

РАЗРАБОТКА СКЛЕРОМЕТРИЧЕСКОГО СПОСОБА ОЦЕНКИ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТЕЙ, ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТРЕНИЕМ

Карпухин М.В.

ФГБОУ ВПО СамГТУ, НТЦ «Надежность», г. Самара, Россия,
pnms3@mail.ru

Метод склерометрии заключается в том, что в исследуемую поверхность под воздействием нормальной нагрузки внедряют индентор заданной формы, затем, приложив тангенциальное усилие, осуществляют относительное перемещение индентора, в результате чего образуется пластический отпечаток в виде пропаханной борозды, размеры которой используются для оценки механических характеристик материала. Инденторы изготавливаются из твердых материалов (быстрорежущие стали, твердые сплавы, монокристаллы сапфира, алмаза и др.), как правило, в виде пирамидальной или конической фигуры.

В разработке СамГТУ данный способ используется для получения кинетических и термофлуктуационных характеристик деформации, которые ранее оценивались другими, трудоемкими и разрушающими методами на образцах материалов при их испытаниях на растяжение в режиме ползучести. Оценка кинетических термофлуктуационных характеристик долговечности, как параметров базовой модели долговечности единичной связи под нагрузкой, представлено в уравнении, предложенном академиком Журковым С.Н. [1,2] и др.

$$\tau = t_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (1)$$

где t_0 – постоянная времени (порядок частоты колебаний атомов в межузлиях кристаллической решетки, ($t_0 \sim 10^{-12} \dots 10^{-13}$ сек); U_0 – энергия активации пластической деформации; γ – структурно-чувствительный коэффициент; σ – действующее напряжение; k – коэффициент Больцмана; T – температура.

Кроме адекватности напряженно-деформированного состояния при царапании и при контактном взаимодействии выступов трущихся поверхностей, применение метода склерометрии в данных целях можно обосновать следующим.

Царапание позволяет произвести деформацию материала поверхностного слоя на регулируемой глубине. Контактные нагрузки $p, \approx H_\mu$ при царапании обеспечивают условие, необходимое для оценки энергии активации механическим способом, так как производят активацию дислокационного механизма повреждения поверхностного слоя. Выбор направления царапания позволяет выявить анизотропию свойств материала поверхностного слоя. Осуществление повторных проходов индентора по одному участку поверхности позволяет оценить свойства изучаемого материала при накоплении повреждений в режиме малоциклового усталости. Выбор формы и материала индентора, а также условий царапания позволяет реализовать различные механизмы повреждаемости поверхностного слоя.

Разрабатываемый в СамГТУ способ и склерометрический программно-аппаратурный комплекс позволяют оценивать микротвердость, энергию активации пластической деформации и повреждаемость поверхностей в эксплуатации или при испытаниях. Фотография и схема образования царапины приведены на рис. 1.

При проведении испытаний на разрабатываемом склерометре, производят касание индентором поверхности, а затем индентор внедряют в поверхность на заданную глубину – h (например, $h = 3$ мкм.) и производят царапание, при котором измеряют деформационное усилие и длину царапины. По результатам измерений определяют кинетические параметры деформации материалов: $U_{\text{деф}}$ – удельную энергию деформации, U_0 – энергию активации пластической деформации и γ – структурно-чувствительный коэффициент для уравнения долговечности [3].

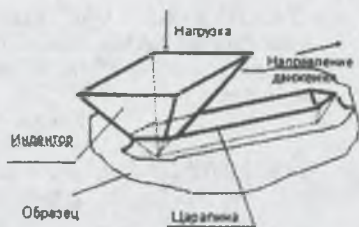
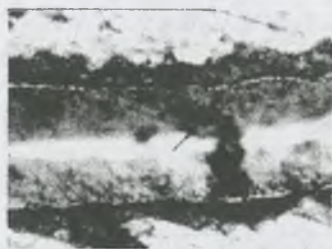


Рис.1. Фотография и схема царапины.

Методом склерометрии будут оцениваться следующие механические и кинетические характеристики материалов.

1 Удельная энергия деформации, характеризующая пластичность материала – $U_{\text{деф}}$ – отношение работы $A_{\text{деф}}$, затраченной на деформацию объема материала $V_{\text{деф}}$.

$$U_{\text{уд}} = A/V_{\text{деф}}, \text{ кДж/моль.}$$

2. Накопленная энергия повреждаемости – $U_c(t)$ представляет собой $U_{\text{деф}}$ после наработки в течение времени – t (в конкретных условиях нагружения, скорости, температуры и др.).

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

Оценка U_0 производится для нулевого значения действующих напряжений при склерометрировании с учётом влияния температуры T путём аппроксимации значений $U(T)$ до значения $\sigma = 0$, как это показано на рис.2.

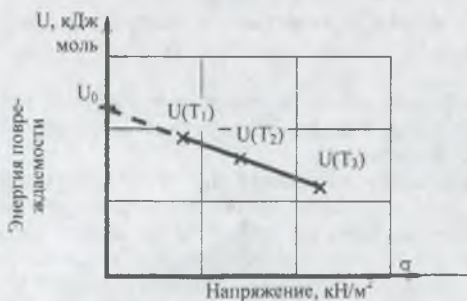


Рис. 2. Методика оценки энергии активации пластической деформации – U_0 , $T_1 < T_2 < T_3$.

4. Микротвёрдость H_u .

$$H_u = U_0/\gamma.$$

5. Кинетический структурно-чувствительный коэффициент – γ , по результатам анализа системы $\gamma = U(T)/\sigma$, мм³/моль, где $U(T)$ – энергия активации разрушения при действующей температуре.

Активационные параметры U_0 и γ использованы в расчетном уравнении изнашивания [3]:

$$J_v = \frac{\Delta A, n_r, h}{8 \xi \lambda \left[t_0 \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma \psi}{RT} \right) \right]} \cdot \text{мм}^3/\text{час} \quad (2)$$

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 (2) проводится оценка кинетических параметров уравнения: $U_{уд}$, U_0 , γ , t_0 , H_μ [3]

Метод склерометрии возможно применить для оценки остаточного ресурса деталей узлов трения. При этом вначале, путем усталостных испытаний разрушают образец исследуемого материала, рис.3 и оценивают критический уровень накопления повреждаемости материалов – $U_{e\text{ пред.}}$ вблизи очага усталостного разрушения, а значение предельной энергии повреждаемости $U_{\text{пред.}}$ наносят на график рис.4. На контролируемой детали (образце), через заданные интервалы времени наработки, производят повторные склерометрирования, а результаты наносят на диагностический график рис.4. После ряда диагностических испытаний экстраполируют линию $U_0(t)$ до пересечения с линией $U_{e\text{ пред.}}$. Пересечение этих линий отсекает на графике время истощения ресурса $t_{\text{остат}}$

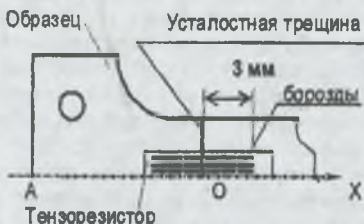


Рис.3. Оценка предельной энергии повреждаемости материала в зоне разрушения при усталостных испытаниях плоского образца.

Экстраполяция повреждаемости от разрушения показана на рис.4.

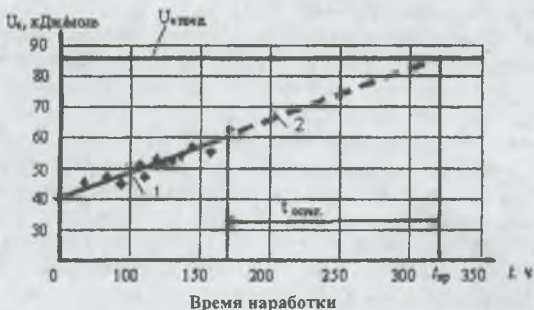


Рис. 4. Пример прогнозирования остаточного ресурса: 1 – участок графика накопления повреждаемости, построенный по экспериментальным данным; 2 – экстраполяция экспериментальных данных; $t_{сп}$ – время истощения остаточного ресурса; $t_{остат}$ – остаточный ресурс.

Список литературы

1. Журков С.Н. Проблемы прочности твердых тел. Вестник АН СССР, 1957. №11. - С.78-82.
2. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Успехи физических наук. 1970. 537с.
3. Громаковский Д.Г Система понятий и структура моделей изнашивания. //Трение и износ. Том 18. № 1, №5. – М.: Машиностроение, 1997. - С.18-24.