s_1 = P_r(1 + f). \quad (1)$$

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 исключает реологические эффекты приграничного слоя. Одновременно регистрировали уровень амплитуды АИ. На рис. 3 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 нескольких экспериментов составило величину 0,13...0,16.

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 установление факта практически линейной связи между амплитудой АИ и фактиче-

ским давлением. Экспериментальным путем также подтвердилась качественная связь между средней амплитудой АИ и коэффициентом трения (рис.4).

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

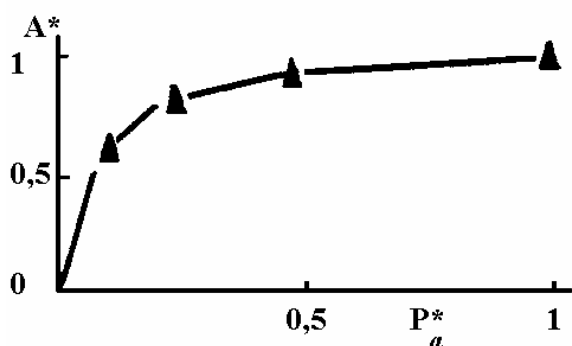


Рис.3. Зависимость относительной амплитуды АИ в функции относительного номинального давления

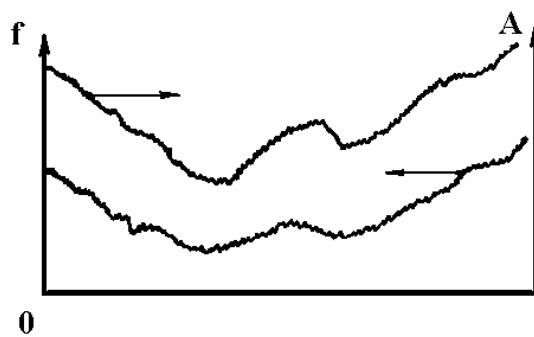


Рис.4. Связь изменения амплитуды АИ и коэффициента трения во времени при неустойчивых условий смазывания

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

На рис. 5 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 локальных начальных давлений протекают процессы упругопластического деформирования. При этом, по мере формирования граничных слоев, временами появляются ювенильные участки поверхностей, на которых происходят микросхватывания, характеризующиеся резкими мгновенными падениями переходного электросопротивления с 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 предварительно полностью приработанных поверхностей в условиях повторного включения установки.

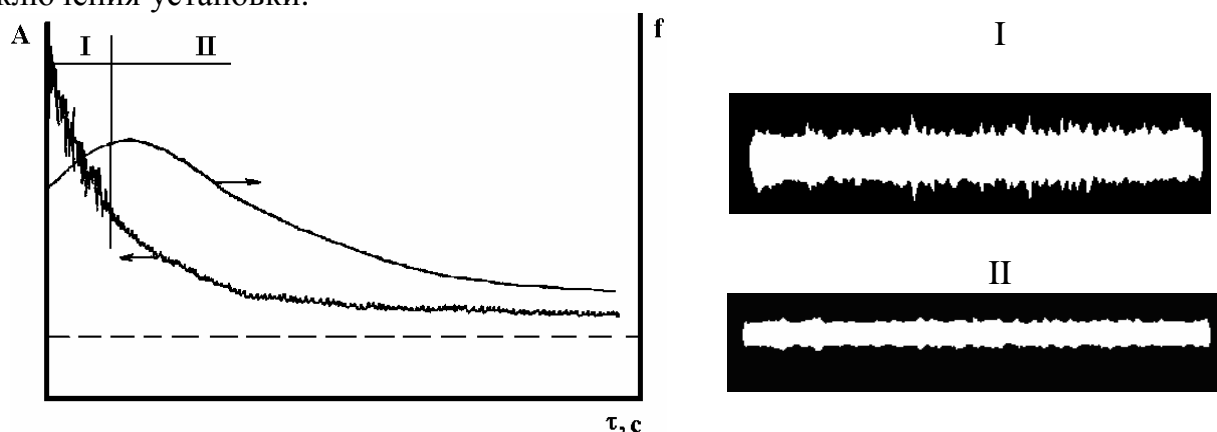


Рис.5. Зависимость средней амплитуды АИ от времени приработки и внешний вид осциллограмм на соответствующих участках (длительность развертки $2 \cdot 10^{-3}$ с).

В серии экспериментов также исследованы предзадирные состояния сопряжений, близкие к развитию заедания. Они характеризуются возникновением отдельных высокоэнергетических пиков на осциллограмме (рис.6а), частота возникновения которых иногда очень быстро, а иногда постепенно возрастает.

Далее наступает необратимый процесс схватывания поверхностей с соответствующим видом осциллограммы (рис.6б).



Рис.6. Осциллограмма, начала, развития (а) и самого процесса (б) заедания

При заедании изменяется также и спектральный состав АИ. На рис.7 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. Это является результатом резкого увеличения шероховатости и падения количества пятен фактического контакта. Подобные результаты были также получены в [4,5].

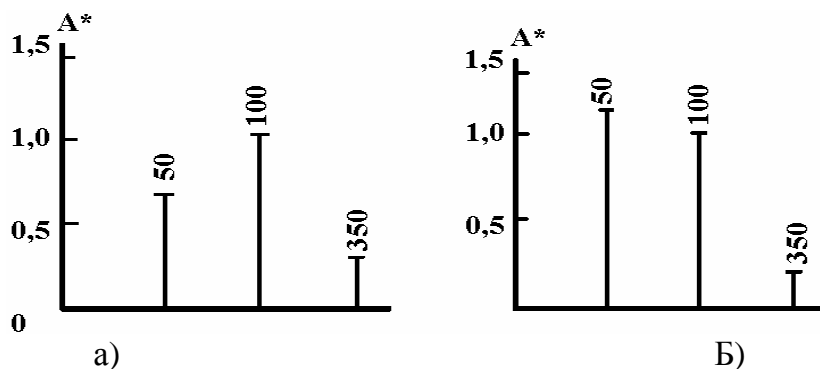


Рис. 8. Спектральный состав АИ при нормальной работе (а) и при заедании (б)

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 осуществ-

влена 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.

Литература:

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.

ВЛИЯНИЕ ДВУХСТАДИЙНОЙ ТОПЛИВОПОДАЧИ В ВЫСОКООБОРОТНОМ МАЛОРАЗМЕРНОМ ДИЗЕЛЕ НА ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ИЗНОС ШАТУННОЙ ШЕЙКИ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

Вальехо Мальдонадо П.Р. (Московский государственный технический университет «МАМИ»); **Гришин Д.К.** (Российский университет дружбы народов)

Одним из способов улучшения удельных энергетических показателей дизеля является форсирование его по частоте вращения коленчатого вала. Как известно, повышенная частота вращения коленчатого вала сокращает время рабочего цикла, увеличивает объёмную скорость подачи топлива, что приводит к росту динамического фактора. Повышенный динамический фактор у дизелей с непосредственным впрыскиванием приводит к существенному увеличению жесткости рабочего процесса двигателя. Как показал многолетний опыт эксплуатации дизелей, от жесткости рабочего процесса в значительной степени зависит износ основных деталей двигателя, уровни шума.

Для оценки жесткости рабочего процесса, или динамического фактора, обычно применяют такие показатели, как средняя $(dp/df)_{cp}$ или максимальная $(dp/df)_{max}$ скорости нарастания давления (j - угол поворота коленчатого вала), а также максимальное давление цикла P_z и степень повышения давления λ . Однако эти параметры недостаточны, так как не оценивают влияние жесткого рабочего процесса на возникающие вибрации упругих звеньев двигателя и, соответственно, на интенсивность износа основных деталей двигателя и уровень шума.