

УДК 621.9.02

С.А. Клименко, д.т.н., проф.

А.С. Манохин, к.т.н.

*Институт сверхтвёрдых материалов
им. В.Н. Бакуля НАН Украины*

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЯ, ОБРАБОТАННОГО АЛМАЗНЫМ МИКРОТОЧЕНИЕМ

Представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя изделия из алюминиевого сплава АМГ6, обработанного алмазным микроточением, по статистическим термодинамическим параметрам. Теоретически и экспериментально показана возможность применения для исследования возможностей процесса микроточения метода склерометрирования алмазным индентором.

Введение. В соответствии с современными представлениями, рабочие поверхности изделий рассматриваются как открытая термодинамическая система, которая обменивается с внешней средой веществом, энергией и энтропией. Возникновение на них микроповреждаемостей связано с формированием в локальном объеме материала критической плотности внутренней энергии, накопленной при предельной деформации. Указанный критерий эквивалентен условию перехода термодинамической системы через точку бифуркации после преодоления активационного барьера, которым обладает материал поверхности изделия после накопления в процессе эксплуатации критического значения энтропии.

Время достижения критического значения энтропии зависит от состояния материала поверхности изделия [1]:

$$[H] = H_o + \int_0^{\tau} H(t) dt, \quad (1)$$

где $[H]$ – критическое значение энтропии; H_o – величина энтропии в материале поверхности изделия, обусловленная ее наследственностью; $H(t)$ – функция, описывающая производство энтропии в процессе функционирования поверхности; τ – время до достижения энтропией критического значения; t – текущее время.

Таким образом, для оценки состояния рабочей поверхности изделия необходимо располагать значениями трех статистических

термодинамических параметров ее материала – величиной активационного барьера, способностью к производству энтропии при приложении дозированного воздействия и величиной исходной энтропии.

Прямое измерение указанных величин позволило бы прогнозировать эксплуатационные свойства обработанных поверхностей. Однако численно могут быть оценены первые два параметра, так как энтропия является функцией состояния системы и оценено может быть только ее изменение. Поэтому может быть выполнено ранжирование материалов только относительно эталона.

Изложение основного материала. Теоретическая часть. Для экспериментальной оценки величины активационного барьера материала поверхностного слоя изделия и способности материала к производству энтропии перспективным является применение метода сканометрирования, при котором исследуемая поверхность сканируется нагруженным сферическим индентором радиусом R . Выбором нормальной нагрузки P на индентор размер деформируемой области исследуемого образца может быть приближен к подвергаемому деформации в процессе эксплуатации.

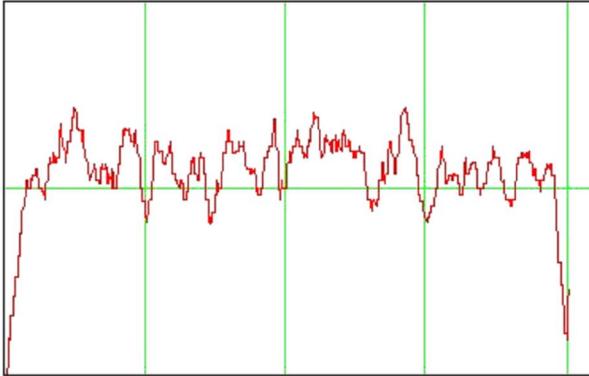
Фиксируемая сканограмма может представлять собой изменение тангенциальной силы сопротивления контактному взаимодействию с индентором либо изменение глубины внедрения индентора в исследуемый поверхностный слой вдоль трассы сканирования (рис. 1, *a*).

Сканограмма тангенциального усилия F на инденторе состоит из участков, знак производной на которых характеризует две стадии деформирования материала образца: на участках с положительной производной ($0a$, bc , ...) имеет место стадия упругого деформирования материала и системы крепления индентора, на которой она запасает упругую энергию, а на участках с отрицательной производной (ab , cd , ...) протекает стадия разгрузки индентора и преимущественного пластического деформирования материала (рис. 1, *б*).

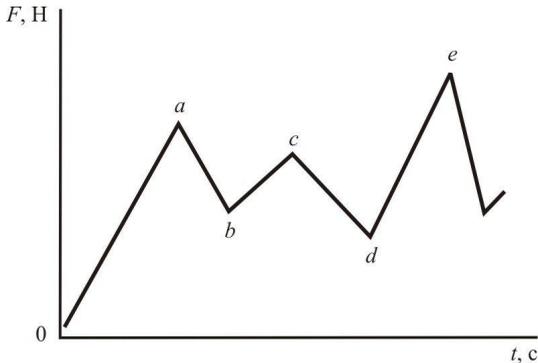
Точки пиковых нагрузок на индентор (a , c , e , ...) характеризуют уровень активационного барьера материала образца, т. к. именно при этих значениях усилия начинается его пластическое деформирование и накопление энтропии. Функция диссипации, описывающая производство энтропии при пластическом деформировании материала, имеет вид [2]:

$$dH/dt = F(t)v(t)/T(t), \quad (2)$$

где F – тангенциальное усилие на инденторе; $v(t)$ – скорость перемещения индентора относительно поверхности образца; T – температура.



а)



б)

Рис. 1. Сканограмма (а), полученная при склерометрировании поверхности образца из алюминиевого сплава АМГ6 при нагрузке 0,50 Н, и схема сканограммы (б)

Процесс сканирования проводится с малой скоростью, поэтому $T(t) = \text{const}$, так как размеры поверхности образца велики по сравнению с деформируемым объемом, обеспечивая термостабилизацию трассы сканирования.

При регистрации усилия на инденторе датчиками с линейной зависимостью между усилием и перемещением

$$F(t) = kl(t), \tag{3}$$

$$v(t) = dl(t)/dt + v_o, \tag{4}$$

где $l(t)$ – отклонение индентора в процессе сканирования от его среднего положения; v_0 – линейная скорость перемещения образца, задаваемая системой привода; k – постоянная. Так как скорость колебаний индентора существенно выше скорости перемещения образца вдоль трассы сканирования, то значением v_0 можно пренебречь.

Подставив (3) и (4) в (1), с учетом (2), получим:

$$dH = \frac{k}{T} l(t) dl(t),$$

откуда

$$\Delta H = \frac{k}{T} \sum_{i=0}^{N-1} l_i \Delta l_i,$$

где N – количество вершин сканограммы на длине трассы сканирования; $l_i, \Delta l_i$ – смещение и изменение смещения индентора в i -той точке сканограммы.

Так как $\Delta l_i = l_i - l_{i-1}$, $l_i = \mu + x_i$, где μ – математическое ожидание отклонения индентора от положения, заданного конструкцией склерометра, то с учетом

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{N-1} \mu x_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{N-1} \mu x_{i-1}$$

при достижении больших N и выборе расстояния между отсчетами равным периоду корреляции поверхности, получим

$$\Delta H = \frac{k}{T} \sum_{i=1}^{N-1} x_i^2,$$

так как x_i – центрированная случайная величина, то

$$\sum_{i=1}^{N-1} x_i^2 = ND,$$

где D – дисперсия случайной величины x .

Таким образом, величина энтропии ΔH , производимой в материале образца при его сканировании, пропорциональна дисперсии D отклонения индентора:

$$\Delta H = \frac{k}{T} ND.$$

Активационный барьер определяется как точка, являющаяся вершиной сканограммы (рис. 1), абсолютная величина барьера A_i рассчитывается как

$$A_i = A_j K_j,$$

где A_j – координата сканограммы, мм; K_j – чувствительность прибора, Н/мм.

Средние величины $A_{cp.}$ и D на длине трассы сканирования определяются выражениями [3]:

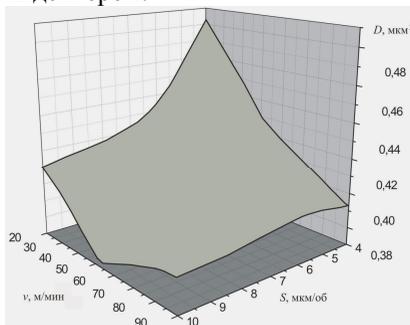
$$A_{cp.} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{N},$$

$$D = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (A_i - A_{cp.})^2.$$

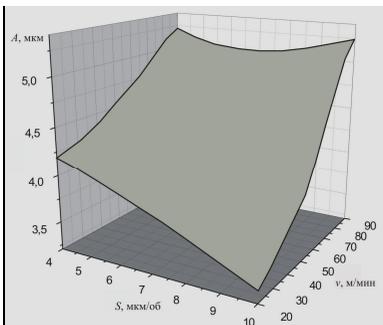
Экспериментальная часть. На рисунке 2, с использованием представленного подхода приведены результаты анализа напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя торцов образцов из алюминиевого сплава АМГ, обработанных алмазным микроточением. Для оценки влияния скорости резания исследования проводились на участках образцов с радиусами 7, 17, 27 мм. Для всех экспериментов глубина резания составляла 3 мкм.

При склерометрировании фиксировалась глубина внедрения индентора в исследуемую поверхность при нагрузке на индентор 0,5 Н. Рассматривались сканограммы изменения глубины внедрения индентора в исследуемую поверхность. Меньшая глубина внедрения индентора соответствует фрагментам поверхностного слоя с более высокими механическими характеристиками.

Как видно из полученных зависимостей, увеличение скорости резания и подачи при микроточении обуславливает снижение дисперсии глубины внедрения индентора D в исследуемый поверхностный слой (т. е. дисперсии силы взаимодействия индентора с поверхностным слоем изделия), а следовательно, и величины энтропии, производимой в материале при его нагружении алмазным индентором.



а)



б)

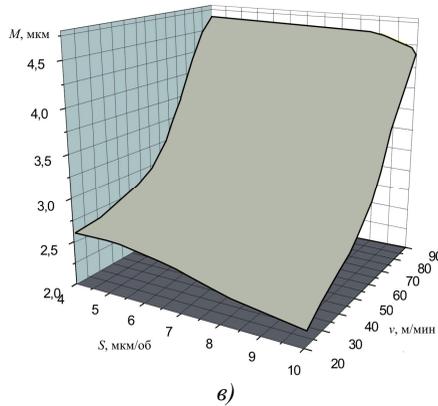


Рис. 2. Параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя образца из сплава АМГ 6, обработанного алмазным микроточением: а – дисперсия глубины внедрения индентора; б – величина активационного барьера; в – математическое ожидание внедрения индентора

С ростом скорости резания глубина внедрения индентора в исследуемый поверхностный слой увеличивается, что свидетельствует об уменьшении величины активационного барьера A материала поверхностного слоя, связанном со снижением уровня напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя в результате обработки.

Увеличение подачи обуславливает возрастание величины активационного барьера A материала поверхностного слоя за счет его упрочнения. Полученные результаты соответствуют данным теоретической оценки упрочнения поверхностного слоя изделия при алмазном микроточении [4].

Для сравнения на рисунке 3, в показано влияние условий обработки на величину математического ожидания изменения глубины внедрения индентора M при сканировании поверхностного слоя. Полученные результаты качественно соответствуют данным для величины активационного барьера A материала поверхностного слоя. Величина внедрения M характеризует силу контактного взаимодействия индентора с исследуемым поверхностным слоем и, соответственно, уровень его напряженно-деформированного состояния. В рассматриваемом случае она снижается с уменьшением скорости резания и ростом подачи, что говорит об упрочнении поверхностного слоя изделия.

Вывод. Полученные результаты свидетельствуют о том, что режимы алмазного микроточения оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя изделий. Торцовые поверхности, обработанные алмазным микроточением, характеризуются нестабильным напряженно-деформированным состоянием, что связано с изменением скорости резания в зависимости от радиуса обрабатываемой поверхности. Для обеспечения стабильного качества изделий микроточением обработку торцевых поверхностей целесообразно производить с постоянной скоростью резания.

Как показывают результаты исследований, оценка статистических термодинамических параметров поверхностного слоя с использованием данных его сканирования алмазным индентором является эффективным способом анализа влияния режимов обработки на состояние поверхностного слоя изделия и выбора режимов резания при микроточении.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Переверзев Е.С.* О термодинамическом подходе к задачам долговечности / *Е.С. Переверзев* // Прочность и надежность сложных систем. – К. : Наук. думка, 1979. – С. 85–88.
2. *Волькенштейн М.В.* Энтропия и информация / *М.В. Волькенштейн*. – М. : Наука, 1986. – 192 с.
3. *Lyashko V.A.* Comparative durability of materials in wear / *V.A. Lyashko, M.M. Potemkin, S.A. Klimenko* // *Wear*. – 1998. – Vol. 216. – P. 239–243.
4. *Клименко С.А.* Аналитическое исследование глубины упрочненного поверхностного слоя изделия из алюминиевого сплава при микроточении / *С.А. Клименко, А.С. Манохин* // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Житомир : ЖДТУ, 2009. – Вип. 7. – С. 56–63.

КЛИМЕНКО Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- обработка материалов резанием;
- режущие инструменты;
- технологическое управление качеством обработанной поверхности.

МАНОХИН Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- обработка материалов резанием;
- режущие инструменты.

Подано 17.08.2010