УДК 621.891

ОБ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТАЛОСТНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

© Д.Г. Громаковский

Государственный технический университет, Самара, Россия

Аннотация. *В статье изложены основные положения комплексного подхода к оценке триботехнических параметров поверхностей трения.*

Ключевые слова: усталостный механизм изнашивания, феномен «ступенчатых» кривых износа, метод склерометрии.

В работах [1, 2] и др. предложена модель усталостного изнашивания поверхностей, деформируемых трением, основанная на термофлуктуационной концепции прочности, выдвинутой акад. Журковым С.Н. [3] и др. Модель предполагает, что единичным актом разрушения поверхностей при усталостном механизме изнашивания, является групповое отделение частиц, которое происходит в объемах материала поверхностного слоя, расположенного на вершинах микронеровностей вследствие предельного значения накопленной повреждаемости в этом объеме, что иллюстрирует рис.1.

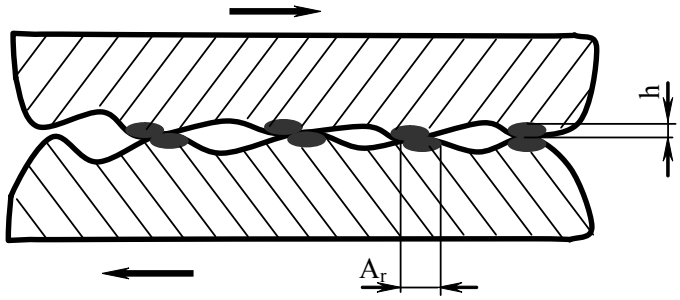


Рис.1. Схема расположения микрообъёмов материала на поверхностях трения:
h - глубина разрушаемого слоя, A_r - площадки фактического контакта.

В модели предполагается, что суммарный объем одновременно разрушаемого материала на поверхностях трения - V_Σ, может быть оценён по известным характеристикам контакта:

$$V_\Sigma = {}_\Delta A_r \cdot n_r \cdot h, \text{ мкм}^3 \qquad (1)$$

где ${}_\Delta A_r$ - расчетная площадь единичного пятна фактического контакта, n_r –число таких площадок на рассматриваемой поверхности [4], а h- средняя высота одновременно разрушаемой совокупности микронеровностей поверхностей.

Оценка h связана с феноменом т.н. «ступенчатых» кривых износа, что показано в работах многих трибологов, например, [5].

Характерный пример «ступенчатых» кривых износа приведен на рис.2.

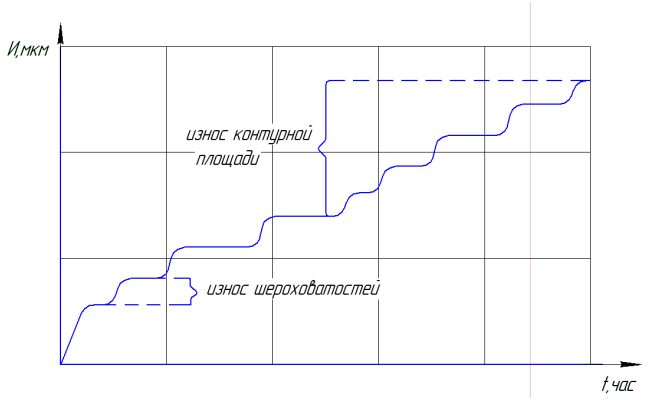


Рис.2. Кривая износа.

Особенности формирования кривых ступенчатого типа связаны с методикой измерения величины износа, в известном способе лунок – «свидетелей».

В этом случае величина износа всегда измеряется в заданной координате расположения лунок, а не в произвольно разбросанных точках на поверхности износа. Произвольный разброс точек создает значительное рассеяние получаемых результатов измерения и маскирует расположение высотных характеристик ступеней износа.

В принятой модели высота ступеней и время образования ступеней использованы для оценки средней скорости усталостного изнашивания – $J_{ср}$, которая интерпритируется как скорость группового отделения продуктов износа.

$$J_{ср} = \frac{V_{\Sigma}}{t} \quad , \text{ мм}^3/\text{час} \qquad (2)$$

где V_{Σ} - объем разрушения одной ступени износа за время - t.

Уравнение скорости изнашивания имеет следующий вид:

$$J_V = \frac{V_{\Sigma}}{t_{ступени}} = \frac{A_r \cdot n_r \cdot h}{\eta_m \xi \lambda \cdot \left[t_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \psi\gamma\sigma}{R \cdot T} \right) \right]}, \left[\frac{мм^3}{час} \right] \qquad (3)$$

где: λ - число связей разрушаемых в объеме материала за одну ступень износа, η_m и ξ - коэффициенты учитывающие, исходную повреждаемость материала и ее релаксацию повреждений, τ_0 – постоянная времени; U_0 – энергия активации пластической деформации; ψ - коэффициент поглощения; γ - структурно чувствительный коэффициент; T и σ- абсолютная температура и действующие напряжения.

Время и число разрушаемых связей представлено в (3) на базе уравнения долговечности единичной связи (4):

$$\tau = t_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{k \cdot T} \right), \qquad (4)$$

где t_0- постоянная времени; U_0 - энергия активации пластической деформации; γ - структурно-чувствительный параметр; σ - действующее напряжение; k - постоянная Больцмана; T - температура.

При применении расчетного уравнения (3), в ряде случаев, получены результаты износа, близкие к наблюдаемым в эксплуатации, например, рис.3.

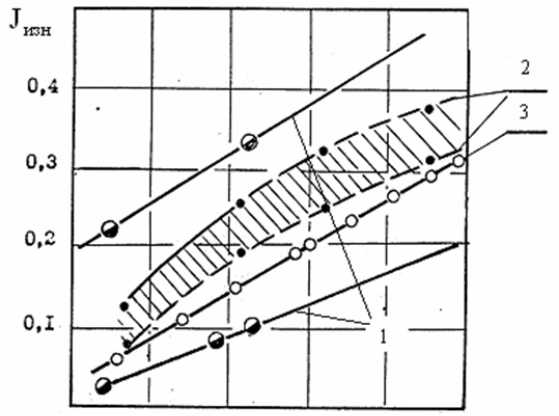


Рис.3. Результаты расчета тяжелонагруженной втулки шасси самолета: 1- поле рассеяния значений по данным эксплуатации, 2-поле рассеяния результатов стендовых испытаний, 3- расчетные результаты.

Для использования уравнений, содержащих термофлуктуационные параметры: энергию активации пластической деформации - U_0 ; структурно-чувствительный коэффициент - γ необходима экспериментальная оценка их значений для различных материалов, их механичемкой, термомеханической обработки и др.

В практике С. Петербургского ФТИ [3,6] и др. эти параметры оценивались при испытаниях образцов материала на длительную прочность. Недостаток такой методики в ее большой трудоемкости и невозможности применения к реальным деталям машин и механизмов.

Учитывая это, в СамГТУ проведен поиск, апробирован способ и создан программно-аппаратурный комплекс для оценки термофлуктуационных параметров и ряда других характеристик пластичности, основанный на склерометрических испытаниях.

На способы получены патенты РФ № 2166745, 2119165, 2119165, 2277232 и 2282174.

Фотография склерометрического программно-аппаратурного комплекса показана на рис.4, а схема царапания приведена на рис.5.

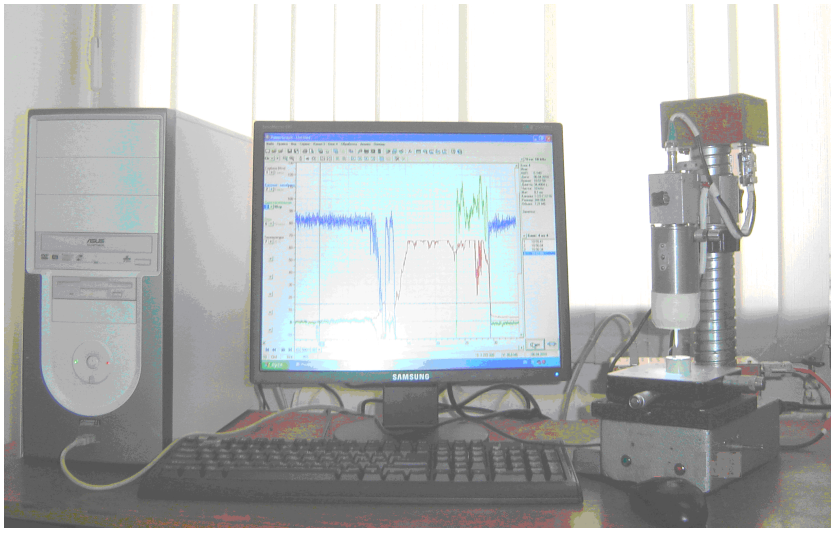


Рис.4. Склерометрический программно-аппаратурный комплекс.

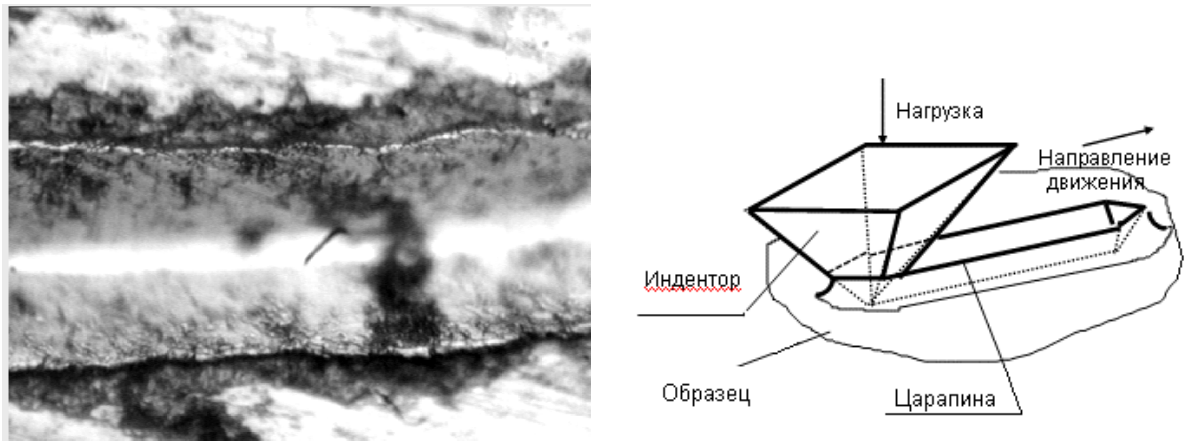
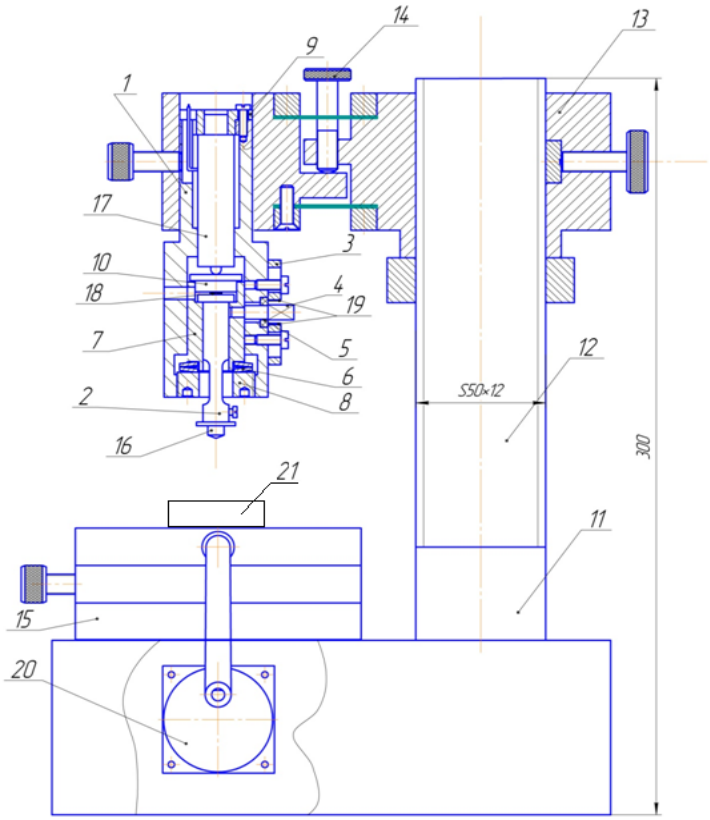


Рис.5. Фотография и схема царапины.

Устройство рабочего блока склерометра показано на рис.6.



При проведении испытаний выполняют следующие процедуры:

1. С помощью привода настройки – 14 производят касание индентором поверхности испытываемого образца – 21, что наблюдают на экране компьютера, как сигнал смещения индентора относительно безконтактного датчика - 19. После касания, с помощью актюатора–14, индентор внедряют в поверхность на заданную глубину – h (например, h=3 мкм и др.), производят царапание, при котором автоматически измеряется величина деформационного усилия и длина царапины.

По параметрам царапания определяют кинетические характеристики деформации материалов, как это показано ниже.

Рис.6. Устройство склерометра

Методом склерометрии могут быть оценены следующие механические и кинетические характеристики материалов.

1. Удельная энергия деформации, характеризующая пластичность материала: $U_{уд}$ – отношение работы $A_{деф}$, затраченной на деформацию объёма материала - $V_{деф}$.

$$U_{уд}=A_{деф}/V_{деф}, \text{ кДж/мм}^3 .$$

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.).

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), полученных при испытаниях, как это показано на рис.7.

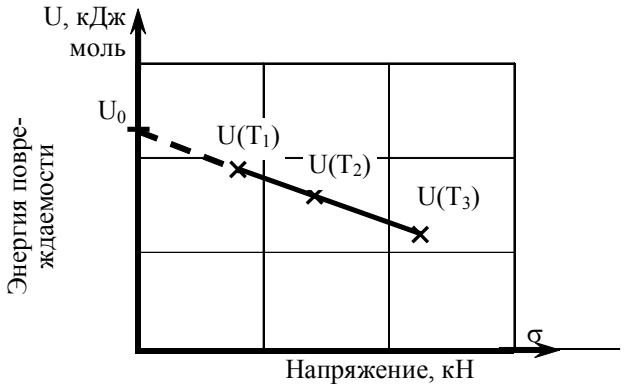


Рис. 7. Методика оценки энергии активации пластической деформации – $U_0(f)$, ($T_1<T_2<T_3$).

4. Микротвёрдость H_μ.

$$H_\mu = U_0/\gamma.$$

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

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

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

По результатам оценки накопленной энергии повреждаемости возможно прогнозирование остаточного ресурса.

При этом, вначале, при усталостных испытаниях разрушают образец исследуемого материала, рис. 8, и оценивают критический уровень накопления повреждаемости материалов – $U_{e\ пред.}$ вблизи очага усталостного разрушения, а значение предельной энергии повреждаемости - $U_{пред}$ наносят на график (рис. 9).

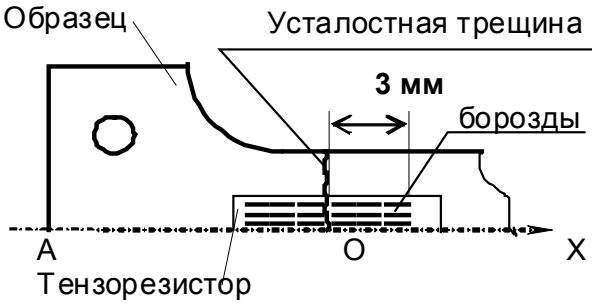


Рис.8. Оценка предельной энергии повреждаемости материала в зоне разрушения при усталостных испытаниях плоского образца.

Затем, на контролируемой детали (образце), через заданные интервалы времени наработки, производят повторные склерометрирования, а результаты наносят на диагностический график рис.9. После ряда диагностических испытаний линию $U_e(t)$

экстраполируют до пересечения с линией $U_{e\ пред}$. Пересечение этих линий отсекает на графике время исчерпания ресурса – $t_{остат}$

Экстраполяцию данных о росте энергии повреждаемости при наработке производят, как это показано на рис. 9.

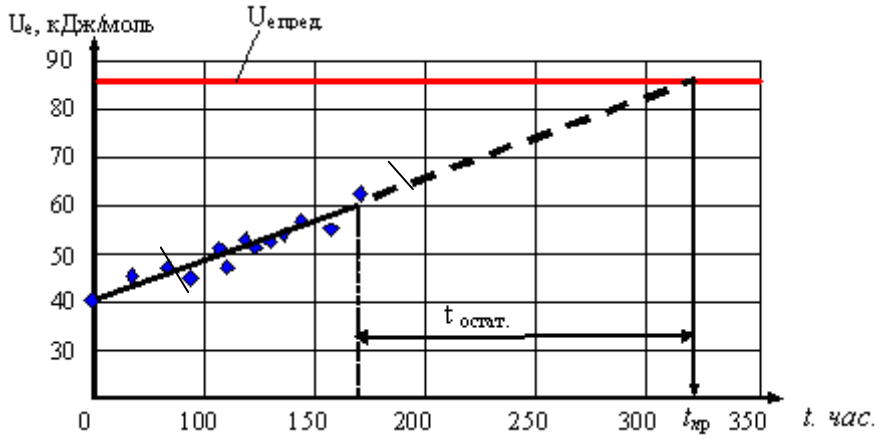


Рис. 9. Пример прогнозирования остаточного ресурса: 1 – участок графика накопления повреждаемости, построенный по экспериментальным данным; 2 – экстраполяция экспериментальных данных; $t_{пр}$ – время исчерпания остаточного ресурса; $t_{остат}$ – остаточный ресурс.

Программная реализация способа приведена на рис.10.

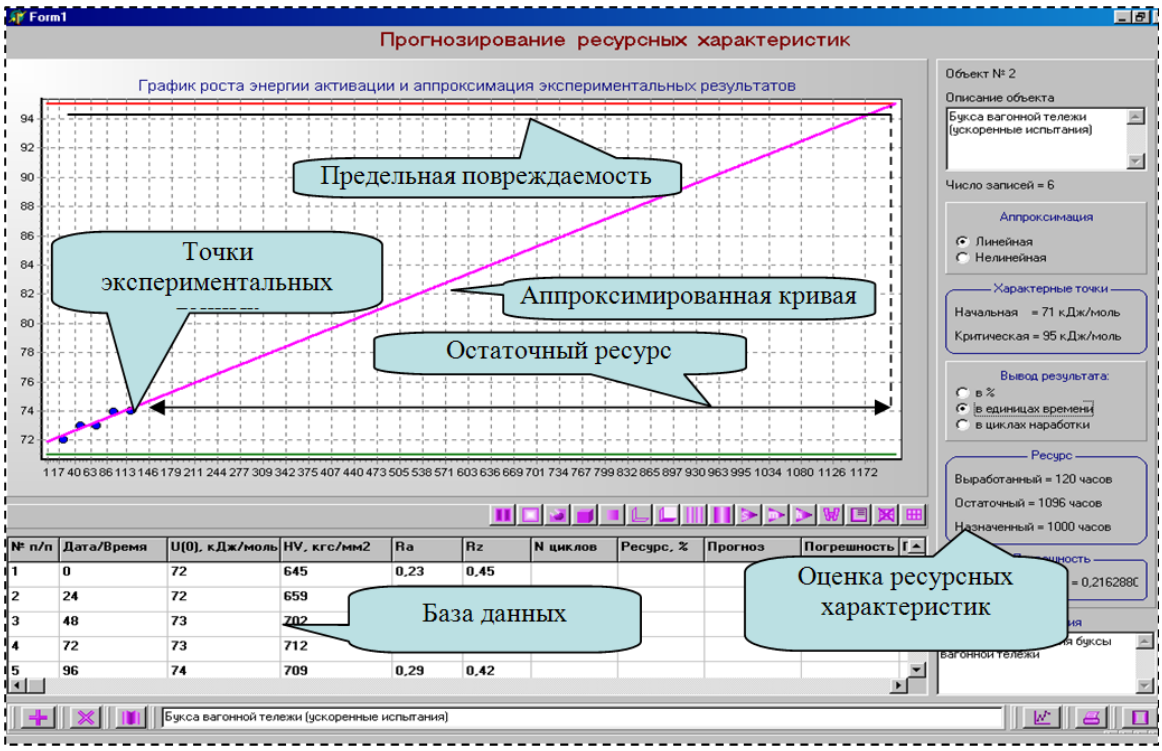


Рис. 10.

Предложенный способ позволяет осуществлять неразрушающий контроль состояния поверхности конструкционных материалов; исследовать кинетику накопления повреждаемости поверхности при изнашивании, выбирать оптимальные методы и режимы различных видов упрочняющих обработок и покрытий; подбирать смазочные материалы.

Способ и программно-аппаратурный комплекс для оценки механических и активационных характеристик пластичности и прогнозирования остаточного ресурса материалов, деталей машин и конструкций защищены Патентами РФ №№ 2166745, 2119165, 2277232 и 2282174.

Авторский коллектив: д.т.н., проф. Громаковский Д.Г., к.т.н., доц. Ибатуллин И.Д., к.т.н., доц. Ковшов А.Г., вед. инженеры - Шигин С.В., Фролов В.Л., Бураков А.П., инженеры – Карпухин М.В. и Балашов Е.С.

Литература

1. Громаковский Д.Г. Разрушение поверхностей при трении и разработка кинетической модели изнашивания. – М.: Машиностроение, 2000. № 1. – С. 3-10.

2. Громаковский Д.Г., Ибатуллин И.Д. и др. Новый способ оценки пластичности конструкционных материалов и прогнозирования ресурсных характеристик деталей машин и конструкций. // «Тяжёлое машиностроение». – М., 2000. № 10. – С. 2-6.

3. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности.//Физика твердого тела. 1980. - Т. 22, - вып.11, - С. 3344-3349.

4.Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхностей и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение,1981. 244с.

5. Марченко Е.А. О природе разрушения поверхностей металлов при трении – М.:Наука,1979.- 118с.

6. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.И. Кинетическая природа прочности твердых тел –М.: Наука, 1974, - 560 с.

Поступила: 22.10.10.