

Литовка С.В.

Харьковский национальный техниче-
ский университет сельского хозяйства
имени Петра Василенка
E-mail: litovkasvjjob@gmail.com

ЭНЕРГИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ВЫХОДЕ ДИСЛОКАЦИЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ

УДК 621.891:620.179

Проведено теоретическое исследование мощности акустической эмиссии при выходе дислокаций на деформированную поверхность, как функции скорости скольжения и нагрузки при взаимодействии микронеровностей трибосопряжения. Установлено, что при увеличении скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении увеличивается мощность акустической эмиссии, порядок величины которой достигает 10^{-8} Дж/с для моделируемой поверхности.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, трибосопряжение, шероховатость поверхности, энергия, диагностирование.

Введение

В процессе трения твердых тел происходит возникновение акустических колебаний вследствие локальной и динамической перестройки внутренней структуры материала, а также в результате отделения частиц износа трибосопряжений, соударения микронеровностей друг с другом и с частицами износа. Многими авторами установлено, что для оценки параметров изнашивания наиболее пригодными являются разновидности акустического метода, а именно метод акустической эмиссии (АЭ) [1, 2].

Анализ публикаций

Проявление АЭ в процессе перестройки и разрушения поверхностей трения целесообразно рассматривать на нескольких масштабных уровнях: наноуровень – на котором рассматриваются явления зарождения трещин в результате взаимодействия дефектов кристаллической решетки и их подрастания до микроуровня (характерный размер от 10^9 м до 10^7 м); микроуровень – когда изучается этап формирования из нанотрещин трещины с размерами, соизмеримыми с размерами зерен (характерный размер от 10^7 м до 10^5 м); мезоуровень – этап развития трещин до магистральных, взаимодействие микронеровностей и отделение частиц износа (характерный размер от 10^5 м до 10^3 м); макроуровень – когда изучаются условия равновесия тела с трещинами, соизмеримыми с размерами образца, и их разрушение (характерный размер от 10^3 до 10^1 м).

К наноуровню следует отнести дефекты кристаллической решетки, такие как вакансии, дислокационные атомы, примесные атомы и их комплексы. Для металлов энергия излученного импульса в статической реакции аннигиляции вакансии и атома внедрения составляет $\sim 10^{-19}$ Дж [2].

Тепловое движение атомов создает акустический шум, энергия которого распределена в частотном диапазоне от долей до 10^{13} Гц и составляет $4 \cdot 10^{-21}$ Дж/Гц [3]. Акустический сигнал от перемещения единичных дислокаций невозможно выделить на фоне тепловых шумов кристаллической решетки [2]. Поэтому целесообразно рассматривать АЭ на микро- и мезоуровнях, где наиболее вероятными источниками АЭ являются зарождение и движение крупных скоплений дислокаций, зарождение и рост трещин, скачки трещин, процессы трения у берегов трещины и отделение частиц износа.

Основными источниками АЭ на микроуровне считаются пластическая деформация и развитие трещин. При пластической деформации в результате массового образо-

вания и перемещения дислокаций происходит релаксация напряжений путем сдвига элементов твердого тела без образования разрывов. В случае зарождения и развития трещины формируются новые поверхности в объеме материала. Считается, что микротрещины в момент зарождения имеют длину $\sim 10^{-7}$ м [4]. Энергия краевой дислокации составляет порядка $10^{-16} - 10^{-17}$ Дж [5]. Образование такого дефекта при пластической деформации, как двойникование, связано с изменением энергии на значение порядка 10^{-3} Дж [3]. Для микротрещины в стали глубиной 0,1 мкм, длиной 1 мкм и раскрытием (100...1000) a расчетная энергия АЭ составит $10^{-12} \dots 10^{-10}$ Дж [2].

К мезоуровню отнесем процессы связанные с ростом трещин в процессе пластической деформации и отделение частиц износа, а также соударения микронеровностей друг с другом и с частицами износа.

Следует отметить два типа разрушения материала - вязкое и хрупкое. По механизму зарождения трещин они принципиально не различаются. Качественное различие между ними связано с энергоемкостью и скоростью распространения трещины. При хрупком разрушении эта скорость очень велика, она достигает 0,4-0,5 скорости распространения звука в материале образца. В случае же вязкого разрушения трещина распространяется в основном с относительно малой скоростью, соизмеримой со скоростью деформации образца [6]. Энергоемкость вязкого разрушения значительно больше потому, что при развитии вязкой трещины пластическая деформация идет не только вблизи ее вершины, но по значительному объему детали или образца [7].

В работах [5, 6, 8] обосновывается превалирующая роль дислокационного механизма в процессе пластической деформации. Подтверждением тому служит высокая плотность дислокаций. В.И. Владимиров отметил, что разрушение материала поверхностного слоя наступает при достижении плотности дислокации $\rho_c \approx 10^{13} - 10^{14}$ м⁻² [6]. По мнению В.С. Ивановой плотность дислокаций, при которой начинается формирование из ячеистой структуры полосовой, составляет $\rho_c \approx 10^{14}$ м⁻² [2]. В работе [7] отмечают, что в процессе деформации происходит постепенный рост плотности дислокаций до критической величины $\rho_c \approx 10^{15} - 10^{16}$ м⁻². Для меди критическая плотность дислокаций может достигать $\rho_c \approx 10^{15}$ м⁻² [11].

Образование и развитие трещин, выход дислокаций на поверхность кристалла вызывает появление акустических колебаний, которые в виде упругих волн различных типов (продольных, поперечных, поверхностных, Лэмба) распространяются в материале. Упругие волны возможно регистрировать пьезоэлектрическими датчиками, которые преобразовывают механические колебания среды в электрический сигнал, измеряемый АЭ системой.

Для идентификации процессов на поверхностях трибосопряжений целесообразно оценить энергию АЭ на микро- и мезоуровне. В данной работе рассматриваем энергию АЭ при движении скоплений дислокаций.

Цель работы

Определение энергии акустической эмиссии в процессе движения дислокаций при взаимодействии микронеровностей трибосопряжения.

Основная часть

При выборе расчетных соотношений делаем следующие допущения: модель ше-

роховатых поверхностей состоит из полусферических сегментов радиусом R_a , распределенных по высоте от 0 до R_z , закрепленных на жестком основании (рис. 1); шаг между микронеровностями соответствует среднему шагу неровностей S_m ; сближение двух поверхностей определяется нагрузкой N в трибосопряжении; ближайшие контакты не влияют друг на друга; распределение сферических сегментов таково, что воспроизводится реальное распределение материала по высоте шероховатого слоя; нагрузка прикладывается нормально относительно основания микронеровностей.

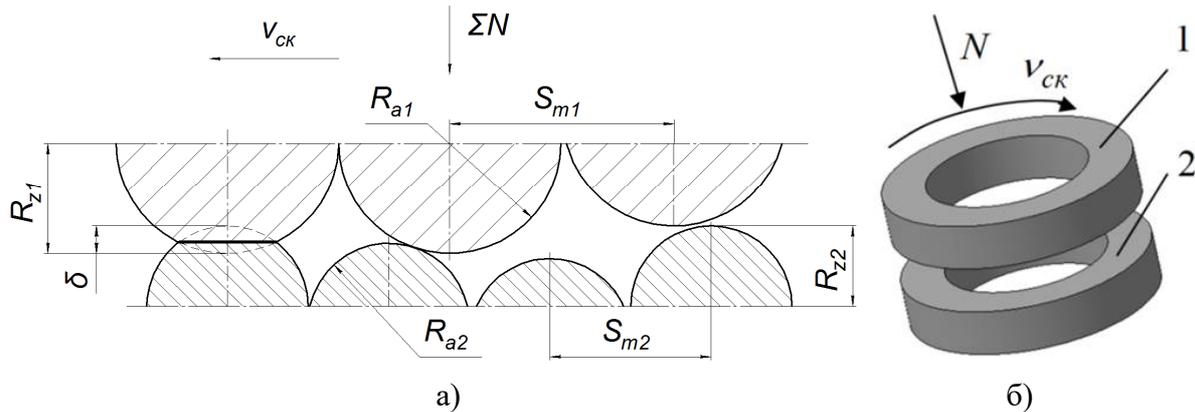


Рис. 1 – Схема модели контакта микронеровностей трибосопряжения: а) – контакт микронеровностей; б) моделируемая пара «кольцо – кольцо» (1 – стальной образец, 2 – бронзовый образец)

Выход дислокаций на свободную поверхность кристалла осуществляется с образованием ступеньки (рис. 2а) и одновременным распространением упругих колебаний [11].

Энергия импульса АЭ при выходе дислокаций на поверхность микронеровности из зоны пластической деформации будем оценивать по зависимости, основанной на работе [12, 13]:

Выразим энергию АЭ в виде ее мощности:

$$W_d = \frac{E_d}{t} = \frac{G \cdot b^2 \cdot \ln\left(\frac{R_r}{b}\right)}{4 \cdot \pi \cdot K} \cdot \frac{L_d}{t}, \quad (1)$$

где E_d – энергия импульса АЭ, Дж; t – время, с; G – модуль сдвига, $G = \rho \cdot c_t^2 = E / (2 \cdot (1 + \mu))$ Па; ρ – плотность материала, кг/м³; c_t – скорость поперечной волны, м/с; E – модуль упругости материала, Па; μ – коэффициент Пуассона; b – расстояние выхода дислокаций, $b = n \cdot b_0$, м; n – количество параметров решетки, шт; b_0 – постоянная решетки (\sim вектор Бюргерса), м; $R_r = (R_{a1} \cdot R_{a2}) / (R_{a1} + R_{a2})$ – приведенный радиус кривизны вершин микронеровностей [5], м; L_d – длина дислокаций достигающих поверхность, м; K – коэффициент, $K = 1$ – для винтовой дислокации, $K = 1 - \mu$ – для краевой дислокации, $1 - \mu < K < 1$ – для смешанной дислокации.

Для оценки энергии АЭ, связанной с выходом дислокаций на поверхность (либо кристалла, либо материала), необходимо знать полную длину дислокаций L_d , достигающих поверхность в каждый момент времени. Приближенную оценку L_d можно сделать

из предположения, что покинуть кристалл могут только те дислокации, которые находятся в пределах средней длины свободного пробега m_0 (рис. 2б) от поверхности [14].

Априори будем считать, что к поверхности движется половина от общего числа дислокаций, поэтому

$$L_d = \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot S \cdot \rho_{dp}, \quad (2)$$

где m_0 – длина свободного пробега дислокаций, м; S – площадь контакта микронеровности, м²; ρ_{dp} – плотность подвижных дислокаций, $\rho_{dp} = 0,5 \cdot \rho_d$ [6], м⁻²; ρ_d – плотность дислокаций, для расчетного случая $\rho_d = \rho_c$, м⁻².

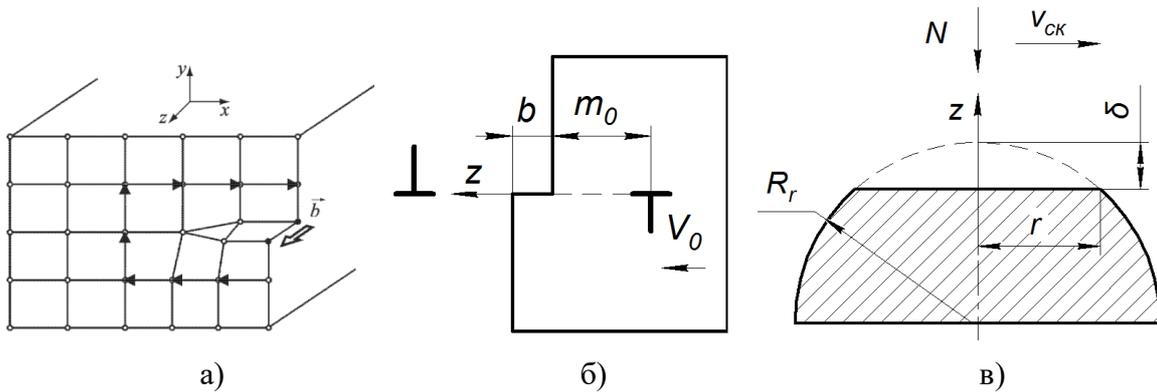


Рис. 2 – Схемы винтовой дислокации а) [15], движения дислокации к поверхности б) [14], представление микронеровности в процессе деформации в)

В единицу времени длина дислокаций составит:

$$\frac{L_d}{t} = \frac{m_0 \cdot S \cdot \rho_{dp}}{2 \cdot t} = \frac{S \cdot \rho_{dp}}{2} \cdot V_0, \quad (3)$$

где V_0 – скорость перемещения дислокаций, м/с.

Скорость перемещения дислокаций находим из уравнения Орована [5]:

$$V_0 = \frac{\dot{\varepsilon}}{\rho_{dp} \cdot b}, \quad (4)$$

где $\dot{\varepsilon}$ – скорость относительной деформации, с⁻¹.

В свою очередь скорость относительной деформации равна:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t}, \quad (5)$$

где ε – относительная деформация.

Величина относительной деформации определяется по формуле [16]:

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot N \cdot (1 + \mu)}{2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot E} \cdot \left[\frac{r^2}{r^2 + z^2} - 2 \cdot \mu \cdot \left(1 - \frac{z}{r} \cdot \arctg \frac{r}{z} \right) \right], \quad (6)$$

где N – нагрузка в контакте, Н; r – радиус контакта, м; z – расстояние по оси симметрии, м.

Поскольку максимальная осевая деформация будет на расстоянии $z = 0,4 \cdot r$, согласно работе [17], и $3 \cdot N / (2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot E)$ есть не что иное как относительная максимальная деформация ε_{\max} , получаем относительную деформацию в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \cdot (1 + \mu) \cdot [0,863 - 1,048 \cdot \mu]. \quad (7)$$

Относительную максимальную деформацию ε_{\max} выразим для случая полусферической микронеровности (рис. 1 в) в следующем виде:

$$\varepsilon_{\max} = \alpha \cdot \frac{\delta}{R_r}, \quad (8)$$

где α – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформации по площади контакта, $\alpha = 0,5$; δ – сближение поверхностей, м.

Для наиболее часто используемой модели эквивалентной шероховатой поверхности сближение рассчитывается по формуле [18]:

$$\delta = R_p \cdot \left(\frac{N}{\lambda \cdot H_m \cdot F \cdot t_m} \right)^{\frac{1}{v_m}}, \quad (9)$$

где R_p – высота сглаживания, $R_p = k \cdot R_a$, м; λ – коэффициент, учитывающий вид контакта; H_m – твердость по Майеру, Па; F – контурная площадь контакта [19], м²; v_m, t_m – параметры опорной кривой [20].

При расчете необходимо учитывать свойства более мягкого материала и шероховатость более твердого.

Контурная площадь контакта, моделируемая сферическими сегментами шероховатых волн, определяется на основании выражения [21]:

$$F_i = 1,84 \cdot F_{\min} \cdot K_w \left(\frac{r_w}{R_w} \right)^{\frac{2}{4+2\delta_w}} \cdot \left(\frac{N_i}{F_{\min}} \cdot E_e \right)^{\frac{2}{2+2\delta_w}}, \quad (10)$$

где F_{\min} – номинальная площадь контакта по меньшей поверхности трения, м²; K_w и δ_w – коэффициенты, зависящие от свойств материала и от соотношения высоты волн и шероховатости; r_w – радиус кривизны волны, м; R_w – высота волны, м; E_e – приведенный модуль упругости [18], Па⁻¹.

Время деформации или время существования фрикционной связи микронеровностей можно определить по зависимости:

$$t = \frac{2 \cdot r}{v_{ск}}, \quad (11)$$

где $v_{ск}$ – скорость скольжения, м/с.

Площадь сечения микронеровности в контакте (рис. 1в):

$$S = \pi \cdot \left(R_r^2 - (R_r - \delta)^2 \right), \quad (12)$$

Радиус контакта (рис. 1в):

$$r = \sqrt{R_r^2 - (R_r - \delta)^2} \quad (13)$$

Для учета времени между взаимодействиями микронеровностей следует ввести поправочный коэффициент, описывающий отношение времени контактирования микронеровностей к времени между взаимодействием микронеровностей:

$$\beta = \frac{t_k}{t_s} = \frac{2 \cdot r \cdot v_{ck}}{v_{ck} \cdot S_m} = \frac{2 \cdot r}{S_m}, \quad (14)$$

где S_m – средний шаг микронеровностей, м.

Подставляя в выражение (1) зависимости (3)-(14) и преобразуя их, получаем формулу, представляющую функциональную зависимость мощности АЭ от скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении. Кроме этого учтем количество микронеровностей, вступающих одновременно в контакт по поверхности, тогда приведенная энергия АЭ при взаимодействии шероховатых поверхностей равна:

$$W_d = \frac{E_d}{t} = \frac{G \cdot b^2 \cdot \ln\left(\frac{R_r}{b}\right)}{4 \cdot \pi \cdot K} \cdot \frac{\alpha \cdot \delta(N) \cdot S(N) \cdot v_{ck}}{8 \cdot r(N) \cdot b \cdot R_r} \cdot (1 + \mu) \cdot [0,863 - 1,048 \cdot \mu] \cdot \frac{2 \cdot r(N)}{S_m} \cdot n_r \quad (15)$$

где n_r – количество микронеровностей, вступивших одновременно в контакт.

Отношение $(n_r \cdot v_{ck}) / S_m$ есть не что иное, как частота импульсов АЭ:

$$f = n_r \cdot \frac{v_{ck}}{S_m} \quad (16)$$

Согласно работе [20], частота импульсов АЭ равна:

$$f(v_{ck}, N) = \frac{v_{ck} \cdot F_{\min}}{S_m^3} \cdot \int_0^{\delta(N)} \left[\int_0^{\delta(N)_{\max}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_1} \cdot e^{-\frac{(x-M_1)^2}{2\sigma_1^2}} dx \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_2} \cdot e^{-\frac{(x-M_2)^2}{2\sigma_2^2}} dx, \quad (17)$$

где M – математическое ожидание отклонения профиля, м; σ – среднее квадратическое отклонение профиля, м.

Тогда, мощность АЭ при выходе дислокаций на поверхность трения примет вид:

$$W_d = \frac{E_d}{t} = \frac{G \cdot b \cdot \ln\left(\frac{R_r}{b}\right)}{16 \cdot \pi \cdot K} \cdot \frac{\alpha \cdot \delta(N) \cdot S(N)}{R_r} \cdot (1 + \mu) \cdot [0,863 - 1,048 \cdot \mu] \cdot f(v_{ck}, N). \quad (18)$$

Для расчетов принимаем следующие данные: материал образцов Сталь 40Х – БрАЖ 9-4; тип дислокаций – винтовая; расстояние выхода дислокаций $b = 1,27 \cdot 10^{-10}$ м; радиус кривизны вершин микронеровностей $R_{a1} = 0,8 \cdot 10^{-6}$; $R_{a2} = 0,4 \cdot 10^{-6}$ м; средний шаг микронеровностей по вершинам, $S_m = 0,268 \cdot 10^{-3}$ м; нагрузка в трибосопряжении, $N = 0 \dots 1000$ Н; номинальная площадь контакта по меньшей поверхности трения, $F_{\min} = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м²; коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформации по площади контакта, $\alpha = 0,5$; коэффициент, учитывающий вид контакта, при упругом контакте $\lambda = 0,5$; твердость по Майеру, для бронзовой поверхности $H_m = 150$ МПа; параметры опорной кривой, для бронзовой поверхности $\nu = 3$, $t_m = 0,4$; модуль

упругости материала сталь, $E_1 = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; модуль упругости материала бронза, $E_2 = 1,1 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона материала сталь, $\mu_1 = 0,3$; коэффициент Пуассона материала бронза, $\mu_2 = 0,35$; коэффициенты, зависящие от свойств материала и от соотношения высоты волн и шероховатости, $K_w = 1,4$; $\delta_w = 1,3$; радиус кривизны волны, $r_w = 200 \cdot 10^{-6}$ м; высота волны, $R_w = 1,2 \cdot 10^{-6}$ м; плотность материала, $\rho = 7600$ кг/м³; скорость скольжения микронеровностей, $v_{ck} = 0 \dots 2$ м/с; математическое ожидание отклонения профиля, $M_1 = 0,6 \cdot 10^{-6}$ м, $M_2 = 0,4 \cdot 10^{-6}$ м; среднее квадратическое отклонение профиля, $\sigma_1 = 0,54 \cdot 10^{-6}$ м, $\sigma_2 = 0,27 \cdot 10^{-6}$ м; коэффициент $k = 1,25$.

Результаты исследования

Результаты расчетов энергии АЭ при выходе винтовых дислокаций на поверхность при одном акте взаимодействия микронеровности E_d (рис. 2в) и мощности АЭ от скорости скольжения и нагрузки при взаимодействии микронеровностей трибосопряжения представлены на рисунке 3.

Анализ графика на рисунке 3а показывает, что энергия АЭ при выходе дислокаций на деформированную поверхность увеличивается при увеличении нагрузки в контакте. Для диапазона значений нагрузки $N = 1 \dots 1000$ Н в трибосопряжении энергия АЭ достигает $(0,2 - 6,25) \cdot 10^{-14}$ Дж на одной микронеровности.

Из графика (рис. 3б) и зависимости (18) видно, что для моделируемой поверхности мощность АЭ увеличивается прямопропорционально скорости скольжения поверхностей. Показано, что при изменении нагрузки в трибосопряжении в диапазоне от 1 Н до 1000 Н при скорости скольжения 2 м/с мощность АЭ увеличивается в пять раз, и при максимальных значениях нагрузки и скорости достигает величины $5,4 \cdot 10^{-8}$ Дж/с.

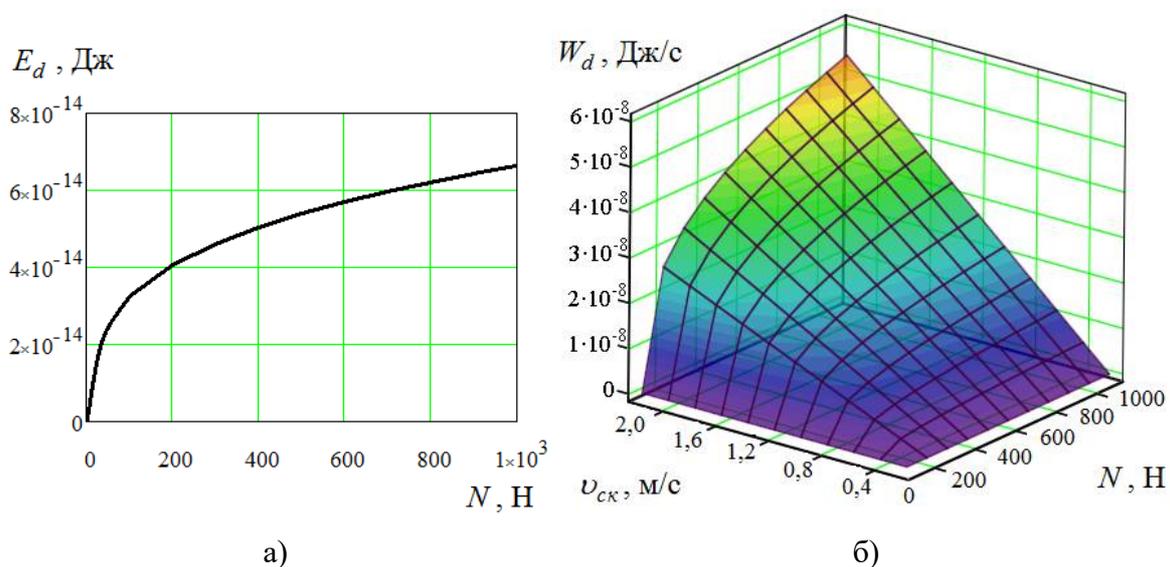


Рис. 3 – График зависимости энергии АЭ при выходе винтовых дислокаций на поверхность при одном акте взаимодействия микронеровности а) и мощности АЭ от скорости скольжения и нагрузки при взаимодействии поверхностей трибосопряжения б)

Выводы

На основании теоретических исследований получена функциональная связь мощности АЭ при выходе дислокаций на деформированную поверхность при взаимодей-

ствии шероховатых поверхностей, моделируемых полусферическими микронеровностями, со скоростью скольжения поверхностей и нагрузкой в трибосопряжении.

Установлено, что при увеличении скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении увеличивается мощность акустической эмиссии, порядок величины которой достигает 10^{-8} Дж/с для моделируемой поверхности.

Литература

8. Свириденко А. И., Мышкин Н. К., Калмыкова Т. Ф. и др. Акустические и электрические методы в триботехнике. Минск: Наука и техника, 1987. – 280 с.
9. Иванов В.И., Белов В.И. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
10. Оглезлева Л.А. Акустические методы контроля и диагностики. Часть II/ Л.А. Оглезлева, А.Н. Калиниченко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 292 с.
11. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. – М.: Наука, 2015. – 479 с.
12. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 352 с.
13. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
14. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов.– М.: МИСИС, 1998. – 400 с.
15. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения материалов. – Ташкент: ФАН, 1985. – 175 с.
16. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. Под общ. ред. Клюева В.В. Т.7: в 2 кн. Кн.1: Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
17. Mughrabin H., Ungar T., Wilrens M. // Scripta Met. 1983. V. 17. № 6. P. 797-805.
18. Нацик В.Д., Чишко К.А. Звуковое излучение дислокаций, движущихся у поверхности кристаллов // ФТТ. – 1978. – Т. 2. – Вып. 2. – С. 45–65.
19. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория упругости. 4-е изд., испр. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
20. Косевич А.М. Основы механики кристаллической решетки. – М.: Наука, 1972. – 281 с.
21. Мерсон Д.Л. Физическая природа акустической эмиссии при деформационных процессах в металлах и сплавах [Текст] : автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук :01.04.07 / Д. Л. Мерсон. – Барнаул, 2001. – 39 с.
22. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328 с.
23. Айнбиндер С.Б. Введение в теорию трения полимеров / С.Б. Айнбиндер, Э.Л. Тюнина. – Рига: Зинатне, 1978. – 224 с.
24. Динник А.Н. Избранные труды. Т. 1. / А.Н. Динник. – К.: Изд-во АН УССР, 1958. – 148 с.
25. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для вузов. 2-е изд. переработ, и доп. / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. - 664 с.
26. Воронкин А.С. Линейные колебания и волны: Введение в акустику: уч. пособ. – Луганськ: СПД Резніков В.С., 2012. – 224 с.

27. Литовка С.В. Оценка энергии акустической эмиссии в процессе взаимодействия микронеровностей трибосопряжения // Научный журнал Технический сервис агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2016. – №6. – С. 234-239.
28. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, Н.М. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

Summary

Litovka S. Energy of acoustic emission at the emergence of dislocations on surface of friction unit

A theoretical study of the power of the acoustic emission at the emergence of dislocations on the deformed surface in the interaction of rough surfaces has been conducted as a function of sliding speed and load friction units. It is found that with increasing of sliding speed and load increases the power of the acoustic emission which reaches the order of magnitude 10^{-8} J/s for a modeled surface.

Keywords: acoustic emission, friction units, roughness of the surface, energy, diagnostics.

References

1. Sviridenok A. I., Myshkin N. K., Kalmykova T. F. i dr. Akusticheskiye i elektricheskiye metody v tribotekhnike. Minsk: Nauka i tekhnika, 1987. – 280 s.
2. Ivanov V.I., Belov V.I. Akustiko-emissionnyy kontrol' svarki i svarnykh soyedineniy. – M.: Mashinostroyeniye, 1981. – 184 s.
3. Oglezleva L.A. Akusticheskiye metody kontrolya i diagnostiki. Chast' II/ L.A. Oglezleva, A.N. Kalinichenko. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009. – 292 s.
4. Terent'yev V.F., Korableva S.A. Uсталost' metallov. – M.: Nauka, 2015. – 479 s.
5. Popov V.L. Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya i fizika treniya. Ot nanotribologii do dinamiki zemletryaseny. – M.: FIZMATLIT, 2013. – 352 s.
6. Vladimirov V.I. Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov. – M.: Metallurgiya, 1984. – 280 s.
7. Zolotarevskiy V.S. Mekhanicheskiye svoystva metallov. – M.: MISIS, 1998. – 400 s.
8. Fedorov V.V. Kinetika povrezhdayemosti i razrusheniya materialov. – Tashkent: FAN, 1985. – 175 s.
9. Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik: v 7 t. Pod obshch. red. Klyuyeva V.V. T.7: v 2 kn. Kn.1: Ivanov V.I., Vlasov I.E. Metod akusticheskoy emissii. – M.: Mashinostroyeniye, 2005. – 829 s.
10. Mughrabin H., Ungar T., Wilrens M. // Scripta Met. 1983. V. 17. № 6. P. 797-805.
11. Natsik V.D., Chishko K.A. Zvukovoye izlucheniye dislokatsiy, dvizhushchikhsya u poverkhnosti kristallov // FTT. – 1978. – T. 2. – Vyp. 2. – S. 45–65.
12. Landau L.D., Lifshits Ye.M. Teoreticheskaya fizika. Teoriya uprugosti. 4-ye izd., ispr. – M.: Nauka, 1987. – 248 s.
13. Kosevich A.M. Osnovy mekhaniki kristallicheskoy reshetki. – M.: Nauka, 1972. – 281 s.
14. Merson D.L. Fizicheskaya priroda akusticheskoy emissii pri deformatsionnykh protsessakh v metallakh i splavakh [Tekst] : avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni d-ra fiz.-mat. nauk :01.04.07 / D. L. Merson. – Barnaul, 2001. – 39 s.

15. Matviyenko YU.G. Modeli i kriterii mekhaniki razrusheniya. – M.: FIZMATLIT, 2006. – 328 s.
16. Aynbinder S.B. Vvedeniye v teoriyu treniya polimerov / S.B. Aynbinder, E.L. Tyunina. – Riga: Zinatne, 1978. – 224 s.
17. Dinnik A.N. Izbrannyye trudy. T. 1. / A.N. Dinnik. – K.: Izd-vo AN USSR, 1958. – 148 s.
18. Osnovy tribologii (treniye, iznos, smazka): Uchebnik dlya vuzov. 2-ye izd. pererabot, i dop. / A.V. Chichinadze, E.D. Braun, N.A. Bushe i dr.; Pod obshch. red. A.V. Chichinadze. M.: Mashinostroyeniye, 2001. - 664 s.
19. Voronkin A.S. Lineynyye kolebaniya i volny: Vvedeniye v akustiku: uch. posob. – Lugans'k: SPD Rêzníkov V.S., 2012. – 224 s.
20. Litovka S.V. Otsenka energii akusticheskoy emissii v protsesse vzaimodeystviya mikronerovnostey tribosopryazheniya // Naukoviy zhurnal Tekhníchniy servis agropromislovogo, lísovogo ta transportnogo kompleksív. – 2016. – №6. – S. 234-239.
21. Kragel'skiy I.V. Osnovy raschetov na treniye i iznos / I.V. Kragel'skiy, N.M. Dobychin, V.S. Kombalov. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 526 s.