

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК И СРЕДСТВ СКЛЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ АКТИВАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

© 2006 И.Д. Ибатуллин, Д.Г. Громаковский, В.Е. Барынкин

Самарский государственный технический университет

В статье описаны методики и технические средства для оценки активационных параметров разрушения поверхностных слоев при использовании метода склерометрии. Полученные результаты могут использоваться для экспериментальной оценки параметров кинетических моделей для расчетов скорости усталостного изнашивания.

В основе достоверного прогнозирования долговечности узлов трения машин лежит корректный выбор расчетной модели изнашивания. В настоящее время создано множество различных подходов к разработке таких моделей: от эмпирических, являющихся простейшими математическими аппроксимациями экспериментальных результатов, до кинетических – основанных на методах термодинамики и статистической физики. Широкое применение последних сдерживается отсутствием доступных средств и методов оценки активационных характеристик разрушения поверхностных слоев: энергии активации пластической деформации u_0 и структурно-чувствительного коэффициента γ . В данной статье рассмотрен ряд склерометрических устройств и методов идентификации параметров расчетных моделей изнашивания, разработанные в НТЦ «Надежность» СамГТУ [1].

Склерометрия (микроцарапание) является одним из старейших и наиболее ценных методов испытаний механических свойств материалов, более чем на сто лет опередивший появление традиционных способов контроля прочностных характеристик. С появлением в начале XX века современных микротвердомеров склерометры, как средство механических испытаний, были почти полностью вытеснены. Однако в последнее время в России и за рубежом интерес к методу склерометрии, как способу исследования характеристик поверхностей трения, стал возрастать. Преимуществами метода склерометрии являются следующие: за счет выбора нагрузки на индентор возможна деформация материала поверхностного слоя на любой глубине: от нанометров до сотен мик-

рометров; выбором формы индентора можно реализовать различные механизмы повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: от микрорезания до усталостного выкрашивания; изменяя направления царапания можно исследовать анизотропию механических свойств текстурированных поверхностных слоев; вместе с тем склерометрия – неразрушающий и экспрессный метод исследования поверхностных слоев, совместимый с другими методами физических исследований. Для склерометрической оценки энергии активации пластической деформации материала поверхностного слоя разработано два способа, основанных на кинетической интерпретации энергетической модели повреждаемости и разрушения материалов [2].

$$\Delta u = 2,3RT \ln \left(\frac{t}{\tau_0} \right) + 10^{-5} V_m \sigma n_0 \dot{\epsilon} + \Delta g \quad (1)$$

где Δu – мольное изменение внутренней энергии материала, кДж/моль; R – универсальная газовая постоянная, кДж/моль·К; T – абсолютная температура, К; t – текущее время от начала нагружения, с; $\tau_0 \approx 10^{-12}$ – период атомных колебаний, с; V_m – молярный объем, мм³/моль; σ – напряжение, кгс/мм²; $\dot{\epsilon}$ – средняя скорость пластической деформации, с⁻¹; n_0 – динамический коэффициент; Δg – изменение свободной энергии под действием внешней среды, кДж/моль. Модель (1) позволяет рассчитать кинетику накопления внутренней энергии Δu материалов, обусловленную работой термических флуктуаций, механического напряжения и влиянием в внешней среды.

Как видно из выражения со временем происходит непрерывный рост внутренней энергии. Разрушение, согласно этой модели, полученной в рамках структурно-энергетической теории прочности, наступает в момент достижения равенства $\Delta u = u_0$.

В случае приложения высоких механических нагрузок, когда $\sigma \rightarrow HB$, механизм разрушения материалов, близок к атермическому. При этом время до возникновения пластической неустойчивости приближается $\tau \rightarrow \tau_0$, следовательно первое слагаемое выражения (1) стремится к нулю и основной вклад в разрушение будет вноситься вторым слагаемым, представляющим собой по сути удельную механическую энергию, затрачиваемую на активацию разрушения материала количеством в 1 моль.

Первый способ оценки энергии активации пластической деформации (рис. 1а) заключается в оттеснении материала поверхностного слоя индентором Виккерса и оценке количества выдавленного материала за один проход индентора и затраченной работы, по которым рассчитывается значение u_0 :

$$u_0 = \frac{14,286 \cdot V_m \cdot (P-1) \cdot N \cdot f}{D_5^2 - D_1^2}$$

где V_m - молярный объем; P - число проходов индентора; N и f - нормальная нагрузка и сопротивление пластической деформации.

Более практичным является второй способ оценки энергии активации (см. рис. 1б), при котором механизм деформирования поверхности обеспечивает постоянную величину заглабления индентора h и, соответственно, - постоянное, заданное количество вытесненного из поверхности материала. Тогда с учетом геометрии алмазного индентора u_0 можно оценить из выражения:

$$u_0 = \frac{F_\tau}{S} \cong \frac{0,28 F_\tau}{h^2}, \text{ кДж/моль}$$

Как показали эксперименты, энергия активации пластической деформации является параметром, чувствительным к степени усталостной дегградации материалов, независимо от механизмов, вызывающих усталость (трибоздействия, термические и механические знакопеременные нагрузки, радиация, хемомеханические процессы и т.д.). Чувст-

вительность проявляется в постепенном повышении значения энергии активации с приростом в материале плотности упругих микроскажений кристаллической решетки (дефектов), которые неизбежно накапливаются в материале в процессе эксплуатации элементов машин и оборудования.

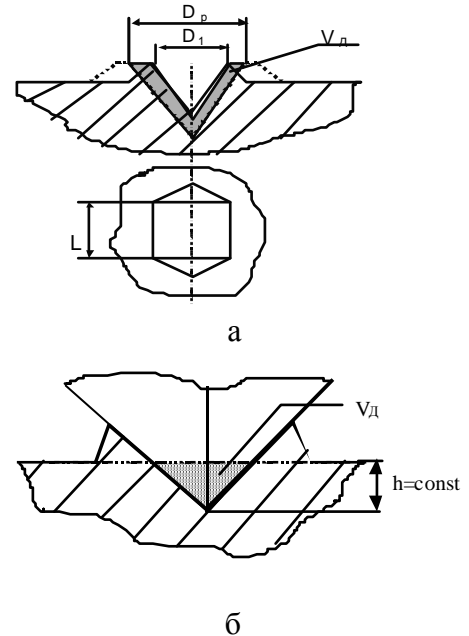


Рис. 1. Форма борозды: L - длина царапины, D_1, D_p - ширина борозды после 1 и P проходов индентора соответственно, V_d - активируемый объем материала поверхностного слоя (выделен темным цветом)

Для реализации первого способа оценки энергии активации был разработан программно-аппаратурный комплекс, показанный на рис. 2а.

Для реализации второго способа разработан и в настоящее время испытывается в ОАО «СПЗ» диагностический программно-аппаратурный модуль, изображенный на рис. 2 б.

В НТЦ «Надежность» СамГТУ совместно с ОАО «Волгабурмаш» была разработана еще одна конструкция переносного склерометра для контроля качества элементов машин и оборудования (рис.3). Склерометр позволяет деформировать исследуемый поверхностный слой на заданной глубине в режиме пластического пропахивания (без микрорезания).

Конструкция склерометра обеспечивает фиксированное заглабление индентора независимо от отклонений формы поверхности, что позволяет использовать прибор

без специальной подготовки поверхности. С целью максимального упрощения пользования прибором его кинематика позволяет за одно действие оператора (нажатие на кнопку прибора) производить: плавное опускание индентора на поверхность, его внедрение на заданную величину, пропахивание поверхностного слоя и возврат



а



б

Рис. 2. Лабораторный (а) и переносной (б) варианты программно-аппаратурного диагностического комплекса. Описание основных узлов:

1 – блок подготовки шлифа; 2 – блок деформирования материала поверхностного слоя; 3 – оптико-электронный измерительный блок; 4 – блок сбора данных и обработки информации

в исходное положение. Склерометр оснащен магнитной опорой, позволяющей производить базирование прибора на плоской, цилиндрической и конической поверхностях; тензометрическим датчиком сопротивления материала пропахиванию; микроконтроллерной системой сбора данных, выполняющей автоматизированную оценку энергии активации пластической деформации поверхностного слоя по определяемому значению сопротивления пластической деформации

и выполнять тарировку прибора. Получаемые экспериментальные значения отображаются на дисплее. Прибор имеет следующие характеристики: глубина царапины 2...10 мкм; длина борозды - 0,5 мм; скорость пропахивания - 0,2...0,5 мм/с, в качестве индентора используется алмазная пирамидка Виккерса с межгранным углом при вершине 136°; габариты склерометрического модуля - 50×50×120 мм; вес – 0,8 кг; длительность испытаний с учетом подготовки поверхности – 2...3 минуты.

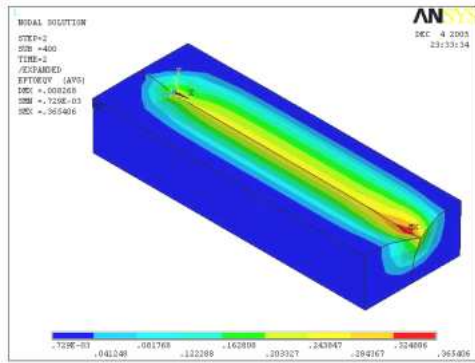
При лабораторной оценке микротвердости и активационных параметров разрушения конструкционных материалов (по первому методу) сначала при помощи шлифовального узла комплекса выполняется подготовка поверхности путем удаления тонкого дефектного слоя, не отражающего объективное состояние материала в объеме. Затем на подготовленную поверхность, алмазным индентором деформирующего узла наносят ряд наколов (рис. 4а) для оценки микротвердости по Виккерсу, а также подвергают склерометрированию (рис.4б). Изображения полученных отпечатков при помощи электронно-оптического узла передаются в персональный компьютер и сохраняются в базе данных. Далее полученные изображения обрабатываются при помощи программы ВМР (рис.4). Программа позволяет произвести оценку микротвердости по Виккерсу и рассчитать значение энергии активации пластической деформации U_0 . Все расчеты выполняются с одновременной статистической обработкой результатов по критерию Стьюдента при трех возможных уровнях доверительной вероятности 0,95; 0,9 и 0,99.

В настоящее время область применимости методики оценки энергии активации пластической деформации весьма обширна. Самыми важными приложениями склерометрических приборов и методик являются: прогнозирование долговечности узлов трения по критерию усталостного охрупчивания, создание ускоренных методов испытаний материалов, экспериментальное исследование кинетики повреждаемости и разрушения поверхностных слоев деталей пар трения, оценка пластифицирующего или охрупчивающего действия граничных

слоев смазочных материалов на поверхностные слои металлов и сплавов, оптимизация технологических методов обработки деталей пар трения, регламентирование механических свойств поверхностных слоев и др.



а



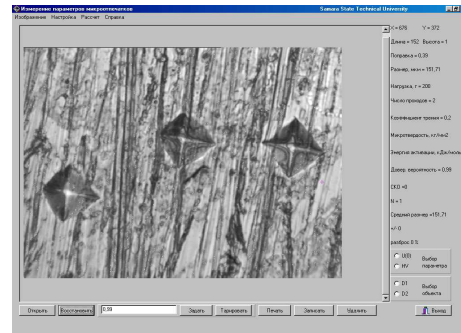
б

Рис. 3. Ручной склерометрический модуль (а) и поле деформаций (б) в области оттесненной борозды

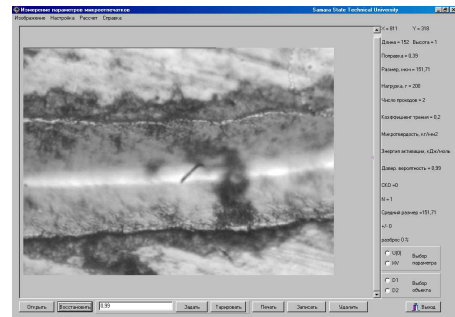
Для автоматизации прогнозирования выработанного и остаточного ресурса материалов поверхностных слоев деталей узлов трения, а также формирования базы данных была разработана программа Resource (см. рис. 4 в).

Программа позволяет накапливать экспериментальные данные по каждому объекту испытаний и при помощи экстраполяции методом наименьших квадратов прогнозировать достижение накопленной энергии повреждаемости критического порога усталостного охрупчивания материала. Одновременно просчитываются два вида аппроксимации – линейная и нелинейная (второго порядка), для каждой вычисляется среднее квадратическое отклонение результатов и для последующей оценки ресурсных характеристик выбирается аппроксимация с наименьшей погрешностью. Результат вы-

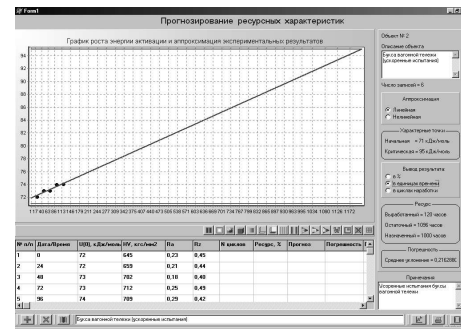
числений может быть представлен в процентах от наработки, в единицах времени или в циклах наработки.



а



б



в

Рис. 4. Иллюстрация программного обеспечения. а, б – применение программы VMP для автоматизированной оценки микротвердости и энергии активации пластической деформации, в – применение программы Resource для прогнозирования остаточного ресурса по результатам оценки накопления повреждаемости в конструкционных материалах

$$\delta = 100 \left(1 - \frac{u_0 - u_0^{исх}}{u_0^{кр} - u_0^{исх}} \right), \%$$

где u_0 – текущее значение энергии активации пластической деформации, $u_0^{исх}$ – исходное значение энергии активации, $u_0^{кр}$ – критическое значение энергии активации.

$t_{\delta} = (100 / [100 - \delta]) \cdot t_{эксп} - t_{эксп} = t_{рес} - t_{эксп}$, час
 , где $t_{эксп}$ – длительность эксплуатации исследуемого элемента, $t_{рес}$ – ожидаемый общий ресурс испытываемого элемента, включающий время его эксплуатации. Ве-

личина $[100 - \delta]$ характеризует текущую степень деградации материала (выработанный ресурс) в %.

Таким образом, используя склерометрические методы оценки накопления повреждаемости в поверхностных слоях испытанные детали пар трения можно свести к следующей последовательности операций. Вначале для каждого материала исследуемой пары трения создается база данных по исходным и критическим значениям энергии активации. Затем, при испытаниях или во время эксплуатации узла трения через определенные промежутки времени по росту энергии активации пластической деформации оценивают накопление повреждаемости материалов. Далее, на базе полученных экспериментальных данных осуществляют прогнозирование технического ресурса до наступления усталостного разрушения материала поверхностного слоя. На основе применения данной методики можно организовать систему управления сроком службы ответственных элементов машин, этим существенно повышая надежность их эксплуатации.

Время наработки t в условии разрушения материала поверхностного слоя (1) можно интерпретировать как псевдоразрушающий фактор, опосредованный термофлуктуационным механизмом повреждаемости поверхностного слоя. Если ввести коэффициент ускорения испытаний в виде $k_y = t_{p_3} / t_{pu}$, где t_{p_3} - время до разрушения при эксплуатационных режимах, t_{pu} - время до разрушения при ускоренных испытаниях. То из модели повреждаемости можно вывести условие для выбора режимов ускоренных испытаний в виде

$$\ln k_y RT_3 T_u - u_0 T_u - \gamma \sigma_3 T_u - u_0 T_3 + \gamma \sigma_u T_3 = 0,$$

где T_3 и T_u - абсолютные температуры при эксплуатации и ускоренных испытаниях соответственно, σ_3 и σ_u - эквивалентные напряжения при эксплуатации и ускоренных испытаниях соответственно, γ - структурно-чувствительный коэффициент. Из вышеприведенного выражения можно получить соотношения для выбора температуры и нагрузки для частных случаев, соответствующих различным способам форсирования испытаний:

- за счет температурного фактора

$$T_u = \frac{T_3 u_0 - \gamma \sigma T_3}{\ln k_y RT_3 - u_0 - \gamma \sigma}$$

- за счет механических напряжений

$$\sigma_u = \frac{2U_0 - R \ln k_y}{\gamma} + \sigma_3$$

Расчетные модели для оценки скорости изнашивания материалов зависят от того, какой из разрушающих факторов вносит больший вклад в достижение неустойчивости поверхностного слоя при достижении условия разрушения (1).

Рассмотрим два полярных случая. Первый соответствует усталостным формам изнашивания, при которых механические усилия в зоне фактического контакта не могут самостоятельно вызвать неустойчивость материала и рост повреждаемости происходит за счет совместного действия упругих напряжений и термических флуктуаций. Усталостное изнашивание происходит циклически, с характерными для выбранного режима трения длительностью цикла t_u и количеством разрушаемого материала I_u . При трении каждый локальный участок поверхностного слоя циклически контактирует с контрповерхностью. Эта длительность за один кинетический цикл изнашивания, с учетом вероятности фактического контакта, в среднем составляет $t_p A_r / A_n \approx t_p \sigma / HB$. При усталостном изнашивании формируются две области накопления повреждаемости: первая сосредоточена в тонком поверхностном слое - т.н. debris-слое; вторая - распространяется на значительно большую глубину и отвечает за кинетику развития контактной фрикционной усталости. Исходя из этого, скорость усталостного изнашивания можно оценить следующим образом:

$$\gamma_{yu} = \frac{I_u}{t_u} = \frac{I_u}{t_p \frac{HB}{\sigma}} = \frac{I_u \sigma}{HB \tau_0 \exp\left(\frac{u_0 - \sigma \gamma - \Delta g}{RT}\right)}$$

Данное выражение аналогично расчетной модели изнашивания Д.Г. Громаковского и показало удовлетворительное совпадение с результатами экспериментальных испытаний на усталостное изна-

шивание бронзовых, стальных и чугуновых образцов при возвратно-поступательном движении. Характерной особенностью этой и других кинетических расчетных зависимостей для оценки скорости изнашивания материалов является наличие в их структуре фактора Больцмана, который указывает на долю работы разрушения, совершенной энергией термических флуктуаций. Однако возможно представление γ_{yu} в ином виде

$$\gamma_{yu} = \frac{I_u \dot{i}_0}{u_{0кр} - u_{0н}}$$

Данное выражение учитывает циклический рост энергии активации пластической деформации поверхностного слоя от начального $u_{0н}$ до критического $u_{0кр}$ значения со скоростью \dot{i}_0 , зависящей от многих внешних и внутренних факторов, которые требуют в каждом конкретном случае эмпирической оценки. Полученные выражения справедливы и для изнашивания при контактной фрикционной усталости. При этом в них достаточно изменить значения I_u , \dot{i}_0 на величины, соответствующие области, подвергаемой данному виду усталости, а также вместо фактических давлений в зоне пятен касания σ_t необходимо взять контурные напряжения σ_e .

Второй случай соответствует абразивному изнашиванию, когда механические напряжения практически сразу вызывают пластическую неустойчивость поверхностного слоя, а скорость разрушения поверхностного слоя контролируется, в основном, не кинетикой термофлуктуационных процессов, а скоростью относительного перемещения деталей при трении. Для этого случая условие разрушения можно записать в виде $\sigma_u = u_0 - \Delta g$. Левая часть данного выражения имеет физический смысл удельной механической работы сил трения A_{mp} , необходимой для пластического отнесения с поверхности объема вещества V_{au} количеством в один моль, т.е. $\frac{A_{mp}}{V_{au}} = u_0 - \Delta g$. Умножив числитель и знаменатель дроби в левой части на dt данное выражение можно записать в виде

$$\frac{A_{mp}}{dt} \frac{dt}{V_{au}} = \frac{W_{mp}}{\gamma_{au}} = u_0 - \Delta g,$$

где W_{mp} - мощность трения, кДж/с; γ_{au} - скорость абразивного изнашивания, моль/с; $u_0 - \Delta g$ - отнесенная к молю энергия активации пластической деформации поверхностного слоя. Таким образом, для оценки скорости и интенсивности абразивного изнашивания, можно вывести следующие зависимости

$$\gamma_{au} = \frac{V_m W_{mp}}{u_0(T)} = \frac{V_m \mu P V_{ck}}{u_0(T)}, [\text{мм}^3/\text{с}]$$

$$J_{au} = \frac{1}{u_0(T)} = \frac{V_{au}}{A_{mp}} = \frac{V_{au}}{\mu PL}, [\text{мм}^3/\text{кДж}].$$

Первое выражение идентично зависимости для оценки скорости объемного изнашивания полученной В.В. Федоровым для абразивного изнашивания - шлифования.

В настоящее время сформировались следующие области применения нового программно-аппаратурного комплекса для оценки кинетических характеристик разрушения материалов методом склерометрии.

1. Оценка микротвердости, энергии активации пластической деформации, накопленной энергии повреждаемости и структурно-чувствительного коэффициента подшипниковых материалов.
2. Диагностика находящихся в эксплуатации машин и оборудования с целью оценки остаточного ресурса по критерию истощения пластичности при изнашивании и усталости.
3. Неразрушающий контроль качества и оптимизация технологических режимов при всех видах механических, химико-термических и термических обработок поверхностей деталей подшипников.
4. Выбор конструктивных и смазочных материалов для подшипников качения.

Список литературы

1. Патент РФ №2166745. Способ оценки энергии активации разрушения поверхностных слоев, деформированных трением //Громаковский Д.Г. и др.
2. Ибатуллин И.Д. Применение энергетического критерия прочности при анализе

кинетики усталостного разрушения поверхностных слоев //«Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин»: Межвуз. сб. науч. тр./Под ред. Н.Б. Демкина, Тверь: ТГТУ, 2006.-с.152-159.

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

4. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. – 383 с.

5. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Ташкент: Изд. ФАН, Уз. ССР, 1979. – 168 с.

6. Громаковский Д.Г., Ибатуллин И.Д., Прилуцкий В.А., Дынников А.В., Овчинников И.Н., Бакиров М.Б. Новый способ оценки пластичности конструктивных материалов и прогнозирование ресурсных характеристик деталей машин и конструкций // Тяжелое машиностроение, №10, М.: Машиностроение, 2004. – с. 13-17.

DEVELOPMENT OF TECHNIQUES AND MEANS OF ESTIMATING THE ACTIVATION PARAMETERS OF DESTRUCTION OF SURFACE LAYERS BY SCRATCHING METHOD

© 2006 I.D. Ibatullin, D.G. Gromakovsky, V.E. Barynkin

Samara State Technical University

In the article results of development of methods and apparatus for estimating the activation parameters of destruction of surface layers are described. Techniques are based on activating the plastic instability of a surface layer by the scratching method. The received results can be used for an experimental estimation of parameters of kinetic model for calculation of speed of fatigue wearing.