

УДК 620.111.3:620.178.16

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ТОЧЕК ПРИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ<sup>1</sup>

© И. А. Растегаев<sup>2</sup>, Д. Л. Мерсон<sup>2</sup>, А. Ю. Виноградов<sup>2</sup>, А. В. Даниук<sup>2</sup>*Статья поступила 8 июля 2015 г.*

Предложен пример использования метода акустической эмиссии для определения критических точек при трибологических испытаниях на стандартных машинах трения. Отличительной особенностью предлагаемого подхода являются способы определения и задания нагрузки разрушения, а также имитации доминирующих процессов изнашивания в паре трения. Данный подход может использоваться и как метод идентификации источников АЭ, регистрируемых при трении и изнашивании различных узлов трения. Показано, что конфокальная лазерная микроскопия может эффективно заменить большинство известных способов оценки износа.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия; алгоритм обучения аппаратуры; трибологические испытания; экспериментальное моделирование изнашивания.

Одной из экспериментальных задач, решаемых с помощью машин трения (МТ), является установление «критических точек» (К.Т.), соответствующих точкам перегиба на кривой зависимости износа от пути трения —  $I(S)$  и свидетельствующих о переходе от одного вида контактного взаимодействия к другому. Данные о критических точках особенно актуальны при проведении многофакторных триботехнических испытаний и используются как для классификации видов износа, так и для установления границ применимости известных расчетных зависимостей [1 – 3].

Согласно работе [2] в процессах трения и изнашивания различают критические точки:

- 1) перехода от упругого деформирования к пластическому или от упругого деформирования к разрушению;
- 2) перехода от пластического оттеснения к микрорезанию или задиру;
- 3) разрушения адсорбционной пленки;
- 4) формирования хемосорбционной пленки (химического соединения);
- 5) разрушения хемосорбционной пленки;
- 6) разрыхления поверхностного слоя за счет изменения структуры твердого тела;
- 7) общего размягчения контактной зоны, приводящего к намазыванию.

В настоящее время наука о трении и износе позволяет прогнозировать появление некоторых К.Т. главным образом на основе анализа соотношений  $h/r$

и  $\tau/\sigma_t$  в зависимости от температуры, где  $h$  — глубина внедрения единичной неровности;  $r$  — радиус единичной неровности;  $\tau$  — тангенциальная прочность молекулярной связи;  $\sigma_t$  — предел текучести материала основы. Учитывая многофакторность и скоротечность элементарных процессов трения и изнашивания, необходимо признать, что в настоящее время определение конкретных положений критических точек на кривых  $I(S)$  расчетным путем — задача практически невыполнимая. Поэтому ее решают экспериментально методом измерения износа в серии одинаковых испытаний, отличающихся путем трения или нагрузкой трения. Однако и при таком подходе остается неоднозначность определения К.Т. в пределах пути (времени) трения из-за неустраняемости отклонений (неповторяемости) в начальных и экспериментальных условиях каждого испытания даже в серии одинаковых трибоиспытаний, выполняемых одним оператором на одной машине трения. В связи с этим необходимо использовать дополнительные исследовательские методы.

Идея применения метода акустической эмиссии (АЭ) в качестве одного из исследовательских методов идентификации К.Т. ненова. Например, в работах [4, 5], получивших наиболее широкую известность, показана эффективность использования метода АЭ для определения критических точек, отмеченных в пунктах 1, 2, 3 и 5. Целенаправленные работы по акустоэмиссионному определению точек 4, 6 и 7, насколько нам известно, не проводились, если не считать работ по АЭ-контролю приработки поверхностей трения и изучению изнашиваемости покрытий или термоупрочненных слоев. Несмотря на очевидные успехи развития метода АЭ его применение сдержи-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ ГК № 11.G34.31.0031 и Гранта № 31/13/71-СОФ.

<sup>2</sup> Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия; e-mail: RastIgaev@yandex.ru, D.Merson@tltsu.ru, alexei.vino@gmail.com, alvdan@mail.ru

вается, во-первых, трудностью установления зависимости между происходящими процессами и параметрами сигналов АЭ, во-вторых, необходимостью постоянной подстройки АЭ аппаратуры, как под каждый тип/схему машины трения и геометрию образцов, так и под каждую группу новых, существенно отличающихся испытательных материалов (например, сталь – сталь, сталь – цветные сплавы, сталь – полимеры и т.д.).

В данной статье описан опыт применения АЭ аппаратуры для определения К.Т., который доработан, по нашему мнению, до эффективного практического использования на семи трибологических схемах испытаний по трем стандартизированным [6 – 8], трем специальным (внутренние методики ОАО «АвтоВАЗ») и одной экспресс-методике [9]. Методика апробирована на трех машинах трения: типовой четырехшариковой машине трения ЧМТ-1, универсальном трибометре Nanovea TRB с линейным и вращающимся столом (реализованы возвратно-поступательное движение по линии, а также движение по радиусу и спирали) и оригинальной машине трения УМИТИ типа пластина/ролик, собранной в лаборатории трения и смазочных материалов ОАО «АвтоВАЗ»<sup>3</sup> [10].

#### Требования к акустико-эмиссионной аппаратуре и необходимым вспомогательным средствам для реализации предлагаемой методики

Основные требования к АЭ аппаратуре, применяемой при изучении процессов трения и изнашивания, приведены в работе [5], поэтому в данном разделе обратим внимание только на некоторые особенности, необходимые для реализации предлагаемого подхода.

Критические точки выявляли по АЭ параметрам: огибающей сигнала ( $ES$ ) и среднеквадратическому значению сигнала ( $RMS$ ). Данные параметры должны регистрироваться непрерывно и отображаться в режиме on-line во время испытаний, при этом их можно рассчитывать как программно, так и аппаратно:

$$ES(t_i) = \begin{cases} |A(t_i)|, & \text{если } |A(t_i)| \geq ES(t_{i-1}) \\ ES(t_{i-1}) \exp(-T_d/\tau), & \text{если } |A(t_i)| < ES(t_{i-1}), \end{cases} \quad (1)$$

$$RMS(t_i) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_0^T A^2(t_i)}, \quad (2)$$

где  $A(t_i)$  — действующее значение напряжения сигнала в  $i$ -й точке как функция времени, В;  $T_d$  — период дискретизации АЭ сигнала, с;  $\tau$  — постоянная времени, с;  $T$  — время осреднения, с. Время  $T = 0,1$  с для  $RMS(t)$  и  $\tau = 3 - 5$  мс для  $ES(t)$  было подобрано эмпирически таким образом, чтобы использовавшаяся АЭ аппаратура была менее чувствительна к помехам

и шуму и одновременно позволяла отслеживать все подробности появления импульсных сигналов АЭ. Корректировку времени осреднения проводили по отношению амплитуда/длительность волновых форм сигналов акустической эмиссии  $A(t)$ . Волновые формы записывали покадрово по превышению амплитуды сигнала заранее выставленного порогового уровня дискриминации. Кроме этого, кадры записи волновых форм АЭ необходимы и для интерпретации АЭ данных (об этом будет сказано ниже).

Вместо параметров  $ES$  и  $RMS$  также могут быть использованы: среднее значение детектированного сигнала ( $A$ ), суммарный счет ( $N$ ) или скорость счета АЭ ( $\dot{N}$ ), дисперсия ( $\sigma$ ) или скорость изменения дисперсии АЭ ( $\dot{\sigma}$ ) и другие известные интегральные параметры оценки АЭ [4, 5]. Однако по нашему опыту наиболее эффективно применение именно  $ES$  и  $RMS$ , поскольку данные параметры учитывают как амплитуду и энергию отдельных источников, так и частоту их проявления за время осреднения.

Запись АЭ проводили в диапазоне частот 50 – 1000 кГц при общем усилении 40 дБ с помощью интегрированных в компьютер модулей АЦП. Максимальная неравномерность амплитудно-частотной характеристики преобразователя АЭ в указанном диапазоне не превышала  $\pm 5$  дБ от среднего значения. Частота дискретизации параметрической (боковая сила) и АЭ ( $ES$  и  $RMS$ ) информации составляла 1,0 кГц; при записи формы сигнала АЭ частоту дискретизации выбирали в диапазоне 2 – 6 МГц (т.е.  $T_d = 170 - 500$  нс и  $T_d < \tau$ ). Предлагаемый подход реализуем как в пороговом, так и беспороговом режимах записи АЭ.

В качестве вспомогательных средств при реализации уточняющих испытаний требуются приборы, предназначенные для микроскопических исследований, для определения объема/веса изношенного материала, для измерения шероховатости/волнистости поверхности трения, а также площади повреждения. Наиболее универсальным и эффективным способом оценки этих параметров (особенно при малозначительном весовом износе по отношению к массе образцов) является анализ 3D сканов мест износа, полученных на конфокальном лазерном микроскопе (КЛМ) типа Olympus LEXT OLS4000, который и использовали в работе.

#### Алгоритм определения акустико-эмиссионных признаков критических точек при испытаниях на машинах трения

Алгоритм применения метода АЭ представлен на рис. 1. Его выполняют один раз на одном типе машины трения, используя одну методику испытаний на трение и износ для группы материалов одного типа, и реализуют следующим образом.

1. Проводят подготовку машины трения (МТ), а также первичную настройку АЭ аппаратуры согласно

<sup>3</sup> В экспериментальной части работы принимали участие инженер ЛТисМ ОАО «АвтоВАЗ» Б. А. Чудинов и специалист АЭ контроля ООО «НПФ «Промэкспертиза» А. В. Чугунов.

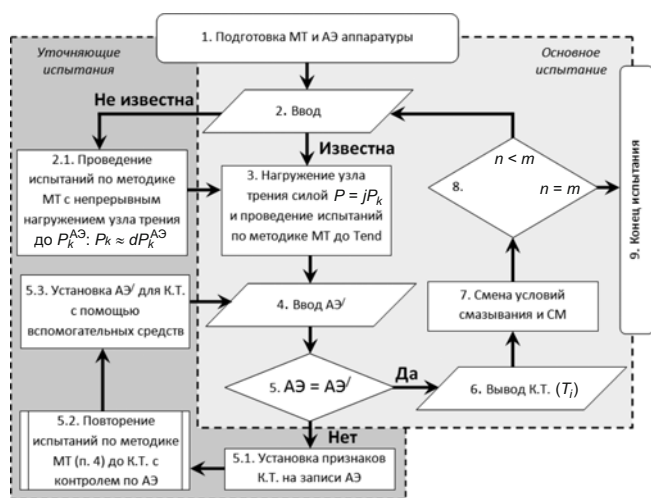


Рис. 1. Алгоритм определения акустико-эмиссионных признаков критических точек при трибологических испытаниях

инструкции по эксплуатации и методике испытаний. При настройке АЭ аппаратуры особое внимание уделяют оценке качества акустического контакта преобразователя АЭ, например, с помощью имитаторов АЭ известного типа (калибратора, имитатора Су – Нельсона, обратимого преобразователя АЭ и т.д.). Пиковую амплитуду регистрируют в пределах измерительного диапазона, поэтому особое значение имеет правильная настройка динамического диапазона и усиления аппаратуры. Для этого может потребоваться пробное испытание на черновом или настроенном образце. Пробное испытание и первую серию основных испытаний проводят в режиме сухого трения.

2. Определяют  $P_k$  — критическую нагрузку, при которой происходит задиры поверхностей. Для типовых пар контактных материалов в различных средах нагрузка  $P_k$  известна (табличная величина). Для смазочных материалов  $P_k$  является показателем качества и вносится в сертификат их соответствия стандартам, которые в настоящее время сведены в [11]. Если подобные данные отсутствуют, то проводят уточняющее испытание 2.1 (см. рис. 1), при котором непрерывно нагружают узел трения от минимальной нагрузки до нагрузки, превышающей максимальную испытательную по трибометодике минимум в 1,25 раза. Настроенную серию испытаний проводят без замены образцов и смазочного материала (если испытание не из серии п. 7 алгоритма).

Нагрузка

$$P_k = dP_k^{AЭ}, \quad (3)$$

где  $P_k^{AЭ}$  — нагрузка, соответствующая резкому нарастанию уровня  $ES$  и  $RMS$  АЭ (рис. 2, время  $T_4$ );  $d$  — безразмерный коэффициент, учитывающий расхождение в значениях критических нагрузок, полученных стандартными методами и предлагаемым подходом. Расхождение возникает из-за несовпадения начальных

условий, так как при непрерывном нагружении к следующей нагрузке узел трения подходит с увеличенной площадью пятна контакта и температурой, а значит, меньшими удельным давлением в контакте и прочностью материала. Коэффициент

$$d = P_k^{AЭ} / [P_k], \quad (4)$$

где  $P_k$  — критическая нагрузка, при которой происходит задиры поверхностей, полученная по стандартной методике трибоиспытаний (см., например, [6, 11, 12]). В большинстве случаев  $d = 0,8 - 1,5$ . Подробное описание этапа определения  $P_k^{AЭ}$  и  $d$  можно найти в работе [9].

3. Проводят трибоиспытание с записью АЭ согласно методике испытаний на трение и износ при фиксированной нагрузке

$$P = jP_k, \quad (5)$$

где  $j = 0,7 - 0,9$  — безразмерный коэффициент понижения испытательной нагрузки. При длительных трибоиспытаниях, нормированных по времени ( $T_{end}$ ), рекомендуют выбирать значение  $j$  ближе к 0,7, при кратковременных — ближе к 0,9. Данный подход объясняется следующим. Несмотря на уменьшенную нагрузку  $P_k$  испытания сопровождаются повышением температуры узла трения, что в конечном итоге приводит к разрушению контактных поверхностей. Такой прием позволяет отсрочить время критического разрушения и «заставляет» трибосистему последовательно пройти все основные стадии изнашивания (см. рис. 2) при сравнительно коротком времени испытания ( $T_{end} \leq 5 - 10$  мин). Например, для группы низколегированных сталей стадии изнашивания в основном имеют следующий вид: абразивно-усталостное (АУ); адгезионное, происходящее за счет схватывания и разрыва точек (АД) и областей (АД + ПО) контакта в зоне трения; пластическое оттеснение (ПО).

4. Пусть АЭ' — известный набор данных, характеризующих источник или известную зависимость изменения параметров АЭ при действии определенного механизма разрушения поверхностей трения. Такие признаки формируют из литературных источников или извлекают из ранее проведенных исследований. В настоящее время все известные АЭ признаки К.Т. (АЭ') можно свести к следующим [4, 5, 13 – 17 и др.]:

плавное повышение/понижение среднего уровня параметра оценки АЭ (см. рис. 2, а), например, из-за изменения активности сигналов АЭ с близкими амплитудами (точка  $T_3$  на рис. 2, а);

резкое повышение/понижение среднего уровня параметра оценки АЭ, например, при регистрации сигналов АЭ значительно большей/меньшей амплитуды (точка  $T_4/T_5$  на рис. 2, а);

повышение/понижение дисперсии параметра оценки АЭ, например, изменение сигналов АЭ в боль-

шом/малом диапазоне значений амплитуд (см.  $T_4 - T_5/T_3 - T_4$  на рис. 2);

дискретная АЭ, например, АЭ в виде отдельных высокоамплитудных импульсов (см.  $T_2 - T_3$  и  $T_4 - T_5$  на рис. 2);

перераспределение энергии по частотам в спектре АЭ (спектре интегральных параметров оценки АЭ или спектре кадров записи формы сигналов АЭ) [15, 17];

многомерные соотношения между различными параметрами оценки АЭ (например, отношения амплитуда/длительность [16], амплитуда/центральная частота/эффективная ширина спектра [17] и т.д.);

сочетание вышеприведенных АЭ признаков (интерпретация по кадрам записи формы сигнала АЭ).

Ввод АЭ' заключается в выборе вышеприведенных АЭ признаков К.Т. из базы экспериментальных данных, сформированной в ходе предыдущих испытаний или по литературным данным. Таким образом, на данном этапе определяются ключевые информационные АЭ признаки, которые будут использованы далее для идентификации К.Т. исходя из известных технических решений. Если АЭ признаки не известны или их невозможно задать исходя из общих принципов понимания проявления АЭ при трении и изнашивании, то для создания базы экспериментальных данных необходимо перейти к уточняющим испытаниям по п. 5.1 – 5.3, минуя этап сравнения (п. 5) (см. рис. 1).

5 и 6. Сравнивают запись АЭ, полученную по п. 3, с признаками АЭ', установленными на предыдущем этапе алгоритма. Сравнение заключается в определении степени подобия формы участков записи АЭ признакам АЭ', при этом форма сравнения подбирается под установленные информационные АЭ признаки и может быть задана в виде: предельной величины параметров [4, 5, 13, 14 и др.]; кластеров в поле нескольких признаков [18 и др.]; формы кривых спектральной плотности, полученных на основе Фурье- или вейвлет-преобразования [15 и др.]; формы статистических распределений [5, 13 и др.] и т.д. В качестве критерия степени подобия образов АЭ и АЭ' можно использовать любой из статистических критериев сравнения функций распределения плотности вероятности случайной величины: коэффициенты корреляции, Пирсона, Колмогорова – Смирнова, Уитни – Мана, R-квадрат, расстояние Махаланобиса и др. Реализация способов сравнения представляет собой отдельную практическую задачу, которая в настоящее время имеет множество решений [15, 18 и др.], поэтому в рамках данной работы будет рассматриваться в общем виде.

Если АЭ = АЭ' в пределах задаваемого коэффициента подобия, то переходим к п. 6 алгоритма, который заключается в определении К.Т., представляющей собой временную точку ( $T_i$ ) на записи АЭ, имеющую признак К.Т., где  $i = 1, 2, 3, \dots$

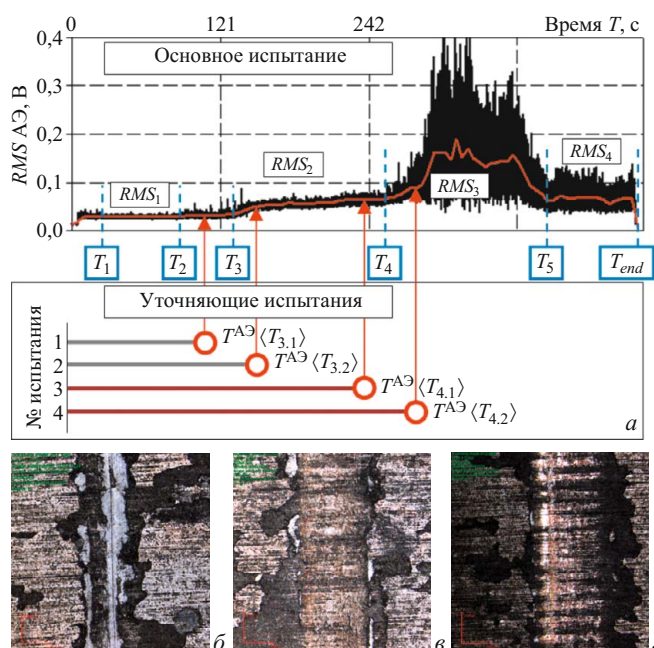


Рис. 2. Один из типичных видов RMS АЭ, получаемых по п. 3, и схема проведения уточняющих испытаний по п. 5.1 – 5.3 (см. рис. 1) предлагаемого алгоритма (а), а также фрагменты дорожек износа, полученных в уточняющих испытаниях для точек  $T^{AE} \langle T_{3,1} \rangle$  (б),  $T^{AE} \langle T_{3,2} \rangle$  и  $T^{AE} \langle T_{4,1} \rangle$  (в),  $T^{AE} \langle T_{4,2} \rangle$  (г)

Если АЭ  $\neq$  АЭ' в пределах задаваемого коэффициента подобия, т.е. стадии изнашивания отображаются не типично (отлично от известных зависимостей) или однозначно не идентифицируются, то проводят уточняющие испытания по п. 5.1 – 5.3 (см. рис. 1) с целью установления соответствия АЭ признака К.Т. По сути, уточняющее испытание представляет собой основное испытание длительностью  $T^{AE} < T_{end}$ , но равное исследуемой точке  $T_i$ . При этом минимальный контроль соответствия уточняющего испытания основному за время  $T_i$  проводится по интегральной кривой АЭ (уровень которой должен повторить исследуемое проявление в точке  $T_i$  основного испытания), максимальный — с привлечением других параметров слежения ( $k$ ). Под  $k$  могут подразумеваться температура узла трения, момент или сила трения, величина износа и др. Таким образом, в идеале уточняющее испытание номер  $\langle i \rangle$  должно быть остановлено в точке  $T^{AE}$ , удовлетворяющей следующему условию:

$$T^{AE} \langle i \rangle = \begin{cases} AЭ(T^{AE}) = AЭ'(T_i); \\ T^{AE} = T_i; \\ k(T^{AE}) = k(T_i). \end{cases} \quad (6)$$

Если время существования К.Т. мало или инерционность средств испытания не позволяет остановить уточняющее испытание в К.Т. с выполнением условия (6), то соответствие АЭ признака К.Т. устанавливаются по двум уточняющим испытаниям, имитирующим предшествующее и последующее состояния трибо-

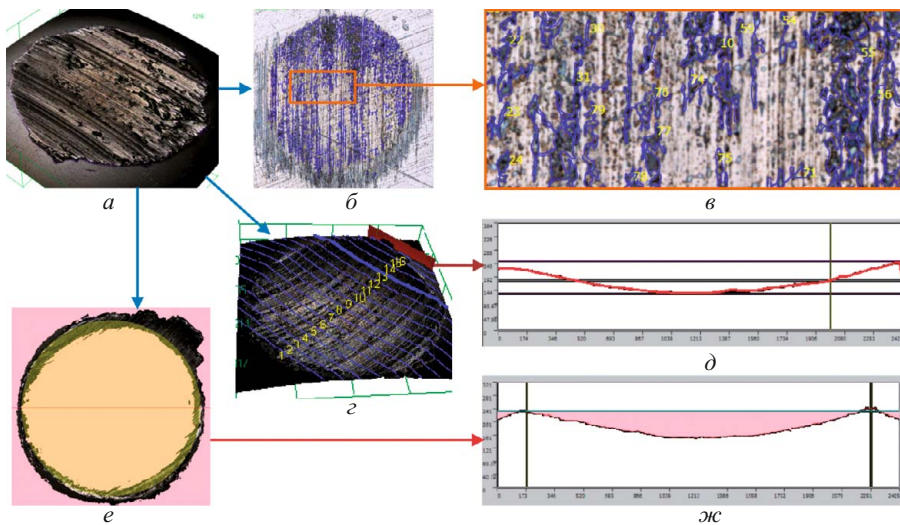


Рис. 3. Результаты анализа 3D-скана поверхности пятна износа (а); б и в — данные определения общей площади повреждения различными механизмами изнашивания (выделенные области — области схватывания); г и д — волнистости, шероховатости и площади сечения; е и ж — объема изношенного материала

системы вблизи К.Т., а условие испытаний (б) для них запишется соответственно в виде

$$T^{AЭ}\langle i,1 \rangle = \begin{cases} AЭ(T^{AЭ}) = AЭ(T_{i-1}); \\ T^{AЭ} = 0,8..0,9T_i; \\ k(T^{AЭ}) \leq k(T_i), \end{cases} \quad (7.1)$$

$$T^{AЭ}\langle i,2 \rangle = \begin{cases} AЭ(T^{AЭ}) = AЭ(T_{i+1}); \\ —; \\ k(T^{AЭ}) > k(T_i). \end{cases} \quad (7.2)$$

Рассмотрим реализацию уточняющих испытаний п. 5.1 – 5.3 (см. рис. 1) на примере записи АЭ, представленной на рис. 2. Пусть, например, неоднозначны причины повышения уровня АЭ в К.Т.  $T_3$  и доминирующего механизма износа при задире в К.Т.  $T_4$ . По основному испытанию (см. рис. 2, а) определяем приблизительную длительность уточняющих испытаний:  $T_3 = 140$  с,  $T_4 = 300$  с. В точках  $T_3$  и  $T_4$  сложно остановить испытание, поэтому для уточнения проводим новое испытание (№ 1) при тех же условиях, но прерываем его в точке  $T^{AЭ}\langle T_{3,1} \rangle$  (см. рис. 2, а) в соответствии с (7.1) до достижения точки  $T_3$ ; правильность остановки контролируем по среднему уровню  $RMS(T^{AЭ}) = RMS_1$ . Оцениваем поверхность разрушения (см. рис. 2, б). Далее проводим новое испытание (№ 2) при тех же условиях, но останавливаем его сразу же, когда АЭ в реальном времени записи переходит с контрольного уровня  $RMS_1$  на  $RMS_2$  (точка  $T^{AЭ}\langle T_{3,2} \rangle$  на рис. 2, а), оцениваем поверхность разрушения (см. рис. 2, в). Проводим также испытание (№ 3) для точки  $T_4$  с остановкой в точке  $T^{AЭ}\langle T_{4,1} \rangle = 0,8T_4$ , контролируем АЭ =  $RMS_2$  (см. рис. 2, а) и проводим оценку разрушения (см. рис. 2, в). Далее следуют испытание № 4 с остановкой в точке  $T^{AЭ}\langle T_{4,2} \rangle$ , контроль АЭ  $\approx 0,5 - 1RMS_3$  (см. рис. 2, а) и оценка разрушения (см. рис. 2, г). Здесь рассмотрен случай контроля точек  $T^{AЭ}$  только по параметру  $RMS$ , другие параметры слеже-

ния ( $k$ ) не учитываются, но с их применением точность контроля повышается. Весь процесс управления осуществляет оператор трибоустановки.

Идентификацию и оценку источников АЭ в уточняющих испытаниях проводят указанными выше известными вспомогательными способами по виду поверхности износа (см. рис. 2, б – г), а именно путем измерения площади, шероховатости/волнистости, глубины повреждения и износа. Доминирующий механизм изнашивания определяют по процентному соотношению между площадями повреждения пятна износа с признаками царапин (АУ), точек с синевой перегрева (АД), оттесненных областей схватывания (АД + ПО) или полностью сдвигаемых слоев материала (ПО). На рис. 3 приведена примерная схема анализа разрушения поверхностей трения по одному 3D-скану, полученному конфокальной лазерной сканирующей микроскопией.

7 и 8. Сменой условий смазывания (сухое, жидкостное, твердое, ...) и смазочных материалов (СМ) изменяют приоритет в действующих доминирующих механизмах изнашивания с целью выделения АЭ от исследуемых источников разрушения. На рис. 1 каждое условие смазывания обозначено  $n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), а общее количество вариантов —  $m = \max(n)$ . В зависимости от задач и исследуемых контактных и смазочных материалов условия смазывания могут быть сокращены или, наоборот, расширены. Например, для пар трения типа сталь – сталь необходимо и достаточно применение следующих четырех условий смазывания ( $m = 4$ ): сухое трение (первое испытание) имитируется АУ  $\rightarrow$  АУ + АД  $\rightarrow$  АД + ПО; смазывание водой — АУ  $\rightarrow$  закипание воды  $\rightarrow$  ПО, моторным маслом — АУ  $\rightarrow$  АД + ПО, консистентным смазочным материалом для тяжело нагруженных узлов (например, марок «ШРУС-4М», «ШРБ-4» и др.) — АУ  $\rightarrow$  АД. Таким образом, в данном случае необходимо и достаточно проведение 12 испытаний (3 испытания  $\times$  4

условия смазывания), из которых 8 на повторяемость ( $2 \times 4$ ).

10. При достижении  $n = m$  получены все варианты проявления АЭ, позволяющие идентифицировать К.Т., которые могут возникать в исследуемой группе пар трения при испытании по методике и на машине трения, которые применялись для исследования АЭ. Полученные подобным образом данные пригодны также для определения и корректировки величины градуировочных коэффициентов, применяемых в режиме реального времени при расчете площади повреждения или массового износа по АЭ параметрам, например, с помощью способов, приведенных в работах [4, 5, 9, 13, 16, 17].

### Оценка эффективности предложенных подходов в сравнении со стандартизированными методами, используемыми на типовых машинах трения

С физической точки зрения погрешность определения К.Т. АЭ аппаратурой с применением данного подхода и без него не меняется, поскольку метод АЭ реализуется одинаково. Различие состоит в идентификации К.Т. в режиме реального времени и количестве привлекаемых вспомогательных средств. При наличии базы данных АЭ признаков К.Т., адаптированной на конкретную машину трения и методику трибоиспытаний, потребуется меньшее количество технологических переходов и вспомогательных средств. Среди апробированных стандартных методов испытаний определение К.Т. регламентирует только методика [6], в которой К.Т. находится в виде нагрузки  $P_k$ . Значения  $P_k$  по параметрам АЭ и по стандартной методике испытаний [6] полностью совпали [9].

В других апробированных стандартных методиках [7, 8] К.Т. оцениваются только по кривой изменения силы/момента или коэффициента трения  $[\mu(T)]$ , но данные показатели являются дополнительными, поэтому определение К.Т. по ним не нормируется. В работе [19] показана корреляционная связь между скоростью изменения коэффициента трения  $\mu(T)/dt$  и активностью АЭ (в нашем случае  $RMS$ ). В связи с этим проведено сравнение К.Т., найденных по зависимостям  $\mu(T)$ ,  $\mu(T)/dt$  и  $RMS(T)$ , полученным при сопровождении испытаний [7], которое показало следующее. По  $\mu(T)$  и  $\mu(T)/dt$  невозможно определить все К.Т., видимые на кривой  $RMS(T)$ , например, точки  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_4$  и  $T_5$ , указанные на рис. 2 и 4. Следует отметить, что информативность кривых  $\mu(T)$  и  $\mu(T)/dt$  при определении К.Т. практически идентична. Поэтому расхождение рассчитывали только для К.Т., идентифицированных на кривых  $\mu(T)$  и  $\mu(T)/dt$ ; оно составило  $2,6 \pm 1,8$  и  $5,8 \pm 3,6$  % соответственно. На рис. 4, например, это точка  $T_3$ .

С применением предлагаемого алгоритма исследования АЭ появилась возможность непрерывного определения весового износа непосредственно во время

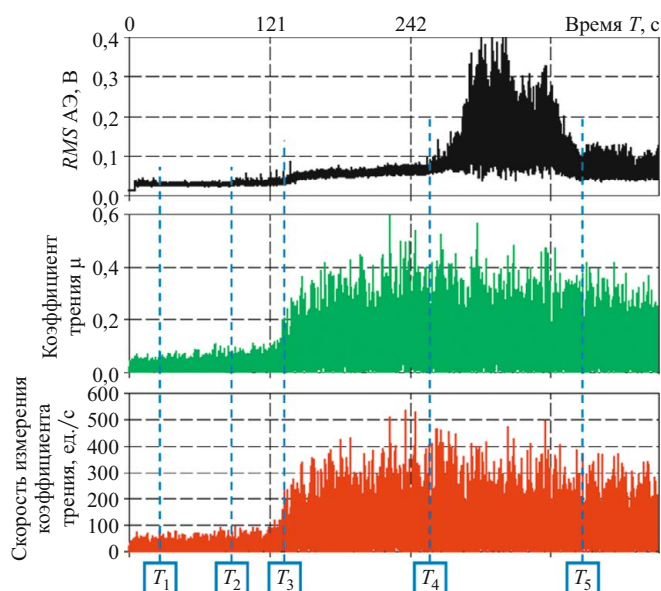


Рис. 4. К.Т., определенные по зависимостям  $RMS$  АЭ, коэффициента трения и скорости изменения коэффициента трения от времени

испытания [4, 5, 9, 13, 16, 17]. Работу по адаптации параметров  $ES$  и  $RMS$  под способы [4, 5, 9, 13, 16, 17 и др.] мы не проводили, но теоретически применение предлагаемых АЭ параметров не должно существенно увеличить погрешность известных способов. Согласно работам [16, 17] погрешность АЭ способов измерения износа не превышает 15 % и в основном связана с неучтенными экспериментальными факторами и допущениями методик исследования и измерения.

Сравнение расхождения данных, полученных по 3D скану на КЛМ Olympus LEXT OLS4000 с увеличением 400 и с помощью стандартизированных средств методик [6–8], позволило установить следующее. Расхождения в результатах измерения составили: потери веса по 3D скану (произведение объема потерянного материала на его плотность) и на аналитических весах Sartorius ED-224S для трибопар [6] —  $15,6 \pm 12,3$  %; объема оттесненного материала по 3D скану и методом сечений методики [7] (по шести сечениям через 1,5 мм дорожки трения) —  $13,5 \pm 2,9$  %; размеров контакта по 3D скану [6] и на микроскопе МБС-10 с отсчетной шкалой —  $4,8 \pm 3,2$  %, а по 3D скану и на микроскопе Zeiss Stemi 2000C —  $2,5 \pm 2,1$  %; радиуса сферы по 3D скану и с помощью штангенциркуля ШЦ-1-125-0,1 —  $0,3 \pm 0,2$  %; шероховатости поверхности с увеличением 1000 раз на КЛМ Olympus LEXT OLS4000 и оптическом профилометре ZYGO NewView —  $18,7 \pm 10,1$  %, а на КЛМ Olympus LEXT OLS4000 и образцовыми мерами шероховатости — по [20] —  $28,3 \pm 3,4$  %.

Таким образом, АЭ аппаратура является исследовательским инструментом, который способен расширить информативность трибоиспытаний и получить количественные экспериментальные характеристики

для решения теоретических и практических вопросов трения и изнашивания. Она позволяет:

определить в режиме on-line критический режим трения (время его наступления и время действия во время испытания);

установить факт отклонения в начальных условиях трибоиспытаний (грубую шероховатость, плохую очистку поверхности, неправильное приложение нагрузки или подогрев образцов и др.);

обнаруживать предполагаемое место разрушения на пути трения (сопоставлением пути трения со временем регистрации АЭ или локационным способом);

определить время приработки шероховатостей и площадь пятна контакта, сформировавшегося при приработке, а также время приработки защитных покрытий или закаленного слоя и их износа до основы (незакаленного материала);

оценить работоспособность различных контактирующих и смазочных материалов на основании сравнения К.Т. действия различных доминирующих механизмов изнашивания: их количества, а также времени и последовательности проявления;

заменить некоторые вспомогательные средства стандартизированных методик, например, средства микроскопии при подтверждении факта критического разрушения, а также средства измерения весового износа.

отследить смещение К.Т. как внутри серии испытаний одного материала, так и в серии испытаний разных материалов и остановить испытание по достижении критического разрушения или действия определенного механизма изнашивания (сокращая или увеличивая время трибоиспытания).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И. В. Трение и износ. — М.: Mashgiz, 1962. — 384 с.
2. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 576 с.
3. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания. — М.: Машиностроение, 1984. — 264 с.
4. Свириденко А. И., Мышкин Н. К., Калмыкова Т. Ф., Холодильников О. В. Акустические и электрические методы в триботехнике / Под ред. В. А. Белого — Минск: Наука и техника, 1987. — 280 с.
5. Баранов В. М., Кудрявцев Е. М., Сарычев Г. А., Щавелин В. М. Акустическая эмиссия при трении. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 256 с.
6. ГОСТ 9490–75. Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения трибологических характеристик на четырехшариковой машине. — М.: Издательство стандартов, 1994.
7. ASTM G133-05(2010). Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. Book of Standards the American Society for Testing and Materials. V. 03.02.
8. ASTM G99-05(2010). Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. Book of Standards the American Society for Testing and Materials. V. 03.02.
9. Растегаев И. А., Мерсон Д. Л. Экспресс-методика испытаний смазочных материалов на четырехшариковой машине трения с применением метода акустической эмиссии / Известия Самарского научного центра РАН: специальный выпуск. 2008. № 8. С. 101 – 105.
10. Чудинов В. А., Полуниев В. И., Кристал М. М. и др. Трибологический исследовательский комплекс испытательного оборудования / Трение. Износ. Смазка: электронный журнал. 1999. Вып. 3 [Электронный ресурс]. URL: [http://tribo.ru/forreaders/archive/archive\\_1.html?m=4](http://tribo.ru/forreaders/archive/archive_1.html?m=4) (дата обращения 05.08.2015).

11. TP TC 030/2012. Технический регламент таможенного союза. О требованиях к смазочным материалам, маслам и специальным жидкостям / Информационно-правовой портал ГАРАНТ: База документов [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/5425755> (дата обращения 05.08.2015).
12. Заславский Ю. С., Артемьева В. П. Новое в трибологии смазочных материалов. — М.: Издательство Нефть и газ, РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2001. — 480 с.
13. Баранов В. М., Гриценко А. И., Карасевич А. М. и др. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. — М.: Наука, 1998. — 304 с.
14. Rastegaev I., Merson D., Vinogradov A. Enhancement of efficiency of tribological testing by using acoustic emission measurements / The 12<sup>th</sup> International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing — Portoroz, Slovenia, 2013. P. 597 – 603.
15. Растегаев И. А., Мерсон Д. Л., Растегаева И. И., Виноградов А. Ю., Чугунов А. В. Сравнительный спектральный анализ шумоподобных сигналов при мониторинге и диагностике промышленного оборудования / Контроль. Диагностика. 2012. № 10. С. 80 – 87.
16. Пат. 2212648 РФ. Способ определения износа вкладыша подшипника скольжения / Фадин Ю. А. и др. Официальный сайт ФИПС: Открытый реестр изобретений [Электронный ресурс]. URL: <http://www1.fips.ru/wps/portal/Registers> (дата обращения 05.08.2015).
17. Пат. 2263891 РФ. Способ непрерывного контроля износа фрикционной пары / Козырев Ю. П., Седакова Е. Б. Официальный сайт ФИПС: Открытый реестр изобретений [Электронный ресурс]. URL: <http://www1.fips.ru/wps/portal/Registers> (дата обращения 05.08.2015).
18. Пат. 2051368 РФ. Способ оценки состояния пары трения / Холодильников О. В., Островский Е. И., Калмыкова Т. М. / Официальный сайт ФИПС: Открытый реестр изобретений [Электронный ресурс]. URL: <http://www1.fips.ru/wps/portal/Registers> (дата обращения 05.08.2015).
19. Булатов В. П., Полевая О. В., Седакова Е. В., Фадин Ю. А. Временная зависимость коэффициента трения / Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 19. С. 1 – 5.
20. ГОСТ 9378–93. Образцы шероховатости поверхности (сравнения). Общие технические условия. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1996.

## REFERENCES

1. Kragelskiy I. V. Trenie i iznos [Friction and wear]. — Moscow: Mashgiz, 1962. — 384 p. [in Russian].
2. Kragelskiy I. V., Dobychin M. N., Komalov V. S. Osnovy raschetov na trenie i iznos [Basis of calculations on friction and wear]. — Moscow: Mashinostroenie, 1977. — 576 p. [in Russian].
3. Poltser G., Mayssner F. Osnovy treniya i iznashivaniya [Fundamentals of friction and wear]. — Moscow: Mashinostroenie, 1984. — 264 p. [in Russian].
4. Sviridenok A. I., Myshkin N. K., Kalmykova T. F., Kholodilov O. V. Akusticheskie i elektricheskie metody v tribotekhnike [Acoustic and electrical methods in the triboengineering]. — Minsk: Nauka i tekhnika, 1987. — 280 p. [in Russian].
5. Baranov V. M., Kudryavtsev E. M., Sarychev G. A., Shchavelin V. M. Akusticheskaya émissiya pri trenii [Acoustic emission in friction]. — Moscow: Énergoatomizdat, 1998. — 256 p. [in Russian].
6. State Standard GOST 9490–75. Materialy smazochnye zhidkie i plastichnye. Metod opredeleniya tribologicheskikh kharakteristik na chetyreksharikovoi mashine [Liquid lubricating and plastic materials. Method of test for lubricating properties on four ball mashine]. — Moscow: Izd. standartov, 2007 [in Russian].
7. ASTM G133-05(2010). Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. Book of Standards the American Society for Testing and Materials. V. 03.02.
8. ASTM G99-05(2010). Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. Book of Standards the American Society for Testing and Materials. V. 03.02.
9. Rastegaev I. A., Merson D. L. Ékspress-metodika ispytaniy smazochnykh materialov na chetyreksharikovoi mashine treniya s primeneniem metoda akusticheskoi émissii [A rapid method for testing lubricants on four-ball friction machine with the acoustic emission method] / Izv. Samar. Nauch. Tsentra RAN. Spets. Vyp. 2008. N 8. P. 101 – 105 [in Russian].
10. Chudinov V. A., Polunin V. I., Krishtal M. M., et al. Tribologicheskii issledovatel'skii kompleks ispytatel'nogo oborudovaniya [Tribological

- research complex test equipment] / *Trenie. Iznos. Smazka. Élekt. Zh.* 1999. Issue 3 [on-line]. URL: [http://tribo.ru/forreaders/archive/archive\\_1.html?m=4](http://tribo.ru/forreaders/archive/archive_1.html?m=4) (accessed 05.08.2015) [in Russian].
11. TR TS 030/2012. *Tekhnicheskii reglament tamozhennogo soyuza. O trebovaniyakh k smazochnym materialam, maslam i spetsial'nym zhidkostyam* [Technical Regulations of the Customs Union. On the requirements for lubricants, oils and special fluids] / Law portal GARANT: Document database [on-line]. URL: <http://base.garant.ru/5425755> (accessed 05.08.2015) [in Russian].
  12. **Zaslavsky Yu. S., Artemyeva V. P.** *Novoe v tribologii smazochnykh materialov* [New in tribology lubricants]. — Moscow: GUP Izd. Neft' i Gaz, RGU Nefti i Gaza im. I. M. Gubkina, 2001. — 480 p. [in Russian].
  13. **Baranov V. M., Gritsenko A. I., Karasevich A. M., et al.** *Akusticheskaya diagnostika i kontrol' na predpriyatiyakh toplivno-énergeticheskogo kompleksa* [Acoustic diagnostics and control at the enterprises of fuel-energy complex]. — Moscow: Nauka, 1998. — 304 p. [in Russian].
  14. **Rastegaev I., Merson D., Vinogradov A.** Enhancement of efficiency of tribological testing by using acoustic emission measurements / The 12<sup>th</sup> International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing — Portoroz, Slovenia, 2013. P. 597 – 603.
  15. **Rastegaev I. A., Merson D. L., Rastegaeva I. I., Vinogradov A. Yu., Chugunov A. V.** *Sravnitel'nyi spektral'nyi analiz shumopodobnykh signalov pri monitoringe i diagnostike promyshlennogo oborudovaniya* [Comparative spectral analysis of noise-like acoustic signals during monitoring and diagnostics of industrial facilities] / *Kontrol'. Diagnostika.* 2012. N 10. P. 80 – 87 [in Russian].
  16. RF Pat. No. 2212648. **Fadin Yu. A. i dr.** *Sposob opredeleniya iznosa vkladysya podshipnika skol'zheniya* [The method for determining the wear of the liner bearing] / URL: <http://www1.fips.ru/wps/portal/Registers> (accessed 05.08.2015) [in Russian].
  17. RF Pat. No. 2263891. **Kozyrev Yu. P., Sedakova E. B.** *Sposob nepreryvnogo kontrolya iznosa friktsionnoi pary* [Method of continuous monitoring of the wear of friction pairs] / URL: <http://www1.fips.ru/wps/portal/Registers> (accessed 05.08.2015) [in Russian].
  18. RF Pat. No. 2051368/2263891. **Kholodilov O. V., Ostrovsky E. I., Kalmukova T. M.** *Sposob otsenki sostoyaniya pary treniya* [A method for the assessment of the friction pair] / URL: <http://www1.fips.ru/wps/portal/Registers> (accessed 05.08.2015) [in Russian].
  19. **Bulatov V. P., Polevaya O. V., Sedakova E. V., Fadin Yu. A.** *Vremennaya zavisimost' koéffitsienta treniya* [The time dependence of the coefficient of friction] / *Pis'ma ZhTF.* 1996. Vol. 22. Issue 19. P. 1 – 5 [in Russian].
  20. RF State Standard GOST 9378–93. *Obraztsy sherokhovatosti poverkhnosti (sravneniya). Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Roughness comparison specimens. General specifications]. — Moscow: Izd. standartov, 1996 [in Russian].