

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ МОДЕЛИ ИЗНАШИВАНИЯ И СКЛЕРОМЕТРИЧЕСКОГО СПОСОБА ОЦЕНКИ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

© 2011 Д.Г. Громаковский

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 10.11.2011

Предложена концепция и модель оценки термофлуктуационных кинетических параметров повреждаемости металлических материалов - удельной энергии деформации, накапливаемой энергии повреждения и энергии активации пластической деформации. Для экспериментальной оценки этих параметров разработан программно-аппаратурный комплекс.

Ключевые слова: изнашивание, повреждаемость, удельная энергия деформации, накапливаемая энергия повреждаемости, энергия активации пластической деформации, поверхностный слой, индентор Виккерса.

¹Разработка физической концепции изнашивания опирается на идеях, впервые высказанных М.М. Хрущовым [1], И.В. Крагельским [2], Б.И. Костецким [3], И.Н. Дроздовым [4], а также рядом зарубежных ученых еще в 60...70-е годы.

Так, в 1967 г. Т. Квин [5] предложил кинетическую модель изнашивания материалов при окислительном механизме разрушения поверхности, в которой время до разрушения окисной пленки под действием механических напряжений трения ограничено достижением пленкой критической толщины - ξ . Механическое напряжение в модели представлено импульсами напряжений. Прирост массы окисла описан в виде параболической функции

$$\Delta m^2 = K_p t, \quad (1)$$

где K_p - постоянная параболической аппроксимации скорости окисления. Ограничивая прирост массы окисла предельной толщиной пленки $\Delta m = \xi \rho$ (ρ - плотность окисла), автор получил выражение связи критической толщины пленки со временем

$$\xi^2 = K_p t / \rho^2, \quad (2)$$

В формуле (2) время до разрушения пленки определено через постоянную параболической аппроксимации скорости окисления

$$t = \frac{\rho^2 \xi^2}{K_p}, \quad (3)$$

$$K_p = A_c \exp\left(-\frac{U_0}{RT}\right), \quad (4)$$

где A_c - постоянная; U_0 - энергия активации; R и T - универсальная газовая постоянная и температура в уравнении Арениуса.

Разрушение вторичных структур в рассматриваемой модели происходит периодически, а регулятором скорости разрушения является скорость роста пленок до их критического значения. Отмеченную

особенность подтверждают наши эксперименты по изнашиванию конструкционных сталей: 38ХАШ, 12ХН4АШ, 12ХН3А, ВКС-4 и др., чугунов СЧ-21-40, легированных ферросиликохромом, марганцем и др. Разрушение здесь носит периодический характер и проявляется в виде т.н. ступеней на кривых износа. Ступенчатые кривые износа в экспериментах получали при измерении износа на зафиксированных по координатам точках поверхностей при применении метода лунок-свидетелей.

Примеры ступенчатых кривых износа и циклических изменений состояния изнашиваемых поверхностей приведены на рис. 1, 2 и 3. Подобные данные были получены Fusogo R.L. (1970 г., 1982 г.), В.В. Федоровым (1979, 1980 г.г.), Г. Пингуром (1982 г.), Ю.Н. Дроздовым, Е.А. Марченко и др. трибологами.

Интерпретация полученных нами результатов проведена на основе кинетических представлений о разрушении и в частности на базе ангармонической термофлуктуационной концепции прочности, развиваемой под влиянием работ академика С.Н. Жукова [6]. В этой модели описывающей долговечности единичной связи в ячейке твердого тела, рис. 4, представлен с помощью функции Больцмана.

Интерпретация полученных нами результатов проведена на основе кинетических представлений о разрушении и в частности на базе ангармонической термофлуктуационной концепции прочности, развиваемой под влиянием работ академика С.Н. Жукова [6].

$$\tau = t_0 \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT}. \quad (5)$$

Для макроскопического описания изнашивания в нашей работе была использована также структурная модель твердого тела, предложенная В.В. Федоровым [3]. В этой модели твердое тело, имеющее свободные поверхности, рассматривается как квазисплошная и неоднородная среда, в объемах которой статистически равномерно распределены структурные элементы, различные дефекты и повреждения.

Громаковский Дмитрий Григорьевич, д.т.н., профессор, директор НТЦ «Надежность». E-mail: pntms3@mail.ru

Эти дефекты в зависимости от стадии развития по-

вреждаемости могут быть либо источниками или

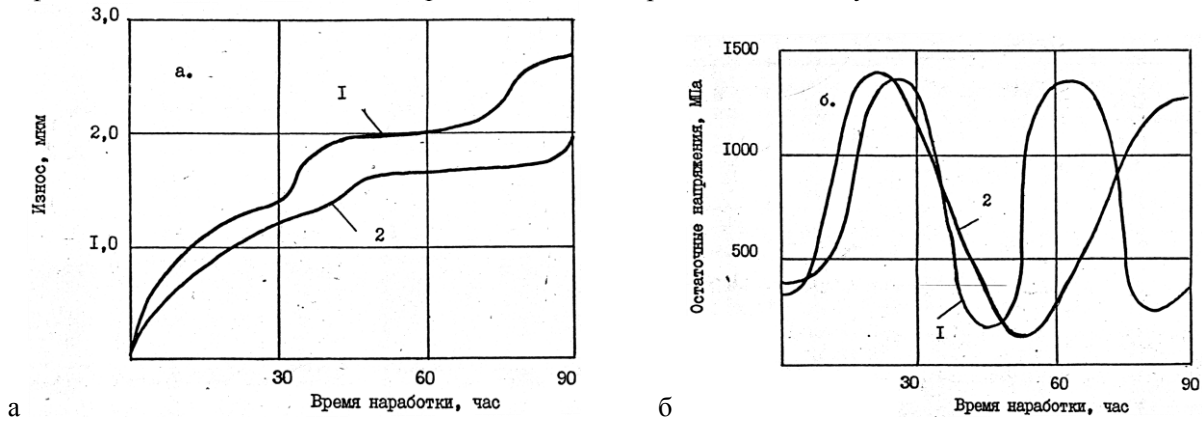


Рис.1. Циклические изменения характеристик состояния поверхностей при фреттинге в среде реактивного топлива: а – изменения интенсивности изнашивания; б - величина остаточных напряжений на сталях 12Х2Н4АШ (кривая 1) и ВКС-4 (кривая 2).

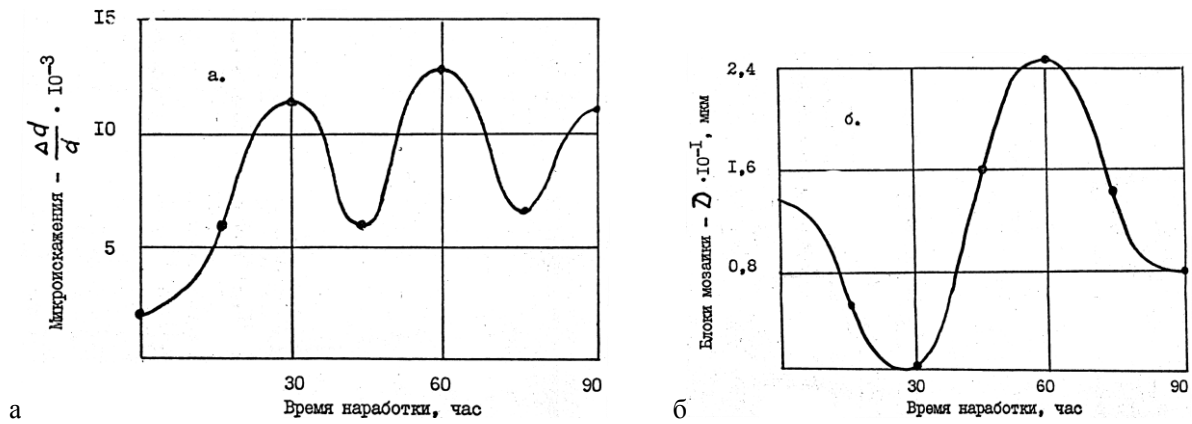


Рис. 2. Изменение уровня микроискажений – а и размеров блочной структуры – б, при изнашивании стали ВКС - 4 при фреттинге в среде реактивного топлива.

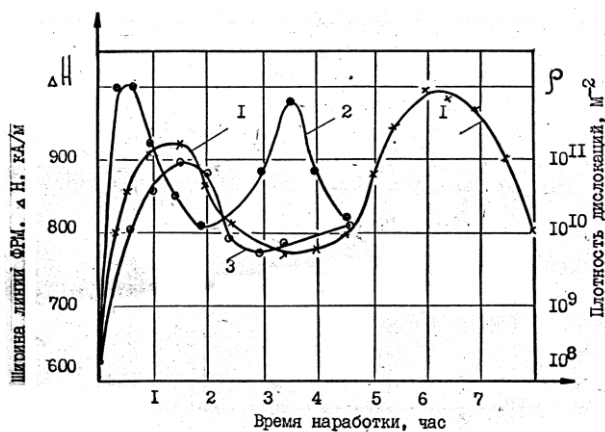


Рис. 3. Изменение ширины ΔH линии ФРМ и плотности дислокаций ρ в материале поверхностного слоя образца (Ni) по мере испытания на износ: 1 и 3 – при нагрузке 84 кПа; 2- при нагрузке 168 кПа.

стоками, либо оказывать блокирующее действие на движение дефектов и дислокаций. В нашей модели при описании частиц износа принято, что зародыши частиц износа представляет собой наиболее прочные участки микрообъема материала,

а разрыв связей происходит на их периферии. Частицы в модели имеют критический размер V_{kp} , определенный как среднестатистический размер час-

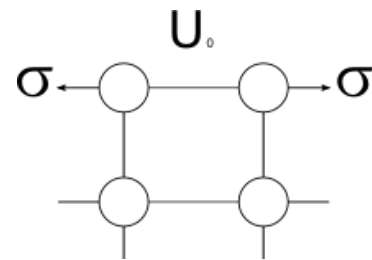


Рис. 4. Иллюстрация уравнения долговечности единичной связи академика С.Н. Журнова: t_0 - постоянная времени ($\sim 10_c^{-12}$); U_0 - энергия активации пластической деформации; γ – структурно-чувствительный коэффициент; K - постоянная Больцмана; σ и T - действующие направления информации.

тиц радиуса R по данным экспериментов. Форма V_{kp} принята сферической, см. рис. 5.

Предполагается, что на поверхности частиц критического размера V_{kp} равномерно расположены элементарные ячейки разрушения - активационные объемы материала V_a с радиусом r , тоже имеющие сферическую форму. Для отделения частицы критического размера необходимо разрушить около 0,7 числа связей, удерживающих частицу со стороны материала. Их количество определяется из соотношения радиусов R и r

$$\lambda' = 0,7 \frac{0,55 V_{kp}}{0,55 V_a} = 0,7 \frac{4\pi R^2}{4\pi r^2} = 0,7 \frac{R^2}{r^2}. \quad (6)$$

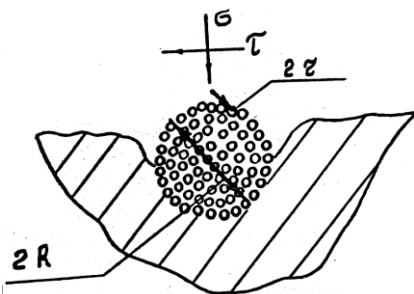


Рис. 5. Модель частицы критического объема.

Разрушение всего объема V_q потребует разрыва такого числа связей, которое определяется отношением

$$\lambda = \lambda' \frac{V_q}{V_{kp}}. \quad (7)$$

Подобно механизму образования зародышей, механизм разрыва связей на участке поверхности потенциальной частицы можно представить частотой разрыва $\omega = 1/\tau$, где $\tau = t_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right)$. Тогда для образования частицы критического размера требуется время $t_{V_{kp}} = \tau \cdot \lambda' = 0,7 \frac{R^2}{r^2} \tau$, а весь деформационный объем потребует на разрушение время $t_{V_q} = t_{V_{kp}} \cdot \lambda$.

Определение времени на разрушение в нашей задаче дает искомое решение, т.к.

$$J_v = V_{def} / t_{v0} \quad (8)$$

Виды преобразований уравнение износа было получено в виде:

$$J_v = \frac{\Delta A_r \cdot n_r \cdot h}{g \xi \lambda \left[t_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma\psi}{RT}\right) \right]}, \text{ мм}^3/\text{час}, \quad (9)$$

где ΔA_r - площадь среднего пятна фактического контакта; n_r - число пятен фактического контакта; h -

высота «ступени» на кривой износа (величина изнашивания за один кинетический цикл).

Для использования уравнения (9) необходима оценка кинетических параметров уравнения: U_{y0} , U_0 , γ , t_0 , H_μ .

Эта задача решается в нашей разработке использованием склерометрического способа оценки характеристик материалов и разработанного в СамГТУ склерометрического программно-аппаратного комплекса (рис. 6), схема – рис.7.

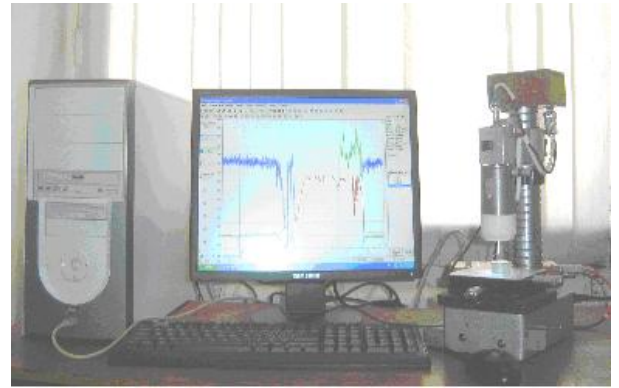


Рис. 6. Склерометрический программно-аппаратный комплекс.

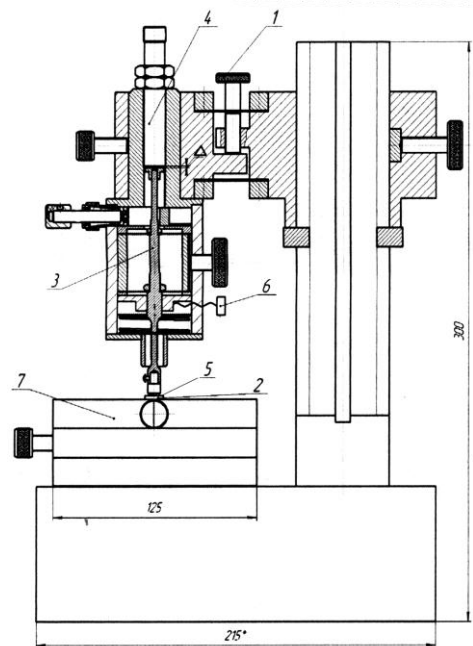


Рис. 7. Устройство склерометра.

Фотография приведена на рис. 6, а схема устройства на рис. 7, схема царапины на рис. 8.

При проведении испытаний индентор - 5 внедряют в поверхность на заданную глубину - h (например, $h=3$ мкм). Производят царапание, при котором автоматически измеряется величина деформационного усилия и длина царапины.

По параметрам царапания определяют кинетические параметры деформации.

1. Удельную энергию деформации, характеризующую пластичность материала $U_{уд}$ - отношение работы $A_{деф}$, затраченной на деформацию объема материала $V_{деф}$

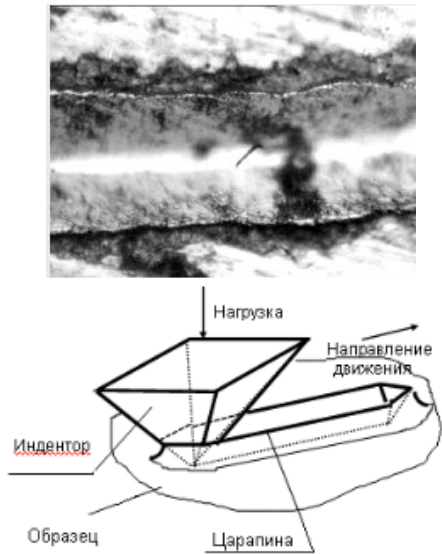
$$U_{уд} = A_{деф}/V_{деф}, \text{ кДж/мм}^3 \quad (10)$$


Рис. 8. Фотография и схема царапины.

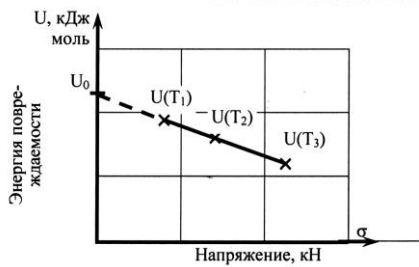


Рис. 9. Методика оценки энергии активации пластической деформации – U_0 , $T_1 < T_2 < T_3$.

3. Энергию активации пластической деформации – U_0 , кДж/моль.

Оценка U_0 производится при нулевом значении действующих напряжений с учётом влияния температуры - T путём аппроксимации значений $U(T)$, как это показано на рис. 9.

4. Микротвёрдость $H_{\mu} = U_0/\gamma$. (11)

5. Кинетический структурно-чувствительный коэффициент - γ , по результатам анализа системы

$$\gamma = U(T)/\sigma, \text{ мм}^3/\text{моль}, \quad (12)$$

где $U(T)$ - энергия активации разрушения при действующей температуре.

По результатам оценки накопленной энергии повреждаемости возможно прогнозирование остаточного ресурса. Для оценки остаточного ресурса, вначале, путем усталостных испытаний разрушают образец исследуемого материала, рис. 10 и оценивают критический уровень накопления повреждаемости материалов – $U_{е\text{ пред}}$ вблизи очага усталостного разрушения, а значение предельной энергии повреждаемости - $U_{пред}$ наносят на график (рис. 11).

2. Накопленная энергия повреждаемости - $U_e(t)$.

$U_e(t)$ - представляет собой $U_{деф}$ после наработки в течении времени - t (в конкретных условиях нагружения, скорости, температуры и др.).

Затем, на контролируемой детали (образце), через заданные интервалы времени наработки, производят повторные склерометрирования, а результаты наносят на диагностический график рис.7. После ряда диагностических испытаний экстраполируют линию $U_e(t)$ до пересечения с линией $U_{е\text{ пред}}$. Пересечение этих линий отсекает на графике время истощения ресурса - $t_{остат}$

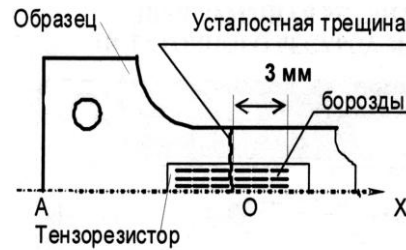


Рис. 10. Оценка предельной энергии повреждаемости материала в зоне разрушения при усталостных испытаниях плоского образца.



Рис. 11. Характерные результаты оценки величины энергии повреждаемости материала при усталостных испытаниях, начиная от края разлома образца.

Экстраполяция повреждаемости от разрушения показана на рис.12. Программа обработки данных на рис. 13.

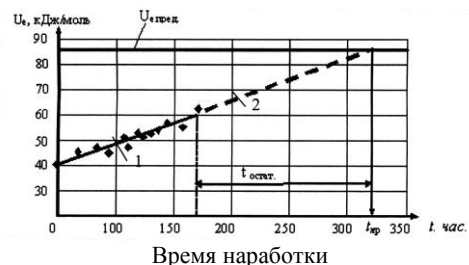


Рис. 12. Пример прогнозирования остаточного ресурса: 1- участок графика накопления повреждаемости, построенный по экспериментальным данным; 2 - экстраполяция экспериментальных данных; $t_{кр}$ - время истощения остаточного ресурса; $t_{остат}$ - остаточный ресурс.

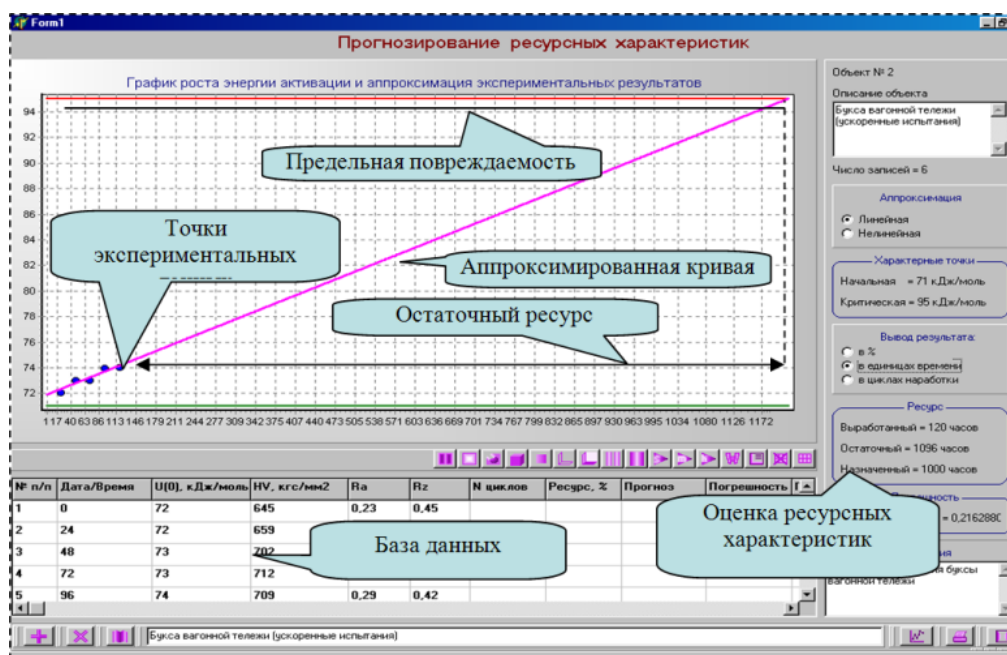


Рис. 13. Программная реализация методики оценки остаточного ресурса материалов деталей машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хрущев М.М. Повышение износостойкости сталей путем поверхностных упрочнений за счет керамических химико-термических обработок нанесения покрытий и наплавов. //Трение и износ. 2010г. №6.
2. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 524с.
3. Костецкий Б.И. Износостойкость деталей машин. Москва-Киев, Машгиз, 1950. 168с.
4. Дроздов Ю.Н., Наумова Н.М., Тананов М.А., Назарова Т.И. Трибология в космосе. //Трение и смазка в машинах и механизмах. №3, 2009. –С.41...45.
5. T. Quinn. The mechanism of hot-spot temperatures on the unlubricated wear of steel. ASLTrans, 10,158(1967).
6. Журков С.Н., Санфирова Т.П. Температурно-временная зависимость прочности чистых металлов. Доклады АН СССР, 1955, 10, №2. с.237...240.
7. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент. Изд-во «ФАН», Узбекская ССР. 1985. 167с.

WORKING OUT OF THE CONCEPT OF MODEL OF WEAR PROCESS AND SCLEROMETRIC WAY OF THE ESTIMATION OF THE KINETIC PARAMETERS OF DESTRUCTION OF SURFACES OF THE FRICTION

© 2011 D.G. Gromakovsky

Samara State technical university

The concept and estimation model thermofluctuations kinetic parameters damageability metal materials - specific energy of deformation and the damageability, accumulated energy and energy of activation of plastic deformation. For an experimental estimation of these parameters it is developed programmno-a hardware complex.

Key words: wear process, damageability, specific energy of the deformation, accumulated energy of damageability, energy of activation of plastic deformation, blanket, indenter Vickersa

Gromakovsky Dmitry Grigorevich, Dr.Sci.Tech., the professor, the director of scientific and technological center "Reliability".
E-mail: pnms3@mail.ru