

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ, ОЦЕНКА КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИХ СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

Д.Г. Громаковский

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Приведены результаты разработки и идентификации физической и расчетной моделей изнашивания, которые основаны на кинетическом термофлуктуационном подходе к оценке механизма накопления повреждаемости и разрушения поверхностного слоя деталей, деформируемых трением. Для проведения расчетов показан разработанный способ склерометрической оценки энергетических характеристик материала, а также возможности этого способа прогнозировать износостойкость по эмпирическим результатам склерометрических испытаний.

Ключевые слова: изнашивание, трение, контактная деформация, повреждаемость, усталостный механизм разрушения, энергия активации, структурно-чувствительный коэффициент, ресурс долговечности.

Представленная статья посвящена совершенствованию разрабатываемых физических и расчетных моделей изнашивания [1, 2, 3 и др.] и обоснованию учитываемых факторов, обеспечивающих ее приемлемую идентификацию.

В разрабатываемой концепции и модели усталостного изнашивания поверхностей, деформируемых трением, отражены два фундаментальных обстоятельства.

Первое из них учитывает устойчивый периодический характер отделения материала на локализованных площадках трущихся поверхностей, а второе – связь времени до разрушения этих объемов с уровнем накопленных микроповреждений (рис. 1).

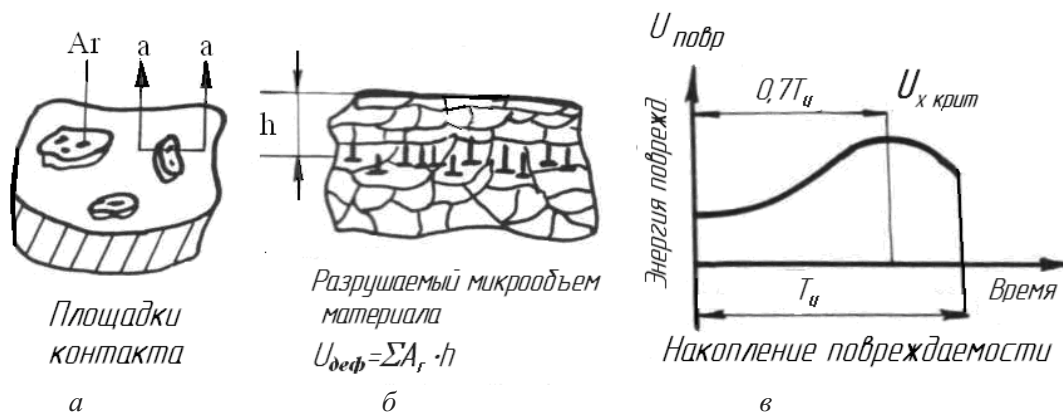


Рис. 1. Модель изнашивания: $V_{\text{деф}}$ – объем материала, отделяемого от микроплощадки контакта. Отделение происходит при энергии повреждаемости $U_{\text{повр max}}$; $A_{\text{г}}$ – площадь фактического контакта; h – толщина разрушаемых пленок оксидов

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства РФ (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ № 218 от 09.04.2010.

Дмитрий Григорьевич Громаковский (д.т.н., проф.), директор научного центра.

Периодический характер кривых изнашивания, установленный в работах автора, показан на рис. 2.

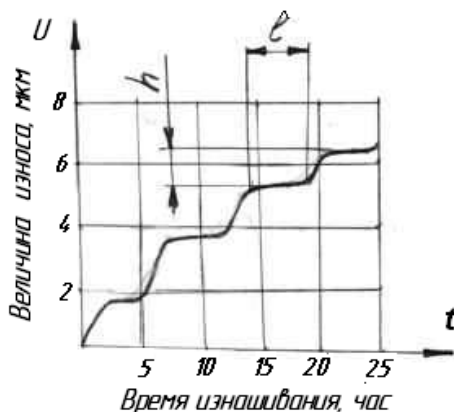


Рис. 2. Пример экспериментальной характеристики изнашивания чугуна СЧ21-40 при постоянных значениях скорости скольжения и нагрузки:

l – протяженность; h – высота ступени износа

Для оценки параметров «ступенчатого» износа использован методический прием, предложенный М.М. Хрущовым [4] и называемый методом лунок-свидетелей, при котором величину износа определяют по изменению глубины h или ширины B лунок, нанесенных на изнашиваемую поверхность (рис. 3), что характеризует износ в зафиксированной координате изнашиваемой поверхности.

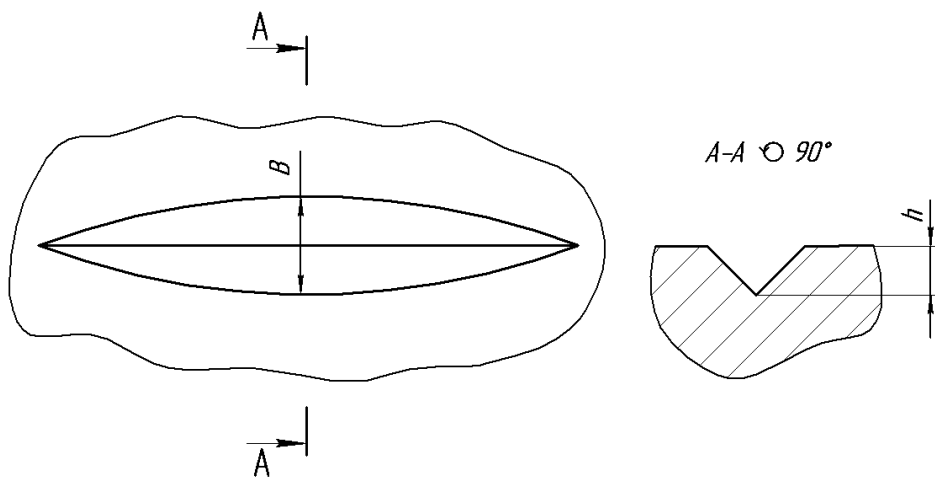


Рис. 3. Характеристики лунок-свидетелей

При разработке алгоритма оценки изнашивания учитывали опыт наиболее известных трибологов – С.Б. Ратнера, М.А. Бартенева, Ю.Н. Дроздова, М.М. Хрущова, А.Г. Ковшова, И.Д. Ибатуллина, Б.М. Силаева, Т.Ф. Куина, И. Усуи и др. [11...15].

Так, например, Т.Ф. Куин [5] для оценки коэффициента интенсивности окислительного износа K использовал экспоненциальную зависимость

$$K = \frac{dA \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)}{\xi^2 \rho^2 U}, \quad (1)$$

где A – константа Аррениуса; Q – энергия активации; R – газовая постоянная; T – температура; U – скорость скольжения; ρ – плотность оксида; ξ – расстояние.

В.В. Федоров [6] для изучения активизационных параметров усталостного разрушения также использовал экспериментальную зависимость для оценки долговечности под нагрузкой t_*

$$t_* = \tau_0 \exp\left[\frac{U'(\sigma, T)}{RT}\right], \quad (2)$$

где $U'(\sigma, T)$ – энергия разрушения, определяемая величиной действующих напряжений σ и температуры T ; τ_0 – постоянная времени ($\sim 10^{-12}$ сек); R – газовая постоянная.

С.Б. Ратнер [7] для описания интенсивности изнашивания полимеров и резин – I предложил уравнение в виде

$$I = \tau_0 \exp\left(-\frac{U_0 - f \cdot \gamma \cdot \sigma}{R \cdot \vartheta}\right), \quad (3)$$

где U_0 – энергия активации разрушения; σ – напряжение; γ – постоянная структуры; f – коэффициент трения; $R \cdot \vartheta$ – энергия теплового движения.

Кинетическая модель изнашивания при фреттинге А.Г. Ковшова [8] позволила оценивать скорость линейного износа при фреттинг-коррозии по уравнению

$$J = \frac{\varepsilon \cdot C_\mu \cdot b \cdot T \cdot \sigma_{экр} \cdot L}{\alpha \cdot h \cdot \sigma_s^2 \cdot A_a \cdot d}, \quad (4)$$

где ε – предельное относительное удлинение; C_μ – атомная теплоемкость; $\sigma_{экр}$ – эквивалентная нагрузка; d – диаметр элементарного пятна контакта; h – постоянная Планка; L – проскальзывание на контакте; α – коэффициент теплового линейного расширения; σ_s – предел прочности; A_a – номинальная площадь контакта; b – условие связи в контакте (для плоского контакта $b = 3$, для контакта шара $b = 1$).

При анализе времени до разрушения также рассмотрено уравнение долговечности t_p , предложенное И.Д. Ибатуллиным [9] и интерпретирующее структуру уравнения С.Н. Журкова, обоснованного для долговечности единичной связи при оценках для макроразмерного масштаба,

$$t_p = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - V_m \cdot 10^6 \cdot \sigma \cdot \Delta \varepsilon - \Delta g}{RT}\right), c, \quad (5)$$

где V_m – молярный объем разрушения; $\Delta \varepsilon$ – критическое приращение деформации; Δg – вклад немеханической энергии среды.

Представляемое в данной статье уравнение изнашивания исходит из кинетического подхода к оценке разрушения поверхностей, предложенного академиком РАН С.Н. Журковым.

В связи с этим в обосновании уравнения использован аппарат термофлуктуационного механизма разрушения, а представление времени существования единичной связи кристаллических решеток под нагрузкой τ рассматривается в подходе Аррениуса, Д. Дорна и др. авторов:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{k \cdot T}\right), \quad (6)$$

где τ_0 – постоянная времени; U_0 – энергия активации пластической деформации; γ – структурно-чувствительный коэффициент; σ – действующее напряжение; k – постоянная Больцмана.

В предложенной модели принято, что общее число связей λ , разрушающихся в каждом микрообъеме материала за один кинетический цикл, оценивается с помощью ряда принятых упрощений. Форма частиц износа принята сферической. Таковую же форму имеет элементарный активационный объем V_a . Число разрушаемых связей определяется по количеству межузлий единичной кристаллической решетки N_p в локализованном микрообъеме материала V_d и среднестатистической частицы $V_{кр}$, а также отношению площади поверхности среднестатистической частицы износа $S_{V_{кр}}$ к $L_{му}$ – количеству межузлий на поверхности частицы в зависимости от типа кристаллической решетки материала:

$$\lambda = N_p \cdot \frac{V_d}{V_{кр}} \cdot \frac{S_{V_{кр}}}{L_{му}}. \quad (7)$$

Разрушение каждого локализованного микрообъема материала при изнашивании имеет групповой характер и протекает за время охарактеризованного выше кинетического цикла «упрочнение → разупрочнение → разрушение». При этом на первой стадии (рис. 1в) износ минимален, а накопление повреждений носит латентный характер. Длительность этой стадии – обычно около 0,7 времени цикла. На второй стадии наблюдается быстрый рост повреждаемости и отделение частиц износа.

После удаления продуктов износа начинается новый цикл накопления повреждаемости и разрушения на новой образовавшейся совокупности выступающих неровностей. Объем разрушаемого за 1 цикл материала V_d представляется выражением

$$V_d = \Delta A_r \cdot n_r \cdot h, \quad (8)$$

где ΔA_r и n_r – соответственно площадь единичного пятна фактического и число пятен фактического контакта.

Общее время, необходимое для разрушения микрообъема материала V_d , определяется на основе гипотезы линейного суммирования повреждаемости при уточнении количественной стороны по экспериментальным данным:

$$t_y = \tau \cdot \lambda, \text{ час}. \quad (9)$$

Средняя скорость изнашивания

$$J_v = V_d / t_y, \text{ м}^3 / \text{ час}. \quad (10)$$

С учетом требований размерности, соотношений характеристик релаксации повреждений P_p исходной повреждаемости материала ξ , а также диссипативности контакта (коэффициент поглощения ψ) уравнение скорости изнашивания получено в виде (11), где λ – число разрушаемых связей:

$$J_v = \frac{\Delta A_r \cdot n_r \cdot h}{P_p \cdot \xi \cdot \lambda \cdot \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \psi \cdot \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T}\right)}, \text{ мкм} / \text{ час}. \quad (11)$$

Наряду с расчетным способом оценки ресурсных характеристик (11) была разработана дополнительная методика экспериментального прогнозирования остаточного ресурса на базе склерометрических испытаний.

В этой методике вначале, при усталостных испытаниях, разрушают стандартный образец исследуемого материала и методом склерометрии оценивают критиче-

ский уровень накопления повреждаемости материалов $U_{e\text{ пред}}$ вблизи очага (трещины), а полученное значение энергии повреждаемости $U_{\text{пред}}$ наносят на график (рис. 4).

Затем на контролируемой детали (образце) через заданные интервалы времени наработки производят повторные склерометрирования. Их результаты образуют диагностический график (см. рис. 4). После ряда испытаний линию $U_e(t)$ экстраполируют до пересечения с линией $U_{e\text{ пред}}$. Пересечение этих линий отсекает на графике время истощения ресурса $t_{\text{остат}}$.

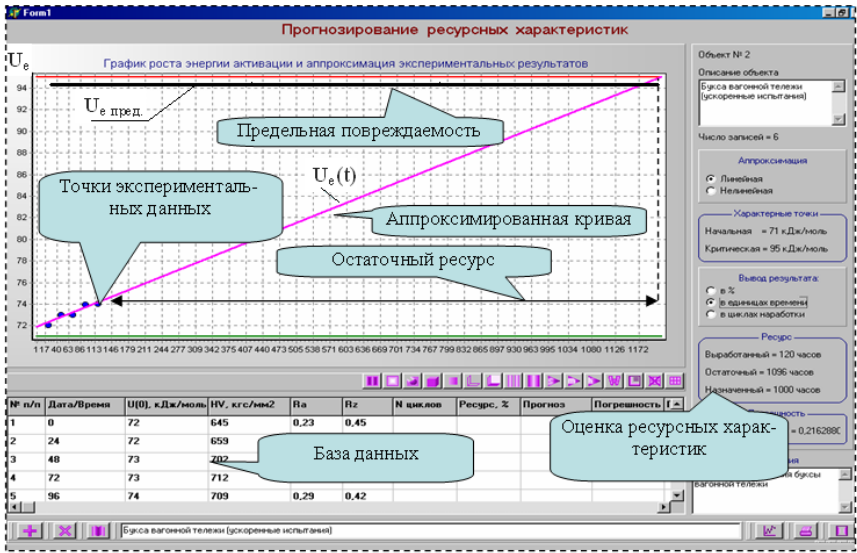


Рис. 4. Программная реализация методики оценки остаточного ресурса материалов деталей машин

В итоге проведенной идентификации процесса изнашивания усталостного типа и оценки значимости параметров повреждаемости и разрушения получена базовая модель усталостного износа.

В модели отражен механизм деформации встречающихся при трении микронеровностей, образования и накопления повреждаемости в пределах т. н. контурных пятен контакта и их группового разрушения, фиксируемого в виде «ступеней» на кривых износа.

Указанный механизм представлен параметрами кинетической термофлуктуационной концепции прочности, а для оценки этих параметров (U_0 – энергии активации классической деформации и γ – структурно-чувствительного коэффициента) использован склерометрический способ испытаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Громаковский Д.Г., Силаев Б.М., Логвинов Л.Н. Проблемы разработки термофлуктуационных моделей изнашивания поверхностей // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2009. – № 6. – М., Машиностроение. – С. 45-48.
2. Громаковский Д.Г. Система понятий и структура моделей изнашивания // Трение и износ. – 1977. – Т. 18. – № 1. – С. 53-62.
3. Громаковский Д.Г. Концептуальный подход в задачах обеспечения высокой износостойкости поверхностей узлов трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. – № 3. – М., Машиностроение. – С. 33-37. – ISSN 1819-2092.

4. Хрущов М.М. Трение, износ и микротвердость материалов. Избранные работы. – М.: Красанд, 2012. – 512 с.
5. Quinn T.F.J. Oxidational Wear Modeelling: Part III-The Effects of Speed and Elevated Temperatures. Abstracts of Paners of The World Tribology Congress Bookcraft Limited, Bath UK. 1997, 561 p.
6. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. – Ташкент: ФАН, 1979. – 186 с.
7. Ратнер С.Б. Истирание полимеров как кинетический термоактивационный процесс. – М.: ДАН СССР, 1966. – Т. 166. – № 4. – С. 909-912.
8. Ковиов А.Г. Разработка трибохимических методов расчета и повышения фреттингостойкости деталей турбокомпрессоров и сплавов титана ВТ9 и ВТЗ-1: Дисс. канд. техн. наук. – Киев: Институт гражданской авиации, 1988. – 200 с.
9. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: Монография / И.Д. Ибатуллин. – Самара: СамГТУ, 2008. – 387 с.: ил.
10. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности // Физика твердого тела. – 1980. – Т. 22. – Вып. 11. – С. 3344- 3349.
11. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
12. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
13. Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология. – М.: Эко-Пресс, 2010. – 609 с.
14. Машков Ю.К. Трибология конструкционных материалов. – Омск: Изд. ОмГТУ, 1996. – 304 с.
15. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.И. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
16. Силаев Б.М. Трибология деталей машин в маловязких средах. – Самара: Изд. Самарского аэрокосмического университета, 2008. – 264 с.

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2012 г.

THE ANALYSIS OF DAMAGEABILITY OF FRICTION SURFACES, ESTIMATION OF KINETIC CHARACTERISTICS OF THEIR STATUS AND WEAR RESISTANCE PREDICTION

D.G. Gromakovsky

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The paper gives the results of development and identification of physical and design models of the outwearing, based on kinetic thermo fluctuation approach to estimation of the mechanism of damageability accumulation and corruption of the details outer zone deformed by friction. There has been demonstrated a new method of a sclerometric estimation of energetic characteristics of a material, as well as the possibility of this method to predict wear resistance based on empirical results of sclerometric tests.

Keywords: *outwearing, friction, contact deformation, damageability, fatigue mechanism of corrupting, activation energy, structural and sensitive coefficient, longevity resource*