

АКУСТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В ФРИКЦИОННОМ КОНТАКТЕ КАК СПОСОБ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ НА ЭТАПЕ ПРИРАБОТКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В статье описывается возможность использования акустических колебаний, генерируемых при трении в качестве контролируемых параметров процесса приработки трибосопряжений двигателя. При взаимном контактировании, материалы излучают механические упругие волны, вызванные динамической локальной перестройкой их внутренней структуры. Механическое и молекулярное взаимодействие поверхностей трения способствует возникновению колебаний ультразвукового диапазона, несущих информацию как о наличии макро- и микродефектов, так и протекающих в трибосистеме процессах разрушения. Извлечение и расшифровка этих колебаний при трении посредством соответствующей измерительной аппаратуры дает информацию, которая в реальном масштабе времени позволяет своевременно ставить диагноз состояния трибосистемы на основании анализа акустических характеристик.

акустические колебания, амплитуда сигнала, пластическое деформирование, поверхностный слой, энергия импульсов.

Как новый, так и отремонтированный двигатель перед вводом в эксплуатацию в соответствии с паспортными данными должен пройти обкатку. Назначение обкатки – приработка в едином комплексе всех пар трения, входящих в состав агрегата. Погрешности сопрягаемых поверхностей деталей и неточности во взаимном расположении рабочих поверхностей в сопряжениях обуславливают весьма малую фактическую площадь взаимного контакта деталей. Новые или отремонтированные детали из-за неизбежных погрешностей при обработке и сборке контактируют лишь небольшим числом микровыступов, расположенных на вершинах макронеровностей исходных поверхностей трения. Вследствие этого в местах фактического контакта при трении могут развиваться напряжения, превышающие предел текучести, и возникать температуры, близкие к температурам плавления материала. Приложение эксплуатационных нагрузок к деталям при таком контактировании их поверхностей привело бы при работе агрегата или механизма к быстрому перегреву во многих парах и их заеданию. На исходных поверхностях разрушаются те макронеровности, которые по своей форме и размерам не соответствуют условиям работы детали, вследствие чего создается необходимый микрорельеф. При этом удаляются выступы макронеровностей, появляющиеся в результате неточностей обработки, сборочных или тепловых деформаций деталей, за счет чего увеличивается площадь контакта. Пластические деформации, температурные вспышки в местах факти-

ческого контакта, химические реакции поверхностей трения со смазочным материалом и окружающей средой, диффузионные и другие процессы приводят к таким изменениям физических свойств и структуры поверхностных слоев, которые обеспечивают возможность нормальной работы сопряжения при разных нагрузках. Процесс перехода свойств поверхностей трения от исходных к эксплуатационным называется приработкой. Согласно ГОСТ 23.002-78, приработка – это изменение геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, проявляющееся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания. При относительном движении поверхностей трения в процессе приработки время существования отдельных пятен фактического контакта мало, однако за это время в области микроконтакта выделяется значительная энергия, причем если начинает развиваться какой-либо дефект, возникают ударные импульсы, растущие по величине. Энергия этих импульсов затрачивается на развитие зародившегося дефекта, в результате происходит еще большее увеличение энергии [5].

В энергетическом смысле трение, особенно в начальные его моменты, представляет собой процесс трансформации поступающей в систему механической энергии в другие виды энергии. Работа сил трения идет на деформирование поверхностных слоев материала и увеличение их внутренней энергии, а также на прямой нагрев материала. Теоретические оценки и прямые измерения показывают, что температура на пятнах фактического контакта при этом достигает 700–800 °С, тогда как температура остального материала остается близкой к температуре окружающей среды и не превышает 30–600 °С. Время существования температурных пиков составляет величину порядка 10–3 с, а длительность переходных режимов, связанных с нагревом и охлаждением материала при возникновении и исчезновении микроконтакта, оценивается в 0,1–1,0 мс. Основываясь на этих данных, ученым в области физики П. Тиссенем был выдвинут ряд гипотез о состоянии вещества в зоне термических пиков, некоторые из которых уже нашли свое экспериментальное подтверждение. Например, он предполагал, что при фрикционном взаимодействии в результате поглощения энергии в области пятен фактического контакта валентные электроны отрываются от атомов и часть вещества переходит в состояние плазмы. Таким образом, в течение некоторого времени в области пятен контакта отделяемые частицы металла находятся во всех четырех агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном и плазменном. Кроме того, поглощаемая энергия уменьшалась при переходе от менее прочных к более прочным материалам, то есть при переходе от пластического к упругому деформированию, что характерно для процессов приработки. Поскольку размеры пятен контакта малы и пятна существуют малое время, состояние материалов в области термических пиков далеко от равновесного. Наличие в процессе трения этих термических пиков, больших контактных динамических нагрузок, упругого и пластического деформирования, диффузионного перераспределения разрушение поверхностных слоев и образование микротрещин являются причиной ряда физических процессов, сопутствующих трению и вызывающих заметное из-

менение энергетического состояния материала или узла. При высвобождении энергии часть ее освобождается в виде упругих волн. Появление таких волн и определяет явления акустических колебаний (АК) в фрикционном контакте. Аппаратура, которая могла бы выделять и обрабатывать эти явления, должна быть многофункциональной и в большинстве случаев сопряженной с ЭВМ. Очевидно, что алгоритм регистрации этого сложного случайного процесса и характеристики аппаратуры играют большую роль в оценке истинных значений параметров данного процесса. Основная задача такой аппаратуры – выделение наиболее информативных параметров регистрируемого импульсного процесса.

К сожалению, в настоящее время подобные устройства далеки от идеальной системы по ряду причин, основными из которых являются необратимый и сложный характер изнашивания, разнообразие его видов в зависимости от внешних условий и параметров работающей системы. И если в некоторых узлах трения с гидродинамической смазкой удастся реализовать обратные связи в системе циркуляции смазочной среды с помощью контроля давления, температуры, то в системах, работающих без смазки и в условиях граничной смазки, например в трибосопряжении «коленчатый вал – вкладыш», процесс выбора основных диагностируемых параметров пока не завершён. Для получения диагностической информации измеряют параметрические характеристики трибосопряжений: коэффициент трения, температуру в зоне контакта, скорость изнашивания, величины переменных деформаций и усилий. Нами сделана попытка обобщить имеющийся опыт диагностики трибосопряжений и выявить перспективы развития диагностики на этапе приработки двигателей автомобильной техники для повышения информативности данного процесса и улучшения ее качества.

Наиболее известные методы технологической диагностики процессов трения деталей основаны на изучении их общих энергетических характеристик, например, затрачиваемой на процесс формообразования работы. Однако, как показывает анализ, данные методы не позволяют детально исследовать динамику процессов разрушения, трения, пластического деформирования материала в зоне формообразования и структурообразования, которые являются физической основой технологических процессов трения деталей.

В ходе фундаментальных исследований было установлено, что процессы перестройки структуры твердого тела неразрывно связаны с такими явлениями, как акустическое излучение (АИ), или излучение акустических колебаний. Поэтому анализ данных явлений на операциях механического трения обеспечивает возможность непосредственной диагностики процессов разрушения и пластического деформирования поверхностных слоев материалов в зоне структурообразования и формообразования. Основная методологическая проблема технологической диагностики состоит в выборе способа или рациональной комбинации способов получения полезной информации.

Методы диагностирования процессов трения основаны на непосредственном анализе энергетического баланса и его составляющих при взаимодействии поверхностей узлов трения (методы «внутренней энергетики»). К измеряемым параметрам относятся температурные, силовые, вибрационные, электрические

и другие информативные признаки технологических процессов. Преимущество методов «внутренней энергетики» заключается в возможности установления в реальном масштабе времени причины отклонения контролируемого параметра от номинала.

Методы акустической диагностики основаны на физическом явлении излучения исследуемым объектом некоторой энергетической субстанции (волн упругой деформации) при динамической перестройке его структуры (рис. 1). Путем регистрации и анализа параметров излучения определяется состояние объекта, прогнозируется тенденция его последующего изменения. Эти методы диагностики по сравнению с традиционными обладают рядом преимуществ, связанных с возможностью дифференциальной оценки в пространстве и времени аномалий структуры материала.

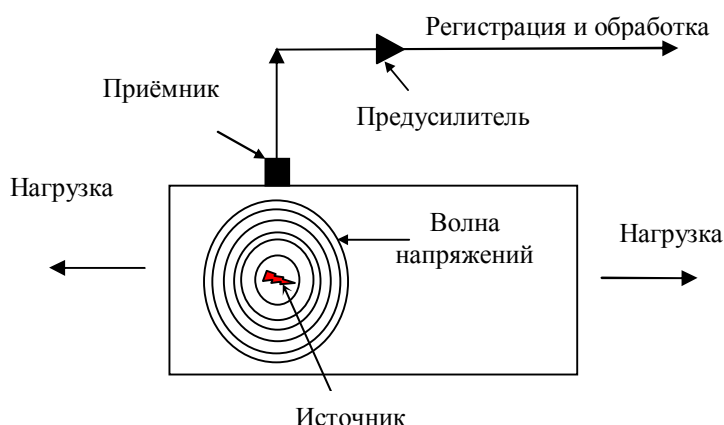


Рис. 1. Основные принципы излучения акустических колебаний

Наиболее важными особенностями метода диагностики посредством регистрации акустических колебаний (диагностики акустических колебаний), определяющих перспективность его использования при исследовании и контроле материалов и конструкций, являются:

1. Обнаружение и регистрация только развивающихся дефектов позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности.
2. Чувствительность значительно превышает чувствительность традиционных методов неразрушающего контроля и позволяет выявлять приращения трещины на 0,025 мм.
3. Интегральность обеспечивает контроль объекта с использованием одного и нескольких преобразователей в случае определения места нахождения дефекта.
4. Проведение непрерывного контроля (мониторинг) работающих объектов обеспечивает их остановку в случае появления и развития опасных дефектов.

Данный метод имеет значительно меньше ограничений, связанных со структурой и физико-механическими свойствами материалов, чем другие мето-

ды контроля, однако в течение многих десятилетий он не находил практического применения. С 80-х годов прошлого столетия началось систематическое изучение акустических колебаний в конструкционных материалах и узлах с различного рода подшипниками. К началу 90-х годов следует отнести первые разработки высокочувствительной аппаратуры для исследования явлений акустических колебаний в металлах и начало применения методики для оценки технического состояния узлов трения.

В настоящее время общепризнанно, что излучение акустических волн – явление, сопровождающее практически все физические процессы в твердых телах при трении, а возможность их регистрации при протекании большинства процессов определяется лишь чувствительностью используемой аппаратуры. Акустические волны возникают как в микропроцессах, обусловленных движением мельчайших элементов структуры тел, так и в макропроявлениях, связанных с разрушением агрегатов и конструкций. Типы этих волн разные. Свойства их также различаются. Важными для контроля свойствами являются такие характеристики, как скорость и затухание волн, зависящие и от типа волны, и от частоты, и от материала, и в какой-то степени от геометрии объекта. Возникшая волна вначале распространяется в пространстве в основном в направлении первоначального толчка, затем область распространения расширяется в разные стороны. Вследствие того, что объем, занимаемый волновым движением, обычно возрастает, а также из-за влияния различных механизмов затухания интенсивность волны постепенно падает, она исчезает. При встрече с препятствием волна часто огибает его, а частично отражается. В металлах распространяются продольные (рис. 2), поперечные (рис. 3), а также некоторые другие типы волн, из которых наиболее важными для акустической эмиссии (АЭ) контроля являются поверхностные – волны Рэлея (рис. 4).

К основным характеристикам волны относят ее длину, частоту, скорость распространения и амплитуду. Среду распространения волн характеризуют волновое сопротивление и коэффициент затухания. Скорость волны приблизительно составляет 3200 м/с , если она распространяется по металлу (стали). Типичный сигнал АЭ на выходе резонансного датчика представлен на рисунке 5.

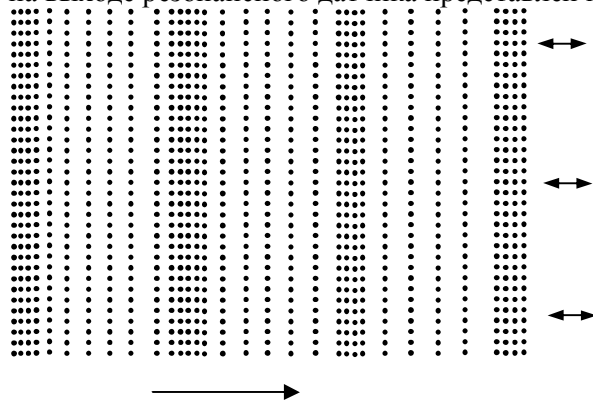


Рис. 2. Продольная волна

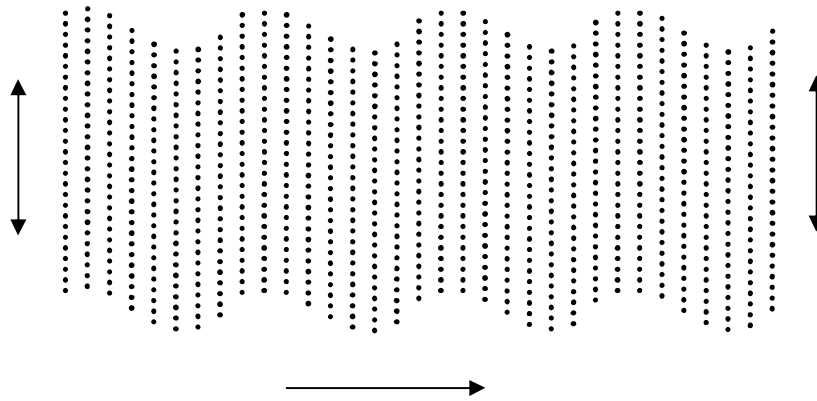


Рис. 3. Поперечная волна

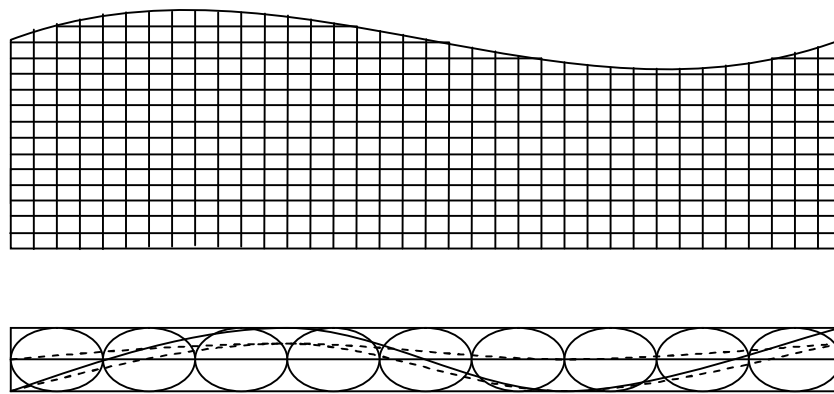


Рис. 4. Поверхностные волны (волны Рэлея)

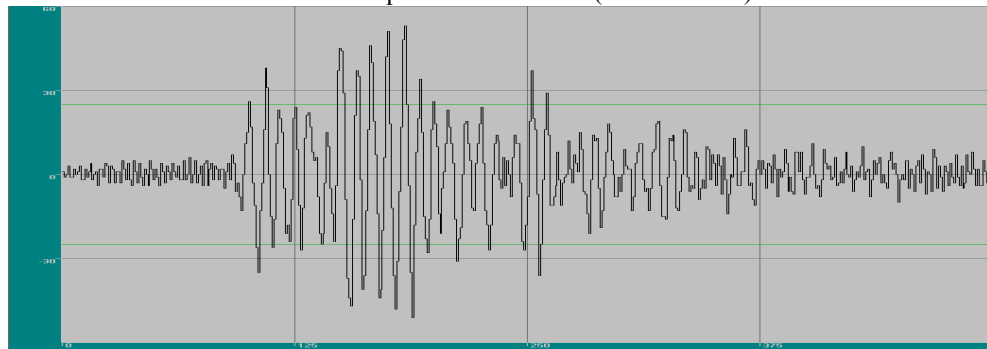


Рис. 5. Типичный сигнал акустической эмиссии

Итак, можно заключить, что метод диагностики акустических колебаний основан на явлении генерации в твердом теле волн упругой деформации при локальном динамическом изменении полей механических напряжений, обусловленном упругим и пластическим деформированием за счет взаимного контактирования шероховатостей поверхностей, а также развитием дефектов, например, зарождением и ростом трещин, фазовыми превращениями и другими быстротекущими процессами [1]. Другими словами, разрыв старых и образование новых участков контактов при взаимном скольжении тел принимается за причину акустических колебаний. Особенностью данного метода диагностики при трении металлов, в частности при их приработке, является присутствие в поверхностных слоях контактирующих твердых тел множества одновременно возбуждаемых акустических источников различной энергии, которые случайным образом распределены по поверхности контакта по причине одновременного протекания трех взаимосвязанных процессов: адгезивно-деформационного взаимодействия поверхностей; изменения под влиянием фрикционного взаимодействия физико-механических свойств поверхностей и образовавшихся на них пленок вследствие размножения, движения и взаимодействия дислокаций между собой; разрушения поверхностей трения. В.М. Щавелин определяет его как результат освобождения энергии при циклическом деформационном и фазовом упрочнении-разупрочнении поверхностного слоя [3]. Следовательно, колебания, инициируемые фрикционным взаимодействием, существенно зависят от физического фактора, характеризующегося отношением тангенциальной прочности молекулярной связи к пределу текучести материала. Именно он оказывает влияние на энергетические параметры излучения.

Одна из важнейших характеристик элементарного акта трения – время, протекающее от момента возникновения фрикционной связи до ее разрыва, которое, согласно исследованиям, составляет 10^{-5} – 10^{-6} с, определяемое по формуле

$$t = \frac{d}{v},$$

где v – скорость скольжения, d – средняя величина диаметра пятна касания при известной форме неровностей (микровыступов) и распределении высот и вершин [3].

Скорость деформации микровыступов (ε_{cp}) при трении, при максимальном напряжении, на пятне касания, равном упругой твердости материала, имеет вид

$$\varepsilon_{\max} = 0,3 \frac{v}{r},$$

где r – радиус кривизны вершин микронеровностей.

Во фрикционном контакте, помимо нормальных, существуют и сдвиговые деформации. На основе экспериментальных данных В.М. Баранова, величина

предельной деформации сдвига (γ_{max}) равна 0,20, следовательно, максимальная скорость сдвига определяется по формуле

$$\gamma_{max} = \frac{0,2v}{(r\sigma')^{1/2}},$$

где σ' – среднее квадратичное отклонение вершин микронеровностей.

Так, возбуждаемая акустическая энергия W_y в единичном контакте оценивается следующим образом:

$$W_y = \frac{Zs\varepsilon^2}{2}t = \frac{Zs\varepsilon^2}{2v},$$

где Z – акустическое сопротивление материала (для стали $15,2 \cdot 10^7$ кг/м², для меди $3,2 \cdot 10^7$ кг/м²), s – площадь сечения [3].

Отсюда следует, что интенсивность выделяемой энергии пропорциональна акустическому сопротивлению взаимодействующих тел.

Из таблицы 1 видно, что уже при малых скоростях скольжения (1 см/с) скорости деформации велики, а при скоростях скольжения 100 см/с соответствуют ударным нагрузкам. Природа выделяемой энергии акустических колебаний при приработке связана с эволюцией дислокационных ансамблей в поверхностных и приповерхностных слоях материалов и условиями их взаимодействия.

Таблица 1

Значение скорости деформации и выделяемой энергии в зоне упругого контакта при различных скоростях скольжения и шероховатости поверхности

Материал	Шероховатость (R_a), мкм	v , см/с	ε , с ⁻¹	γ , с ⁻¹	$W_y, 10^7$ Дж
Сталь	0,32–0,63	1	$0,8 \cdot 10$	$1,3 \cdot 10^2$	81,2
		100	$0,8 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^4$	$81,2 \cdot 10^3$
Медь	0,32–0,63	да0,8·1	$0,8 \cdot 10$	$1,3 \cdot 10^2$	18,2
		100	$0,8 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^4$	$18,2 \cdot 10^3$

Как уже отмечалось, в реальных условиях часть микровыступов деформируется упруго, а часть пластически. Для того чтобы определить характер деформирования выступов (упругий, упругопластический, пластический) необходимо рассчитать среднее напряжение на площадке контакта σ_{cp} (табл. 2).

При пластической деформации колебания обусловлены процессами образования, движения и аннигиляции дефектов кристаллической решетки твердого тела.

Таблица 2

Соотношения для оценки характера деформирования материала

Вид материала	Характер деформирования		
	упругий контакт	упругопластический контакт	пластический контакт
Металлы	$\sigma_{ср.} < 1,06 \sigma_T$	$1,06 \leq \sigma_{ср.} / \sigma_T \leq 3$	$\sigma_{ср.} > 3\sigma_T$

При деформации, соответствующей пределу текучести, наблюдается, как правило, максимум акустических колебаний. Энергетические характеристики сигналов, активируемых при пластической деформации металлов, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры сигналов акустических колебаний для некоторых источников

Вид источника	Амплитуда или энергия импульса (W_n), Па или Дж	Длительность сигнала, мкс	Ширина спектра сигнала, МГц
Дислокационный источник Франка-Рида	$(10^{-8}-10^{-7})G$	$5 \cdot 50 \cdot 10^3$	до 1
Аннигиляция дислокации длиной $10^{-8}-10^{-6} м$	$4(10^{-18}-10^{-16})$	$5 \cdot 10^{-5}$	до 10^2
Образование микротрещины	$10^{-12}-10^{-10}$	$10^{-3}-10^{-2}$	от 0,5 до 50
Исчезновение двойника размером $10^{-9} м^3$	$10^{-3}-10^{-2}$	10^4	–
Пластическая деформация объема материала с характерным размером $10^{-4} м$	10^{-4}	10^3	0,5
Энергия тепловых шумов	$4,2 \cdot 10^{-21} Дж/Гц$	–	до 10

Данные таблицы позволяют дать качественную оценку энергии, выделяющейся при пластическом деформировании микровыступа путем использования допущения о пропорциональности выделяемой энергии изменению объема ΔV пластически деформируемого материала:

$$W_n = \alpha \Delta V,$$

где α – энергия, излучаемая единицей объема пластически деформируемого материала.

В результате Г.А. Сарычевым и В.М. Щавелиным применительно к процессам трения поверхностей было выдвинуто положение, что каждое пятно касания, которое упруго контактирует, деформируется и разрушается с отделением частиц материала, является источником акустических колебаний, которые определяются его площадью и напряженным состоянием [3].

На современном этапе развития акустических исследований можно выделить следующие основные источники акустических колебаний, действующие на разных структурных уровнях:

1) механизмы, ответственные за пластическое деформирование (процессы, связанные с явлениями адгезии и движением дислокаций):

- зернограничное скольжение;
- пластическое оттеснение, отслаивание и массоперенос;
- переход дислокаций через границы модулей упругости;
- отрыв дислокационных петель от точек закрепления;
- текстурирование слоев;

2) механизмы, связанные с разрушением:

- микрорезание и абразивное изнашивание;
- образование, накопление микроповреждений и развитие трещин;
- процессы глубинного вырывания и схватывания металлов приводящие к заеданию.

Зарождаются акустические колебания двояко. Если число элементарных событий, приводящих к возникновению упругих волн, велико, а энергия мала, то акустические сигналы воспринимаются как слабый непрерывный сигнал (непрерывные колебания). Из-за малости энергии, высвобождаемой при единичном акте, энергетическое состояние тела меняется незначительно. Вероятность осуществления следующего такого акта практически не зависит от предыдущего. Как следствие, характеристики акустических колебаний меняются во времени сравнительно медленно, что позволяет рассматривать этот этап как квазистационарный процесс. Если состояние исследуемого материала или узла является неравновесным (зарождение дефектов, нарушение режимов смазки), возможны процессы лавинообразного характера, при которых за малый промежуток времени в процесс вовлекается большое число элементарных событий. В этом случае колебания характеризуются большой амплитудой регистрируемых акустических импульсов (дискретные колебания).

В реальных условиях, при приработке, как показано на рисунке 6, приходится иметь дело с акустическими колебаниями обоих типов. Например, развитие трещин в элементах подшипникового узла под действием внешних и внутренних факторов происходит скачкообразно. Продолжительные периоды стабильного состояния трещины при некотором возможном возрастании пластической деформации чередуются с моментами времени, когда трещина меняет свои геометрические параметры, переходя в новое равновесное состояние.

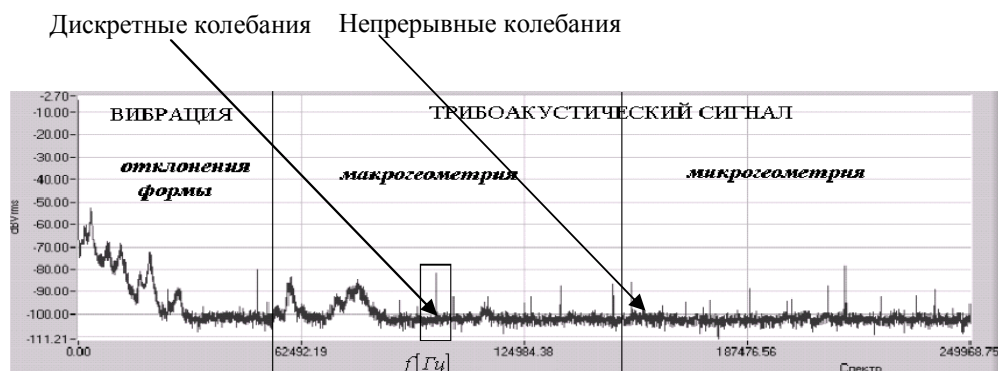


Рис. 6. Типовой сигнал акустических колебаний в виде спектрограммы

Такой переход, связанный с изменением напряженного состояния (разгрузкой) материала в окрестности трещины, сопровождается излучением упругой волны, регистрируемой датчиком как дискретный сигнал. То же самое происходит при разрушении поверхностных слоев по адгезионному механизму с элементами схватывания. В промежутках между скачками при накоплении пластической деформации, отрыве и движении дислокаций наблюдаются характерные для пластического деформирования непрерывные колебания. Для прогнозирования разрушений, образования и развития трещин обычно используют дискретные колебания ввиду простоты регистрации сигнала большой амплитуды. Дискретный сигнал используют также для исследования и контроля износа и нарушений режимов смазки. Из этого следует, что процессы образования и разрушения адгезионных связей, присущие процессу приработки, сопровождаются явлениями как непрерывных, так и дискретных колебаний [2].

Рассмотрим основные информативные параметры акустического сигнала при приработке трибосопряжений. Так, на созданном в исследовательской лаборатории кафедры восстановления военной техники Рязанского военно-воздушного десантного командного училища триботехническом комплексе, основными элементами которого являются машина трения и прибор для акустической диагностики A-line 32D, через который осуществлялась регистрация наложения акустической информации, были проведены исследования взаимосвязи структурных изменений поверхностных слоев трибосопряжения с акустическими явлениями в процессе приработки.

Кроме того, для большей информативности процесса приработки посредством дополнительных датчиков снимались основные триботехнические параметры, такие, как коэффициент трения и температура в зоне контакта. В качестве исследуемой трибосистемы использовалась пара трения «колодка – ролик», моделирующая трибосопряжение двигателя «шейка коленчатого вала – вкладыш». Общий вид и структурная схема триботехнического комплекса представлены соответственно на рисунках 7 и 8.



Рис. 7. Общий вид триботехнического комплекса для исследования приработки

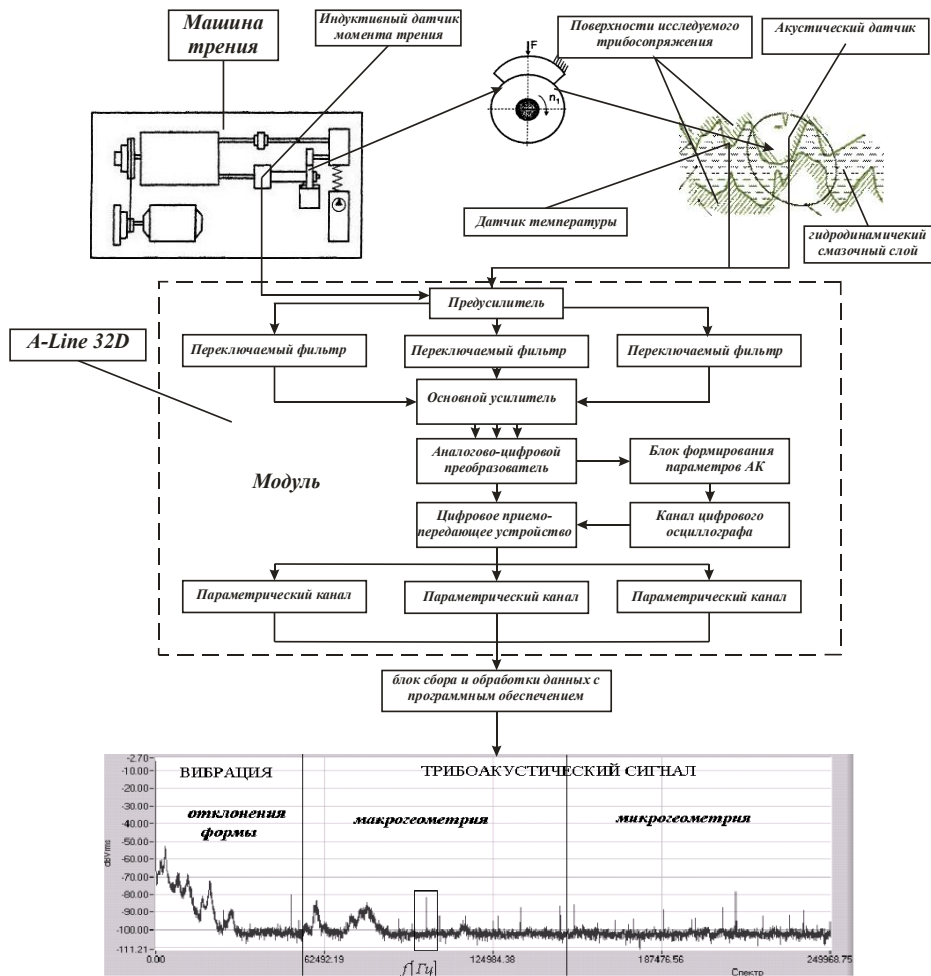


Рис. 8. Структурная схема триботехнического комплекса для исследования процесса приработки

Исследования показали, что метод акустических колебаний объективно отражает характер взаимодействия контактирующих поверхностей. Каждый из акустических параметров тесно связан с порождающим акустическое излучение физическим процессом и содержит информацию о состоянии объекта исследования. Правильность регистрации числа событий зависит от условий распространения сигнала, разрешающей способности измерительной системы и уровня дискриминации измерительной аппаратуры (установленный порог). Если амплитуда колебаний акустического датчика превысила установленный порог измерительной аппаратуры, считается, что началось так называемое «событие». Заканчивается оно, когда амплитуда колебаний уменьшилась настолько, что стала ниже порога. Для такого события (пакета колебаний) вводится ряд характеризующих его параметров. В системе приработки узлов трения, как правило, берутся следующие параметры (рис 9): амплитуда, длительность, время нарастания, энергия, скорость счета (число зарегистрированных выбросов в единицу времени). Поясним значение этих параметров:

Скорость счета (N) – число зарегистрированных превышений колебаний установленного уровня в единицу времени.

Энергия сигнала (E) – энергия акустического излучения, выделяемая в месте измерения или наблюдения; экспериментально установлено, что энергия дискретных колебаний составляет $1,6 \cdot (10^{-9} - 10^{-5}) \text{ Дж}$, а непрерывных – $1,6 \cdot (10^{-19} - 10^{-18}) \text{ Дж}$.

Длительность сигнала (D) – характеристика, указывающая на протяженность события (импульса) от первого и до последнего пересечения установленного уровня дискриминации; данный параметр может изменяться в зависимости от используемой аппаратуры.

Время нарастания сигнала (τ) – часть времени существования события, соответствующая времени достижения им максимума (максимальной амплитуды).

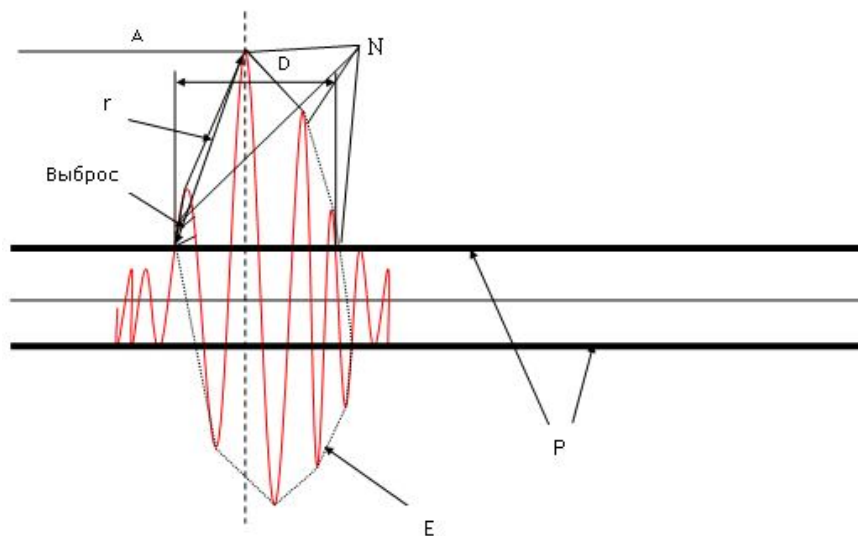


Рис. 9. Характеристики акустического сигнала

A – амплитуда; D – длительность; E – энергия; τ – время нарастания; P – порог дискриминации; N – скорость счета

Одной из важнейших энергетических характеристик акустического сигнала при фрикционном взаимодействии поверхностей трения при приработке является амплитуда импульсов (А), которая зависит от свойств материалов подшипника, составляющих пару трения, уровня нагрузки подшипникового узла, условий смазки, шероховатостей поверхностей трения, температуры и внешних факторов [2]. Основные факторы, оказывающие влияние на амплитуду импульсов акустического сигнала подшипниковых узлов скольжения, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Факторы оказывающие влияние на амплитуду импульсов акустического сигнала подшипникового узла в процессе приработки

№ n/n	Факторы, повышающие амплитуду импульсов акустических колебаний	Факторы, понижающие амплитуду импульсов акустических колебаний
1.	Сильная шероховатость поверхностей качения.	Снижение шероховатости поверхностей качения.
2.	Большая твердость составляющих элементов.	Низкая твердость составляющих элементов.
3.	Неоднородность поверхностных свойств элементов скольжения.	Однородность поверхностных свойств элементов скольжения.
4.	Дефекты в поверхностном слое.	Отсутствие дефектов в поверхностном слое.
5.	Низкая температура.	Рост температуры.
6.	Высокие скорости скольжения.	Снижение скорости скольжения.
7.	Высокие осевые и радиальные нагрузки.	Снижение осевых и радиальных нагрузок.
8.	Нестационарность условий трения скольжения.	Стационарность условий трения скольжения.
9.	Абразивный износ и разрушение микрорезанием.	Адгезионный износ и разрушение пластическим оттеснением.
10.	Недостаток или отсутствие смазочной композиции.	Наличие и достаточность соответствующей смазки.
11.	Отсутствие текстуры.	Наличие текстуры.
12.	Крупное зерно.	Мелкое зерно.

Энергия импульсов определяется не только механической прочностью контакта, но и динамической неоднородностью структуры поверхностного слоя. Следовательно, амплитуда импульсов несет в себе информацию об энергии источника. Изменение амплитуды времени в процессе приработки отражает переход от одного вида контактного взаимодействия к другому, что позволяет проследить динамику процессов развития дефектов на ранней его стадии.

Постепенная стабилизация параметров акустических импульсов в процессе приработки, а также коэффициента трения и температуры говорит о переходе трибосистемы (поверхностей трущихся образцов) к устойчивому состоянию с минимальной диссипацией энергии, что может свидетельствовать об ее окончании.

Кроме того, совокупность факторов во времени (стабилизация скорости счета импульсов и амплитуды) в процессе приработываемости говорит о том, что дефор-

мирование и разрушение поверхностных слоев, а также степень разрушения этих слоев в единицу времени стремятся к минимуму. Характерно, что параметры акустических колебаний (акустических сигналов), в частности скорости счета и амплитуды, не только стабилизируются по окончании приработки, но и несколько уменьшаются до определенного конечного значения (рис. 10, 11). Уменьшение дисперсии амплитуды импульсов, показывает, что по окончании приработки напряженно-деформированное состояние отдельных пятен фактического контакта выравнивается, а уменьшение амплитуды соответствует тому, что напряжения на них становятся минимально возможными для этих условий трения [2].

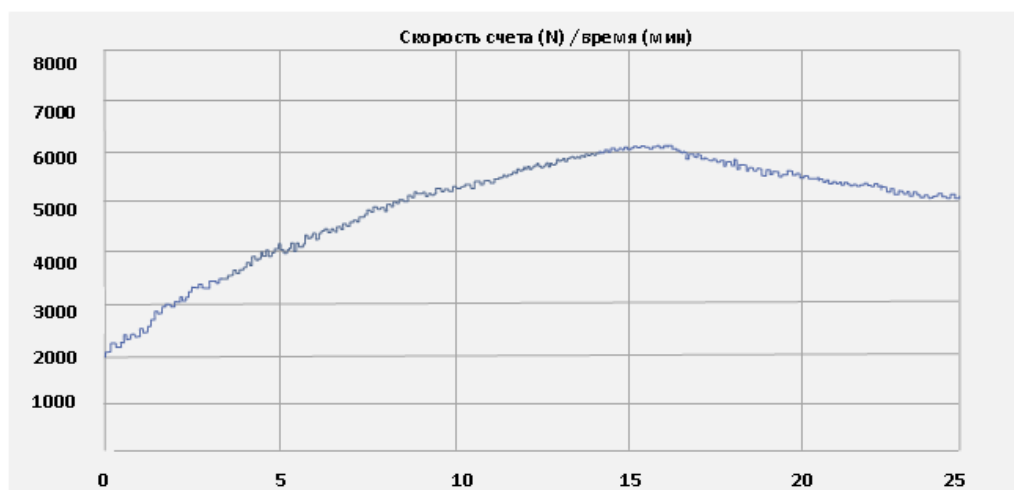


Рис. 10. Зависимость скорости счета от времени приработки



Рис. 11. Зависимость амплитуды акустических импульсов от времени приработки

Таким образом, в результате проведенных исследований подтверждается гипотеза, согласно которой окончание приработки соответствует переходу неровностей в состояние упругого контакта. Уменьшение энергетических параметров акустических колебаний свидетельствует об уменьшении диссипации энергии в окружающую среду, что связано с уменьшением трения и изнашивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов, В.М. Акустические приборы ядерной энергетики [Текст] / В.М. Баранов, К.И. Молодцов. – М. : Атомиздат, 1980. – 144 с.
2. Барзов, А.А. Технологическая диагностика [Текст]. – М. : Машиностроение, 2005. – 383 с.
3. Грешников, В.А. Акустическая диагностика [Текст] / В.А. Грешников, Ю.Б. Дробот. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 276 с.
4. Свириденко, А.И. Акустические и электрические методы в триботехнике [Текст] / А.И. Свириденко [и др.] ; под ред. В.А. Белого. – Минск : Наука и техника, 1987. – 280 с.
5. Щавелин, В.М. Акустический контроль узлов трения ЯЭУ [Текст] / В.М. Щавелин, Г.А. Сарычев. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 176 с.