

ТЕРМОАКТИВАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ  
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ТРЕНИИ

О. В. ХОЛОДИЛОВ, Д. Ю. БЕЛОНОГИЙ  
УО «БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТРАНСПОРТА»  
Гомель, Беларусь

В настоящее время для диагностики состояния трибосопряжений разработано большое число методов [1]. Одним из наиболее эффективных является метод акустической эмиссии (АЭ), который основан на регистрации механических колебаний, возникающих в результате упругопластической деформации трущихся поверхностей [2, 3].

Как известно, фрикционное взаимодействие двух тел происходит не по всей площади контактирующих поверхностей, а в пределах т. н. «пятен касания» [2]. Из-за дискретности фрикционного контакта тел трение и изнашивание имеют статистическую природу.

Существуют различные подходы построению модели АЭ при трении [2, 3]. Один из них позволяет построить феноменологическую модель, основанную на применении кинетической концепции прочности твердых тел [4], согласно которой разрушение представляет собой термоактивированное зарождение и развитие трещины. Эта модель предполагает, что активность АЭ (число импульсов в единицу времени) помимо составляющей, определяемой упругим деформированием микронеровностей, имеет составляющую, определяемую кинетикой их разрушения [5].

В данной модели за основу берётся ячеистая излучающая структура, образующаяся при трении твердых тел в зоне контакта, определяемая физико-механическими и геометрическими свойствами взаимодействующих поверхностей. Характерный размер ячейки определяется в соответствии с масштабом фрикционной связи.

При фрикционном взаимодействии ячейки, в которых реализуются касательные напряжения, превышающие критическое напряжение разрыва, разрушаются механически с отделением частицы износа и являются источниками АЭ. Разрушение ячеек в результате термоактивированного зарождения и развития трещин вносит определенный вклад в сигнал АЭ.

Предположим, что контактная область состоит из  $N$  ячеек (связей), каждая из которых представляет собой некоторый объем материала и характеризуется критическим напряжением разрыва  $\sigma_{кр}$ .

В статике ячейки совершают колебания относительно положения равновесия, однако, кинетическая энергия этих колебаний при нормальных условиях не превышает энергию активации разрушения материала  $U_0$ , поэтому отрыва ячеек не происходит.

При трении под действием нагрузки энергетический барьер понижается и все ячейки, в которых касательные напряжения превышают критическое напряжение разрыва, разрушаются с отделением частицы износа.

Разрушение каждой ячейки сопровождается излучением одного импульса АЭ, поэтому количество ячеек, разрушаемых в единицу времени, соответствует термоактивированной составляющей активности АЭ [5].

Зависимость долговечности ячейки от действующего на неё касательного напряжения  $\sigma$  описывается известной формулой С. Н. Журкова:

$$\tau_d = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right) \quad (1)$$

где  $\tau_0$  – постоянная, имеет порядок  $10^{-12}$ – $10^{-13}$  с;  $U_0$  – энергия активации процесса разрушения;  $\gamma$  – структурно-чувствительный коэффициент;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

Если  $t_p \leq \frac{d}{v}$ , где  $d$  – диаметр пятна контакта, а  $v$  – скорость скольжения, то  $t_p$  можно отождествить со временем жизни фрикционной связи.

Пусть в начальный момент времени на образец действует нагрузка  $P$ , тогда количество ячеек с прочностью  $\sigma > P$  определяется выражением:

$$N_0 = N_0(\sigma, P) = \int_{\sigma_0}^{\sigma_{\max}} N(\sigma, 0) d\sigma, \quad (2)$$

где  $\sigma_0$ ,  $\sigma_{\max}$  – соответственно, минимальная и максимальная прочности материала ячеек, превышающие действующую нагрузку.

Изменение числа ячеек за счет термоактивированного разрушения можно оценить из дифференциального уравнения:

$$dN_0(\sigma, P) = -N_0(\sigma, P)W(\sigma, P)dt, \quad (3)$$

где  $W(\sigma, P)$  – вероятность разрыва ячейки прочностью  $\sigma$  в единицу времени;  $N_0(\sigma, P)$  – количество  $\sigma$ -ячеек при нагрузке  $P$  и скорости скольжения  $v$ .

Решая это уравнение, получим:

$$N_0(\sigma, P) = C \exp\left(-\int_0^{d/v} W(\sigma, P) dt\right), \quad (4)$$

где  $C$  – постоянная, определяемая из начальных условий.

Изменение числа  $\sigma$ -ячеек (фрикционных связей) за счет термоактивированного разрушения описывается дифференциальным уравнением:

$$dN_1(\sigma, P) = -N_1(\sigma, P)W(\sigma, P)dt, \quad (5)$$

где  $N_1(\sigma, P)$  – количество  $\sigma$ -ячеек, оставшихся целыми при увеличении нагрузки на  $dP$ . Решая это уравнение и находя постоянную интегрирования из условия, что при нагрузке  $P$  число  $\sigma$ -ячеек равно  $N_0(\sigma, P)$  получаем

$$N_1(\sigma, P) = N_0 \exp \left( - \int_0^{d/v} W(\sigma, P) dt \right). \quad (6)$$

Количество  $\sigma$ -ячеек, разрушающихся за время жизни фрикционной связи, составляет

$$N_T(\sigma, P) = N_0(\sigma, P) - N_1(\sigma, P) = N_0(\sigma, P) \left[ 1 - \int_0^{d/v} W(\sigma, P) dt \right]. \quad (7)$$

Дифференцируя  $N_T(\sigma, P)$  по времени, получим число  $\sigma$ -ячеек, термоактивно разрушаемых в единицу времени  $N_T(\sigma, P)$ , т. е. активность акустической эмиссии.

Использование статистического подхода позволяет, в ряде случаев, установить корреляцию между основными фрикционными и акустическими параметрами трибосистемы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мышкин, Н. К.** Диагностика изнашивания трибосопряжений / Н. К. Мышкин, Холодилов О. В., Лозовский В. Н. // Энциклопедия в 40 т.: т. IV–1. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. М. : Машиностроение – С. 253–258.
2. Акустические и электрические методы в триботехнике / А. И. Свириденко [и др.]; под ред. В. А. Белого. – Минск : Наука и техника. – 1987. – 280 с.
3. **Баранов, В. М.** Акустическая эмиссия при трении / В. М. Баранов [и др.]. – М. : Энергоатомиздат. – 1998. – 256 с.
4. **Регель, В. Р.** Кинетическая природа прочности твердых тел / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. – М. : Наука, 1974. – 560 с.
5. **Вайнберг, В. Е.** Применение кинетической концепции разрушения для расчета интенсивности акустической эмиссии / В. Е. Вайнберг, А. Ш. Кантор, Р. Г. Лупашку // Дефектоскопия. – 1976. – № 3. – С. 89–96.

E-mail: [olhol@belsut.gomel.by](mailto:olhol@belsut.gomel.by)