

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ НА СТАДИИ ПРИРАБОТКИ И ДИАГНОСТИКА ТОЧКИ ПЕРЕХОДА К СТАЦИОНАРНОЙ ФАЗЕ ПО СИГНАЛАМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2020 г. С.И. Буйло^{1,2,*}, В.Д. Верескун^{1,**}, В.И. Колесников^{1,***},
Д.С. Мантуров¹, О.Н. Попов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС), Россия 344038 Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

²Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» (ФГАОУ ВО ЮФУ), Россия 344090 Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8А
E-mail: *sibuilo@yandex.ru; **vvd@rgups.ru; ***kvi@rgups.ru

Поступила в редакцию 15.08.2019; после доработки 24.09.2019
Принята к публикации 04.10.2019

Рассмотрена совместная динамика изменения параметров акустической эмиссии (АЭ) и коэффициента трения в процессе испытания на машине трения TRB плоских образцов стали 12Х2Н4АШ, в том числе с ионно-плазменным вакуумным напылением Ti+Al+N. Приведены результаты исследования формы кривой восстановленных значений интенсивности потока актов АЭ на разных участках экспериментальных кривых зависимости коэффициента трения от времени испытаний. Обнаружена существенная корреляционная связь коэффициента трения с интенсивности восстановленного потока актов АЭ. Предложены методы оценки коэффициента трения и времени окончания стадии приработки по восстановленному потоку актов АЭ.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, диагностика, кинетика, методы восстановления, контроль, коэффициент трения, покрытия, трение, трибология.

DOI: 10.31857/S0130308220010054

Применение акустико-эмиссионного (АЭ) метода для анализа фрикционного взаимодействия начало активно развиваться с 70-х годов прошлого столетия, к настоящему времени получены вполне обнадеживающие результаты по перспективности применения АЭ-метода в задачах исследования и контроля процессов трения [1—5, 7—12].

Например, в [5] получены интересные результаты по исследованию поверхностей трения в различных режимах, проведена оценка адгезионных свойств и даны рекомендации по диагностике состояния трущихся поверхностей. Установлено, что основным источником АЭ-излучения является тангенциальный удар микронеровностей со скольжением на контактирующих поверхностях, вызывающий в материале упругие деформации. Установлено, что измеренный коэффициент трения является в основном результатом контактирования больших по размерам контактных площадок.

Недостатком работы является то, что АЭ-исследования проводились только в низкочастотном (до 20 кГц) диапазоне частот. К сожалению, низкочастотный анализ имеет свои ограничения и не позволяет проводить тонкие фундаментальные исследования взаимодействия трибосистемы контактирующих поверхностей, т.к. реальное излучение, сопутствующее деформации вершин неоднородностей и, тем более, таким тонким механизмам, как разрыв адгезионных связей [6], сосредоточено в основном в ультразвуковом диапазоне частот.

Интересные результаты по исследованию физической природы, параметров трения и их связи сигналами АЭ на монокристаллах стали Гадфильда получены в [9]. Трение скольжения осуществляли на трибометре TRIBOtechnik при температуре 25°C. Исследование параметров сигналов АЭ осуществлялось при помощи модуля регистрации ЭЯ-2 разработки Тольяттинского государственного университета. Исследования деформационного рельефа показали, что введение дополнительной составляющей нагрузки — силы трения определяет включение в деформацию дополнительных систем сдвига по сравнению с одноосным сжатием. Установлено, что макрофрагментация рельефа определяется схемой напряженного состояния при фрикционном контакте и имеет ориентационную зависимость. Это, в свою очередь, определяет характер накопления деформации в поверхностном слое и градиент ее затухания по мере удаления от поверхности трения. Определены типичные амплитудно-частотные характеристики сигнала АЭ в области приработки трибосопряжения и в процессе установившегося трения.

В [10] предпринята попытка практического использования АЭ-трения для контроля прохождения различного рода объектов, перемещаемых перекачиваемыми продуктами внутри трубопрово-

да. Такими объектами могут быть: очистные скребки, поршни, герметизаторы, снаряды-калибры, а также различные диагностические устройства. Установлено, что прохождение очистных скребков по нефтепроводу сопровождалось мощными широкополосными всплесками АЭ в диапазоне частот от 0 до 250 кГц, в то время как фоновый шум от движения нефти сосредоточен в низкочастотной области спектра. Установлено, что уровень сигналов АЭ-трения в диапазоне частот 150—180 кГц достаточен для достоверной регистрации прохождения внутритрубного оборудования.

В [7] предложен метод оценки износа по спектру АЭ. В предположении, что сигналы АЭ от вертикальных и горизонтальных трещин обладают разными частотными спектрами, авторами сделана попытка выделения частотных областей, в которых преобладают вклады от соответствующих трещин. Получены зависимости, позволяющие оценить износ по положению этих преобладающих частотных областей излучения АЭ. При этом коэффициент корреляции между массовым износом узла трения, полученным в ходе лабораторных испытаний на трение и по данным спектрального анализа АЭ, оказался порядка 0,73. К сожалению, предложенный метод показал недостаточную достоверность, т.к. коэффициент корреляции 0,73 соответствует весьма слабой связи между исследуемыми величинами и следует разрабатывать более достоверные методы диагностики с коэффициентами корреляции порядка 0,8—0,9 и более.

В [11] установлена возможность диагностики особых точек коэффициента трения с помощью метода АЭ на этапе завершения стационарной фазы, роста силы трения и фазы перехода к разрушению поверхностного слоя. Близкие к нашим по условиям проведения испытания описаны в [8]. Авторы методом скретч-анализа определяли адгезионные характеристики вакуумных покрытий карбонитрида циркония, который формировался на поверхности стали Р6М5, в том числе предварительно обработанной при криогенной температуре. Параллельно осуществлялась запись сигналов АЭ. Получено, что наиболее оптимальными адгезионными характеристиками обладают покрытия, сформированные на образцах стали Р6М5, предварительно обработанных в криогенной жидкости. При этом зарегистрировано устойчивое изменение значений акустического сигнала при адгезионном отслаивании покрытия, что позволило авторам наряду с оптическими методами оценки адгезионного взаимодействия покрытий рекомендовать и метод АЭ. К сожалению, каких-либо количественных закономерностей связи параметров трения с параметрами сопутствующей АЭ в данной работе получено не было.

Цель настоящей работы — дальнейшее исследование применимости метода АЭ для целей исследования и отработки технологии трения, в частности, оценке возможности определения коэффициента трения на стадии приработки и возможности диагностики завершения стадии приработки и точки перехода к стационарной фазе по сопутствующим сигналам АЭ.

Как известно, экспериментальное установление длины стадии приработки и точки перехода к стационарной стадии имеет крайне важное значение для определения остаточного ресурса пары трения. Задача оптимизации любого трибоконтакта — это принятие мер по сокращению стадии приработки и удлинению стационарной фазы.

В данной статье приведены результаты анализа сигналов АЭ образцов стали 12Х2Н4АШ с модифицированным покрытием и без него. Покрытие наносилось методом вакуумного ионного осаждения. Анализируется возможность диагностики особой точки на границе завершения фазы приработки и перехода к стационарной фазе. Кроме того, определяется вид зависимости коэффициента трения от интенсивности потока АЭ-сигналов, сопровождающих работу пары трения.

Эксперименты проводили на плоских образцах стали 12Х2Н4АШ с покрытием и без него с использованием машины трения TRB швейцарской фирмы CSM Istrument SA. Покрытие производили методом ионно-плазменного вакуумного напыления Ti+Al+N. Покрытие типа 1 наносили в один монослой, а покрытие типа 2 — в виде нескольких слоев, где каждый материал составлял свой слой. Сигналы АЭ принимались и обрабатывались цифровым диагностическим АЭ-комплексом A-line32D производства фирмы «Интерюнис» (г. Москва). Испытывали образцы 2-х размеров: 40×30×5 и 50×30×5 мм. Схема эксперимента показана на рис. 1.

Эксперименты проводили без смазки в двух вариантах: с закреплением датчика АЭ непосредственно на образце и на кронштейне держателя индентора (карбида-вольфрамового шарика). Каждый эксперимент продолжался от 500 до 1000 с (10 000 циклов), частота возвратно-поступательного движения индентора выбиралась порядка 10 Гц. Наилучшие результаты были получены при установке датчика АЭ непосредственно на образец. Все результаты данной статьи получены при непосредственной установке датчика АЭ на образец согласно рис. 1.

Из анализа принимаемых сигналов следует, что процессы трения и фрикционного взаимодействия сопровождаются настолько большим количеством излучаемых актов АЭ, что это приводит к почти полному перекрытию регистрируемых сигналов АЭ. Исследования показывают, что практически все

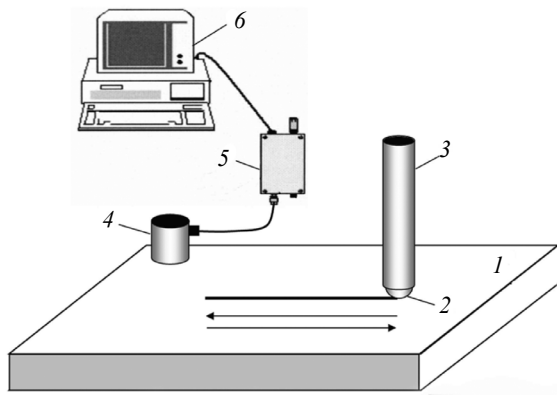


Рис. 1. Упрощенная схема эксперимента:

1 — образец; 2 — индентор; 3 — держатель индентора; 4 — приемный датчик сигналов АЭ; 5 — предусилитель; 6 — цифровой АЭ-комплекс A-line 32D.

отечественные и зарубежные АЭ-диагностические комплексы, включая и такие известные системы, как Spartan и A-Line 32D, теряют из-за перекрытия более 90 % событий АЭ при высокой интенсивности источников АЭ [1].

Для устранения этого недостатка нами предложен и развивается междисциплинарный подход, позволяющий восстановление истинного (излученного внутри тела) потока актов АЭ по регистрируемым сигналам АЭ [1, 15]. Это часто позволяет про-

вести идентификацию стадий исследуемого процесса по положению особых точек восстановленного потока актов АЭ [13]. Такой подход ранее был использован нами при разработке АЭ-методов диагностики механической прочности ряда ответственных изделий и позволил заметно повысить достоверность результатов диагностики плиток теплозащиты отечественного многоразового орбитального космического корабля «Буран» [1].

Суть подхода состоит в определении требуемых характеристик исследуемого процесса по плотностям (или функциям распределения) данных параметров, общий вид которых устанавливается исходя из физической природы эффекта АЭ. При этом параметры конкретного распределения оцениваются по еще не перекрывшимся импульсам, а затем распределение экстраполируется и в область сильного искажения и перекрытия принимаемых сигналов эмиссии [1, 15]. Предложенные нами алгоритмы восстановления существенно зависят от вида «мертвого времени» перекрывающихся импульсов АЭ.

Известно, что если сигналы перекрываются, то существует так называемое «мертвое время». Мертвое время бывает *непродлевающегося типа*, длительность которого не зависит от попадания в него следующего импульса, и *продлевающегося*, длительность которого увеличивается при попадании него следующего импульса. На основе вышеописанного подхода для *непродлевающегося* мертвого времени получено следующее выражение для восстановления \dot{N}_a — интенсивности потока (количества в единицу времени) актов АЭ внутри тела по \dot{N}_r — регистрируемой интенсивности потока сигналов (вспышек) АЭ на его поверхности [1, 15]:

$$\dot{N}_a = \dot{N}_r (1 + \Sigma t_0 / (T - \Sigma t_0)), \quad (1)$$

где Σt_0 — суммарная длительность сигналов АЭ за единицу времени T (например, $T = 1$ с).

Для случая *продлевающегося* мертвого времени нами получено другое соотношение [1, 15]:

$$\dot{N}_a = \dot{N}_r \exp[\Sigma t_0 / (T - \Sigma t_0)]. \quad (2)$$

Исследование существующей на настоящее время АЭ-аппаратуры показывает, что обычно она имеет оба типа *мертвого времени*. Вследствие этого в работе использовался *модифицированный метод восстановления*, основы которого предложены в [15] и суть которого состоит в использовании разных алгоритмов восстановления: (1) — для непродлевающегося мертвого времени при умеренном перекрытии и (2) — для случая продлевающегося мертвого времени, наиболее сильно сказывающемся при сильном перекрытии сигналов АЭ. При этом степень перекрытия экспериментально определяется в зависимости от значений предложенного нами ранее параметра искажения и перекрытия K [1, 15]:

$$K = \Sigma t_0 / (T - \Sigma t_0). \quad (3)$$

В описываемых экспериментах использовались первичные данные оцифровки принимаемых АЭ-сигналов прибором A-Line 32D в режиме таймаута окончания импульса SCETO (соответствует мертвому времени *продлевающегося* типа), равном 500 мкс и Dead Time (аналог *непродлевающегося* мертвого времени), равном 30 мкс, которые затем обрабатывались по следующему алгоритму:

$$\dot{N}_a = \begin{cases} \dot{N}_r(1 + \Sigma t_0 / (T - \Sigma t_0)) & \text{при } K < 0,3; \\ \dot{N}_r \exp[\Sigma t_0 / (T - \Sigma t_0)] & \text{при } 0,3 \leq K \leq 3. \end{cases} \quad (4)$$

Далее для обработки данных измерений АЭ использовался стандартный статистический анализ временных рядов с выделением тренда:

1. Строился тренд интенсивности потока сигналов АЭ $\dot{N}_a^*(t)$ в виде полинома 3-й или 4-й степени.

2. В точках времени $t_i (i = 1 \dots n)$ где известно среднее значение коэффициента трения, вычислялись значения $\dot{N}_a^*(t_i)$.

3. С помощью регрессионного анализа (в простейшем случае с помощью метода наименьших квадратов) определялся вид зависимости коэффициента трения от функции тренда интенсивности.

Полученные зависимости позволяют по данным АЭ-измерений определить величину коэффициента трения.

Покажем на примерах эффективность этого алгоритма при обработке результатов экспериментов.

Уравнение тренда интенсивности АЭ для образца без покрытия имеет вид:

$$\dot{N}_a^*(t) = -6,85154410 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 + 7,77682390 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 2,52660708 \cdot 10^{-1} \cdot t + 75,73152. \quad (5)$$

где $\dot{N}_a^*(t)$ — сглаженное значение интенсивности потока актов АЭ; t — время в секундах.

На рис. 2 представлены графики восстановленных согласно (4) значений интенсивности потока актов АЭ в промежутке 1—600 с и $\dot{N}_a^*(t)$ — аппроксимирующий его график тренда кубической степени.

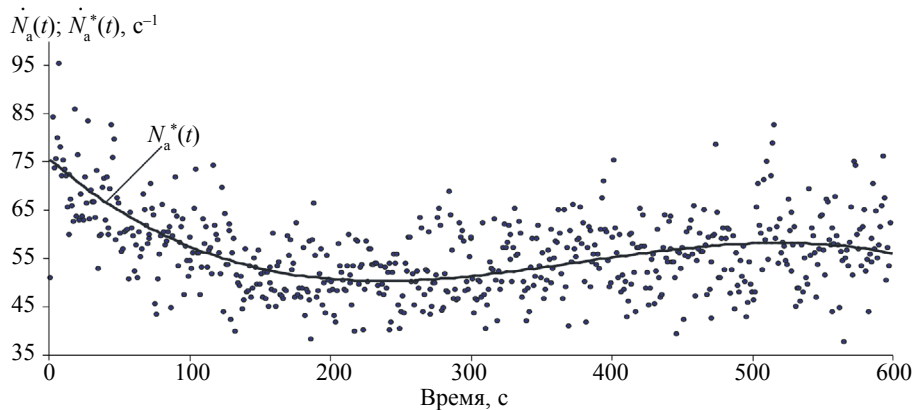


Рис. 2. Точки восстановленной интенсивности потока актов АЭ $\dot{N}_a(t)$ и график аппроксимирующего его уравнения тренда $\dot{N}_a^*(t)$ за первые 600 с испытаний образца типа 1 (материал: сталь 12Х2Н4АШ без покрытия).

На рис. 3 совместно представлены множество пар коэффициента трения и восстановленной интенсивности потока актов АЭ на промежутке 20—220 с.

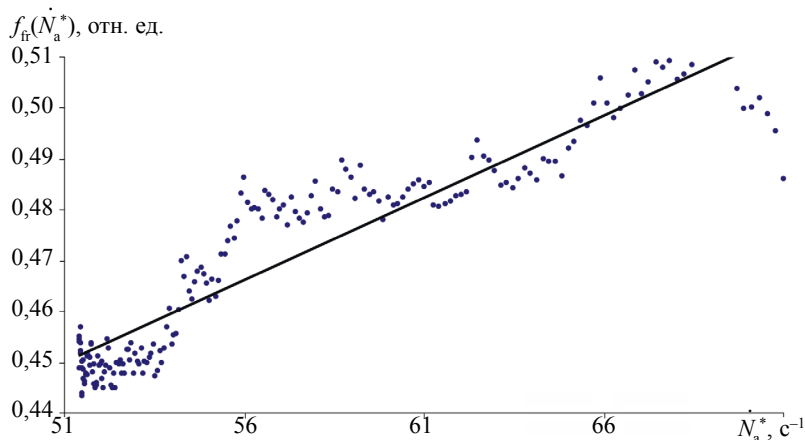


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от восстановленной интенсивности потока актов АЭ для образца без покрытия.

На основе экспериментальных данных рис. 3 методом наименьших квадратов [16] получен следующий вид зависимости коэффициента трения от восстановленной интенсивности потока актов АЭ:

$$f_{\text{тр}} = AN_a + B = 0,0032\dot{N}_a + 0,2854 \quad \text{при} \quad \rho(f_{\text{тр}}, \dot{N}_a) = 0,9292. \quad (6)$$

Здесь $\rho(f_{\text{тр}}, \dot{N}_a)$ — коэффициент корреляции между коэффициентом трения и восстановленной интенсивностью потока актов АЭ:

$$\rho(f_{\text{тр}}, \dot{N}_a) = \left[\sum_{i=1}^n (f_{\text{тр}i} - \overline{f_{\text{тр}}})(\dot{N}_{ai} - \overline{\dot{N}_a}) \right] / n\sigma_{f_{\text{тр}}}\sigma_{\dot{N}_a}, \quad (7)$$

где $\overline{f_{\text{тр}}}$ и $\overline{\dot{N}_a}$ — средние значения; $\sigma_{f_{\text{тр}}}$ и $\sigma_{\dot{N}_a}$ — стандартные отклонения (корни из дисперсии σ^2) коэффициента трения и восстановленной интенсивности потока актов АЭ; n — число исследуемых пар.

Более точно экспериментальные данные на рис. 3 можно аппроксимировать комбинацией линейной функции и синусоиды. Мы ограничились одной линейной аппроксимацией, как наиболее простой. Тем более, что даже она показывает достаточно высокую ($\rho > 0,9$) связь между коэффициентом трения и восстановленной интенсивностью потока актов АЭ. Экспериментальные данные можно аппроксимировать практически неограниченным набором различных функций. Однако всегда желательно иметь наиболее простую и удобную аппроксимацию.

Таким образом, полученное соотношение (6) в принципе позволяет проводить количественную оценку коэффициента трения по восстановленной интенсивности потока актов АЭ даже без прямого измерения параметров трения. Требуемые для этого коэффициенты A и B достаточно легко предварительно определяются при испытаниях тарировочных образцов.

Попробуем оценить достоверность определения $f_{\text{тр}}$ по формуле (6). Известно, что наличие такого количественного показателя, как надежность или достоверность результатов, является необходимым условием высокого уровня развития любого метода контроля или диагностики [1, 17, 18].

При этом классическое определение достоверности трактуется как вероятность попадания измеряемого или диагностируемого параметра в некоторый интервал [17]. Такое определение достоверности безупречно с точки зрения математической статистики, однако иногда страдает некоторой информационной недоопределенностью. Так, например, даже в случае очень большой погрешности с нормальным законом распределения все равно можно получить близкую к единице достоверность оценки измеряемого параметра, устремив к бесконечности длину интервала неопределенности. Таким образом, иногда получается как бы высокая достоверность результатов измерения контролируемого параметра, хотя фактически эти результаты имеют нулевую информативность.

Для преодоления такой недоопределенности ранее нами предложен несколько иной подход и введено понятие *информационной достоверности* R , связанной не с вероятностью, а с количеством информации q , получаемой в процессе оценки или диагностики самого измеряемого (контролируемого) параметра [18]. При этом интервал неопределенности нами предложено определять через дезинформационное действие погрешности согласно вероятностной теории информации К. Шеннона [19]. Получены следующие простые соотношения [18]:

$$R = 1 - \exp(-q); \quad R = 1 - \sqrt{1 - \rho^2}; \quad 0 \leq R \leq 1, \quad (8)$$

где R — информационная достоверность; q — количество информации, полученной в результате проведения процедуры измерения или диагностики; ρ — коэффициент корреляции между измеряемым и диагностируемым параметрами.

Подставив в (8) определенное согласно (7) значение корреляции коэффициента трения с восстановленной интенсивностью потока актов АЭ, получим, что достоверность R оценки коэффициента трения $f_{\text{тр}}$ по восстановленной интенсивности потока актов АЭ \dot{N}_a для исследуемого образца на рис. 3 имеет величину порядка 63 %:

$$R = 1 - \sqrt{1 - \rho^2} = 1 - \sqrt{1 - 0,8634} = 0,6304.$$

Аналогичные результаты были получены и на образцах с покрытиями. Так, для образцов с покрытием типа 1 (монослой Ti+Al+N) получено следующее уравнение регрессии:

$$f_{\text{тр}} = 0,0022\dot{N}_a + 0,2933 \quad \text{при} \quad \rho(f_{\text{тр}}, \dot{N}_a) = 0,8370,$$

а для образцов с покрытием типа 2 (покрытие из отдельных слоев Ti+Al+N) получено

$$f_{\text{тр}} = 0,0130\dot{N}_a - 0,3252 \quad \text{при} \quad \rho(f_{\text{тр}}, \dot{N}_a) = 0,9001.$$

Постараемся оценить положение самой точки окончания стадии приработки по восстановленной интенсивности потока актов АЭ.

Для этого воспользуемся представленными на рис. 4 совместными графиками коэффициента трения $f_{\text{тр}}$ и тренда нормированной на максимальную интенсивность кривой восстановленной интенсивности \dot{N}_a^{norm} у образца без напыления на интервале 20—600 с.

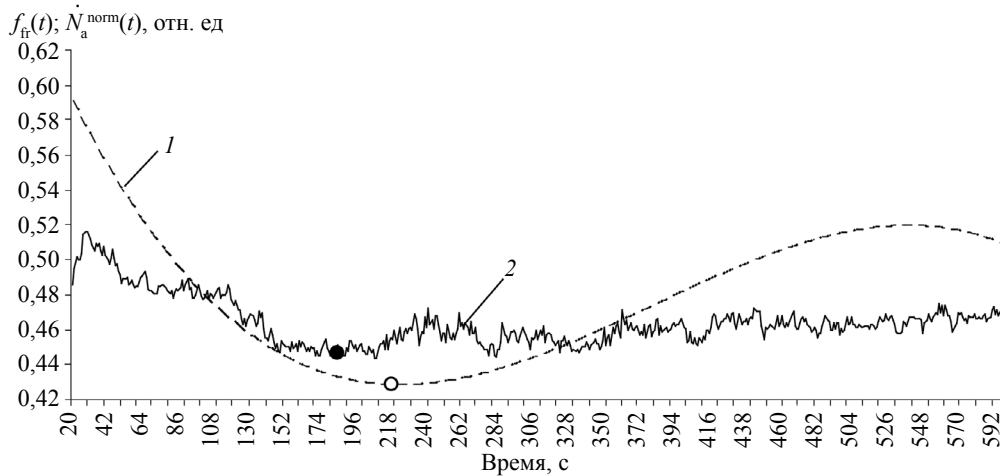


Рис. 4. Графики нормированного тренда восстановленной интенсивности АЭ (1) и коэффициента трения образца без покрытия (2): ● — конец стадии приработки по измерению коэффициента трения; ○ — оценка окончания стадии приработки по минимуму интенсивности АЭ.

Сравнение показывает, что точки времени окончания приработки образца без покрытия, определенные по коэффициенту трения и по АЭ, отличаются менее чем на 10%. Графики для образцов с покрытием имеют аналогичный вид. Полученные по ним точки времени окончания приработки для всех типов образцов также приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения времени окончания приработки

Вид образца: сталь 12Х2Н4АШ	Размер образцов, мм	Время окончания приработки по коэффициенту трения, с	Время окончания приработки по АЭ, с	Ошибка, %
Без покрытия	50×30×5	212	192	9,6
Покрытие типа 1	40×30×5	79	67	15
Покрытие типа 2	40×30×5	47	55	17

Видно, что эти точки, определенные по АЭ и непосредственно по графикам коэффициента трения, мало различаются, что позволяет предложить метод оценки положения точки времени окончания приработки по восстановленной интенсивности потока актов АЭ. Для повышения точности определения стадий процессов трения, в дальнейшем планируется дополнительно применить для этих целей еще и метод инвариантов АЭ [20].

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установленная существенная корреляционная связь коэффициента трения с восстановленной интенсивностью потока актов АЭ позволяет предложить метод оценки коэффициента трения по интенсивности потока актов АЭ на стадии приработки.

2. Наличие существенной корреляционной связи коэффициента трения с восстановленной интенсивностью потока актов АЭ позволяет также предложить и метод оценки времени окончания приработки по восстановленному потоку актов АЭ.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы» при финансовой поддержке государства в лице Министерства науки и высшего образования России (идентификатор проекта RFMEFI60718X0203).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буйло С.И. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2017. 184 с.
2. Сарычев Г.А., Щавелин В.М., Баранов В.М., Грязев А.П. Анализ акустического излучения при трении в твердых телах // Трение и износ. 1985. Т. 6. № 1. С. 39—47.
3. Щавелин В.М., Сарычев Г.А. Акустический контроль узлов трения ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1988. 176 с.
4. Федоров Д.В. Определение эффективности смазочных составов подшипниковых узлов локомотивов методом акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2003. № 3. С. 34—36.
5. Маленко П.И. Исследование методом акустической эмиссии поверхностей трения в условиях смазывания // Конденсированные среды и межфазные границы. 2011. № 2. С. 164—171.
6. Колесников В.И., Мясникова Н.А., Мигаль Ю.Ф. и др. Влияние адгезионного сцепления на границе раздела компонент на трение полимерных композитов // Вестник РГУПС'а. 2011. № 4. С. 9—13.
7. Кузнецова О.С., Сычев С.В., Фадин Ю.А., Чулкин С.Г. Применение акустической эмиссии для исследования изнашивания хрупких материалов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. № 3. С. 174—177.
8. Овчинников Е.В., Чекан Н.М., Акула И.П., Эйсымонт Е.И., Шагойка А.Г., Кравченко В.И. Применение акустической эмиссии для определения адгезионных характеристик вакуумных покрытий / В кн.: Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018). Всероссийская конференция с международным участием. Сборник материалов. Отв. ред. Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов. Тольятти: Из-во ТГУ, 2018. С. 35—36.
9. Лычагин Д.В., Новицкая О.С., Филиппов А.В., Колубаев Е.А. Связь параметров акустической эмиссии с особенностями износа стали Гадфильда / В кн.: Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018). Всероссийская конференция с международным участием. Сборник материалов. Отв. ред. Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов. Тольятти: Из-во ТГУ, 2018. С. 51—52.
10. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Применение акустической эмиссии при трении для контроля прохождения по магистральным нефтегазопроводам скребков и поршней / В кн.: Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018). Всероссийская конференция с международным участием. Сборник материалов. Отв. ред. Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов. Тольятти: Из-во ТГУ, 2018. С. 126—127.
11. Буйло С.И., Иваночкин П.Г., Мясникова Н.А. Диагностика особых точек коэффициента трения многослойного наномодифицированного антифрикционного покрытия методом акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2013. № 6. С. 26—31.
12. Спирагин В.И., Клоев С.А. Экспериментальное исследование звукового сигнала, испускаемого из контакта колесо-рельс / Труды Междунар. научн. конф. «Механика и трибология транспортных систем» (МехТрибоТранс-2011). Ростов-на-Дону: РГУПС, 2011. С. 214—217.
13. Буйло С.И. Метод идентификации стадий деформации и разрушения по положению особых точек восстановленного потока актов АЭ // Дефектоскопия. 2008. № 8. С. 3—14.
14. Елизаров С.В., Барат В.А., Бардаков В.В., Чернов Д.В., Терентьев Д.А. АЭ-контроль динамического оборудования на примере роликовых опор вращающихся печей // Контроль. Диагностика. 2017. № 7. С. 4—11.
15. Буйло С.И. Использование моделей статистической радиофизики для повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного метода контроля и диагностики предразрушающего состояния // Дефектоскопия. 1995. № 7. С. 13—26.
16. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1979. 496 с.
17. Волченко В.Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции. М.: Металлургия, 1979. 88 с.
18. Буйло С.И. Вероятностно-информационные аспекты оценки достоверности результатов неразрушающего контроля и диагностики прочности твердых тел // Дефектоскопия. 1996. № 5. С. 20—25.
19. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИИЛ, 1963. 832 с.
20. Буйло С.И. Использование инвариантных соотношений параметров потока сигналов акустической эмиссии для диагностики предразрушающего состояния твердых тел // Дефектоскопия. 2002. № 2. С. 48—53.