

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА АКТИВАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2011 Д.Г. Громаковский, А.Г. Ковшов, М.В.Карпухин, С.В. Шигин

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 10.11.2011

Приведены результаты экспериментальной оценки удельной энергии деформации поверхностей ряда конструкционных материалов методом склерометрии при различных видах механической обработки и изнашивании. Показана возможность оптимизации видов обработки по критерию минимизации накопленной энергии деформации. Ключевые слова: образец, материал, обработка, трение, износ, структура, деформация, повреждаемость, метод, склерометрия.

Введение

В статье рассматривается отражение процессов термомеханического разрушения поверхностей трения [1,2,3] в физических и расчетных моделях изнашивания. Разрушение материалов протекает при термоактивируемом процессе атомно-молекулярных перегруппировок, вызываемых деформацией, флуктуациями тепловой энергии в поле действующих напряжений.

Энергия активации деформации (разрушения) в моделях представляется экспоненциальной функцией, предложенной С.Н. Журковым [4], характеризующей долговечность твердого тела под нагрузкой

$$t = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (1)$$

где: t – время до разрушения образца, с;

$\tau_0 = 10^{-12} \dots 10^{-13}$ с. - период колебаний атомов твердого тела; $U_0 = U(\sigma, T)$ – энергия межатомной связи, Дж; σ - действующее напряжение, Н/м²; γ – структурный параметр; T - термодинамическая температура, °К; $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/°К - постоянная Больцмана.

Энергия активации в выражении (1)

$$U_{a, \text{деф}} = U_0 - \gamma\sigma, \quad (2)$$

т.е. $U_{a, \text{деф}} = U(\sigma, T, \gamma)$ - является функцией напряжения σ , температуры T и структурного состояния деформированного материала – γ , характеризуемого параметрами накопленных повреждений $\sum q_i$, или $U_{a, \text{деф}} = U(\sigma, T, q_i)$.

Экспериментальные исследования температурно-временной зависимости микропроцессов разрушения, усталости и ползучести твердых тел различной природы [5] позволили установить характер зависимости энергии активации деформации от напряжений и температуры, оценить значения параметров U_0 и τ_0 материалов. Однако связи параметра γ с структурным состоянием изучены недостаточно.

Методика экспериментальной оценки деформационных характеристик поверхностей

Энергия активации деформации $U_{a, \text{деф}} = U_0$ определяется при $\sigma = 0$, а $U_{a, \text{деф}} = 0$ - при максимальных действующих напряжениях, входящих в уравнение (1)

$$\sigma = \frac{1}{\gamma} \left(U_0 - kT \ln \frac{t}{\tau_0} \right). \quad (3)$$

С ростом температуры напряжение σ снижается, а при $T = 0^\circ\text{К}$ максимальное напряжение принимает значение

$$\sigma_{\text{max}} = U_0 / \gamma, \text{ а } \gamma = U_0 / \sigma_{\text{max}}. \quad (4)$$

Оптимальные условия для экспериментальной оценки U_0 , обеспечивающие пренебрежимо малый рост температуры при максимальном напряжении в материале $\sigma_{\text{max}} \approx H_\mu$, где H_μ – микротвердость, реализуются в процессе склерометрирования (царапания) поверхностей индентором Виккерса, тогда

$$\gamma = U_0 / H_\mu. \quad (5)$$

В проведенном исследовании методом склерометрии [6] оценивали удельную энергию деформации $U_{\text{деф}}$ [Дж/мм³] поверхностных слоев образцов (рис.1) из распространенных конструкционных материалов при различных видах и режимах механической и термической обработки, а также её изменение (накопленные значения) в процессе длительной наработки на износ.

Громаковский Дмитрий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, директор НТЦ «Надёжность»,
E-mail: pntms3@mail.ru;

Ковшов Анатолий Гаврилович, кандидат технических наук, доцент каф. «Нанотехнологии в машиностроении»,
Карпухин Михаил Васильевич, аспирант,

Шигин Сергей Владимирович, вед. инженер НТЦ «Надёжность»

Склерометрическую оценку повреждаемости проводили на образцах из следующих материалов: Сталь 40Х по ГОСТ 2590-88, Сталь 30ХГСА по ГОСТ 2590-88, Сталь 45 по ГОСТ1050-88, Титановый сплав ВТ9 по ГОСТ 19807-74, Бронза БрБ2 по ГОСТ 1789—70 с серебряным покрытием толщиной 30мкм и с нанесенным регулярным (ромбическим) рельефом по серебряному покрытию, Бронза БрАЖ 9-4 по ГОСТ 18175-78. Каждая группа однотипных образцов изготавливалась из круглого проката одной партии.

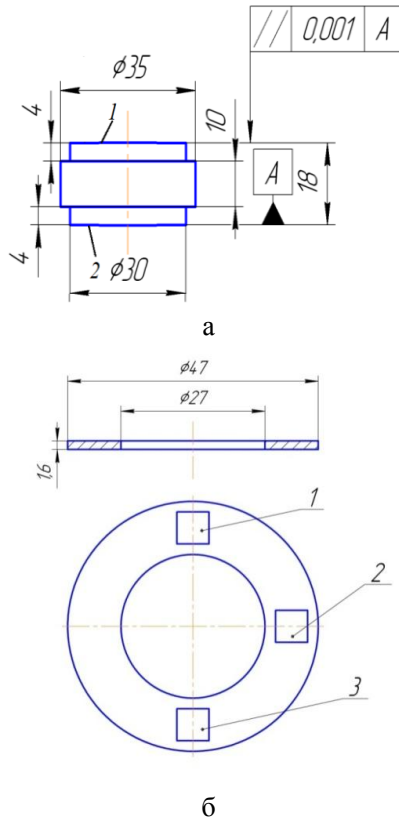


Рис.1. Образцы для испытаний: а- цилиндрической формы; б- плоские образцы из бронзы БрБ-2, 1,2,3- места измерения накопленной повреждаемости.

Перед склерометрированием образцы испытывали (см. рис.1б)на износ и фиксировали получаемые характеристики с учетом времени наработки. Дополнительно измеряли шероховатость испытываемых поверхностей (профилометр-профилограф ВИ-201 завода «Калибр») и микротвердость по ГОСТ 9450 микротвердомером ПМТ-3.

Процедура испытаний на склерометре включала внедрение алмазного индентора Виккерса в исследуемую поверхность на заданную глубину h , контролируемую на мониторе компьютера; фиксацию индентора на этой глубине; образование царапины на поверхности путем перемещения столика склерометра с закрепленным образцом на величину перемещения L ; измерение длины царапины L , с помощью индикатора часового типа, и деформирующего тангенциального усилия F_t при фиксированной

температуре T . Датчик для измерения F_t располагали на штоке индентора.

Удельную энергию пластической деформации $U_{деф}$ рассчитывали по формуле

$$U_{уд} = A_{деф} / V_{деф}, \text{ Дж/мм}^3, \quad (6)$$

где $A_{деф} = F_t \cdot L$, работа деформации, Дж; $V_{деф} = S \cdot L$ - объем деформированного материала, мм^3 , $S = 0,07D^2$ - площадь, мм^2 , поперечного (треугольного сечения) борозды, образованной четырехгранной пирамидой Виккерса с углом между ребрами $\alpha = 148^\circ$ при глубине внедрения $h = 0,14D$, D - среднее значение диагонали отпечатка, мм.

Для обеспечения статистической достоверности при каждом испытании наносили порядка 15 царапин. С учетом геометрии алмазного индентора энергию активации деформации $U_{адеф}$ можно оценить из выражения

$$U_{адеф} = \frac{A_{деф}}{V_{деф}} \cdot V_m \approx \frac{0,28 \cdot F_t}{h^2} V_m, \text{ Дж/моль} \quad (7)$$

где V_m – молярный объем, $\text{мм}^3/\text{моль}$.

Результаты экспериментальной оценки деформационных характеристик

Результаты оценки удельной энергии деформации поверхностей $U_{деф}$ при различных видах механической обработки разнородных материалов приведены на рис. 2,3,4. Склерометрирование проводилось при глубине внедрения индентора $h = 3$ мкм.



Рис.2. Повреждаемость поверхностей $U_{деф}$ стали 40Х при различных видах обработки: 1 - притирка; 2-шлифование тонкое; 3-точение.

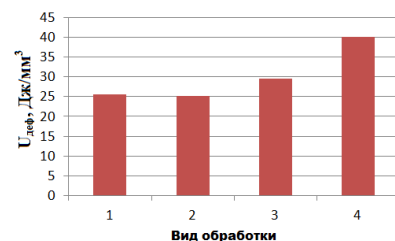


Рис.3. Повреждаемость поверхностей при различных видах обработки титанового сплава ВТ-9: 1-притирка после шлифования, 2 - притирка после точения, 3-шлифование тонкое,4- шлиф-ование грубое.

Установленные изменения удельной энергии деформации в зависимости от природы материала и вида обработки для стали 40Х от 14,9 до 19 Дж/мм^3 , титанового сплава ВТ9 в пределах 25...40 Дж/мм^3 , бронзы БрАЖ9-4 при шлифовании и при-

тирке отличаются незначительно на уровне примерно 21,4-21,5 Дж/мм³.

Влияние вида термообработки стали 45 на величину энергии деформации иллюстрируется рис.5.

Режимы термообработки – нагрев образцов до температуры 850 °С, выдержка при этой температуре 0,5 часа, затем по номерам образцов: 1 – отжиг-охлаждение с печью; 2 – нормализация-охлаждение на воздухе; 3 – улучшение-закалка в воде, отпуск с температуры 300 °С при охлаждении с печью; 4 – закалка-охлаждение в воде с температуры 850 °С.

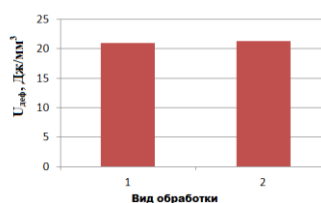


Рис.4. Повреждаемость поверхностей U_{деф} бронзы БрАЖ9-4 при: 1-притирке после шлифования, 2- тонком шлифовании.

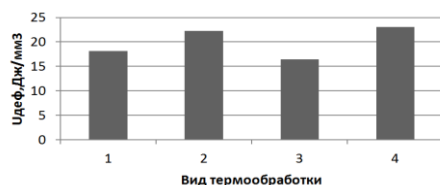


Рис.5. Влияние видов термообработки стали 45 на U_{деф}: 1 - отжиг, 2 - нормализация, 3 - улучшение; 4-закалка, притирка на плите с пастой (Ra=0,2 мкм).

Для деталей, к которым предъявляются высокие требования по точности, надёжности и производительности, производится оптимизация режимов обработки по параметрам повреждаемости. Результаты выбора оптимального режима шлифования конструкционной стали 30ХГСА приведены на рис. 6 и в табл.

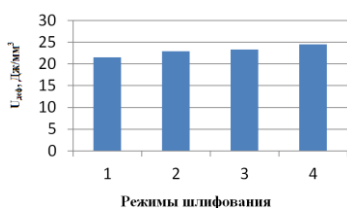


Рис.6. Зависимость удельной энергии деформации U_{деф} от режимов шлифования образцов из стали 30ХГСА.

Таблица. Режимы шлифования

№ режима	Скорость круга, м/с	Подача стола, м/мин	Подача суппорта, мм/ход	Шероховатость Ra, мкм	Величина удаляемого припуска, мм	Марка Шлифовального круга
1	40	15	2	0,27	0,03	24A16СМК
2	35	20	3	0,706	0,15	24A25СМК
3	40	25	10	0,397	0,1	24A16СМ1В
4	30	8	3	0,526	0,15	24A16СМ1В

Минимизация уровня энергии деформации при обработке обеспечивает запас пластичности материала, увеличивает период накопления повреждений до наступления предельного состояния материала деталей пар трения. При испытаниях на износ образцов из бронзы БрБ-2 с различными указанными выше методами обработки поверхностей получена дополнительная информация приведенная на рис.7.

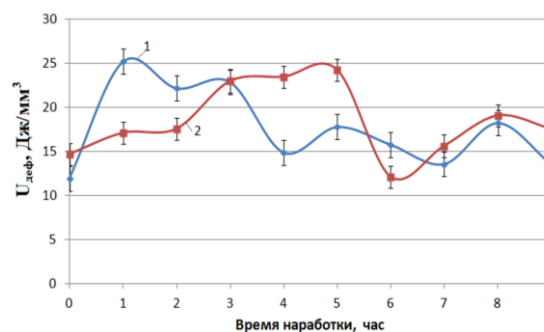


Рис. 7. Изменение величины удельной энергии деформации поверхности от времени наработки при трении: 1- бронза БрБ2 с серебряным покрытием 30 мкм, контрообразец - сталь долотная 17НЗМА, частота вращения шпинделя 200 мин⁻¹, смазка JBL-713, нормальная нагрузка 2МПа; 2 - бронза БрБ2 с серебряным покрытием 30 мкм и регулярным рельефом, контрообразец сталь долотная 17НЗМА, частота вращения шпинделя 200 мин⁻¹, смазка JBL-713, нормальная нагрузка 2 МПа.

Выводы

Предложенная методика и комплекс для выполнения склерометрических испытаний позволяют проводить оценку значений деформационных характеристик: удельной энергии деформации - U_{деф}, характеризующей энергозатраты на единицу объема материала, как аналога пластичности; накопленной энергии повреждений, характеризующей изменение пластичности - U_{деф} при обработке и изнашивании при трении. Отмечены циклические изменения величины удельной энергии деформации по времени изнашивания в диапазоне 10...27 Дж/мм³, характеризующие кинетику взаимосвязанных процессов накопления повреждений при износе поверхностей, деформируемых трением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громаковский Д.Г. Система понятий и структура моделей изнашивания. //Трение и износ. Том 18.№ 1, №5. – М.: Машиностроение, 1997. - С.18-24.
2. Ковшов А.Г. Расчетная модель изнашивания поверхностей трения. Сб. тру дов МНТК «Актуальные проблемы трибологии» - М.: Машиностроение, 2007. - С.216-220.
3. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. Монография. - Самара: СамГТУ, 2008. – 387 с..
4. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности.//Физика твердого тела. 1980. - Т. 22, - вып.11, - С. 3344-3349.
5. Регель В.Р., Слуцкер А.Б., Томашевский В.Д. Кинетическая теория прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. - 302 с.
6. Патент №216645 РФ. Способ оценки энергии активации разрушения материала поверхностного слоя деформированного трением /Громаковский Д.Г., Беленьких Е.В., Ибатуллин И.Д., Ковшов А.Г. и др.; опубл. 10.05.2001.

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF ACTIVATION PARAMETERS OF DAMAGEABILITY AND DESTRUCTION OF DEFORMABLE SURFACES

© 2011 D.G. Gromakovsky, A.G. Kovshov, M.V. Karpuhin, S.V. Shigin

Samara State Technical University

Results of an experimental estimation of specific energy of deformation of surfaces of some constructional materials by a method sclerometry are resulted at various kinds of machining and wear process. Possibility of optimization of kinds of processing by criterion of minimization of the saved up energy of deformation is shown.

Key words: the sample, material, processing, friction, wear, structure, deformation, damageability, method, sclerometry

Gromakovsky Dmitry Grigorievich., doctor of engineering sciences, professor, дупеткор НТЦ "Reliability", E - mail: pnms3@mail.ru;
Kovshov Anatoliy Gavrilovich., candidate of engineering sciences, associate professor of каф. "Nanotechnologies are in an engineer";
Карпухин Mikhail Vasilievich, graduate student;
Шугин Sergey Vladimirovich, vedas. an engineer НТЦ is "Reliability".