



Рис. 1. Нанорельефы, нормированные на глубину максимального отпечатка

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Щукин Е.Д., Михалске Т.А. и др. Микросклерометрия в изучении влияния среды на механические свойства металлов // Физика и химия обработки материалов. 1998. № 3. С. 99–104.
2. Jardret V., Zahouani H., Loubet J.L., Mathia T.G. Understanding and quantification of elastic and plastic deformation during a scratch test. Wear 218. 1998. P. 8–14.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-02-00906).

Поступила в редакцию 18 ноября 2008 г.

Tyurin A.I., Unak M.A. Microrelief of monocrystal LiF in micro-sclerometric researches. In work questions of information of the microrelief monocrystal LiF are considered at micro-sclerometric researches.

Key words: microrelief, monocrystal, micro-sclerometry, deformation, speed dependence, part of the material, scratching.

#### LITERATURE

1. Shchukin E.D., Mikhalske T.A. et al. Microsclerometry in studying the influence of the environment on mechanical properties of metals. Physics and chemistry of material treatment. 1998. № 3. P. 99–104.
2. Jardret V., Zahouani H., Loubet J.L., Mathia T.G. Understanding and quantification of elastic and plastic deformation during a scratch test. Wear 218. 1998. P. 8–14.

УДК620.162

## СВЕРХПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ В СУБМИКРООБЪЕМЕ ПРИ НАНОКОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

© А.И. Тюрин, В.В. Хлебников, В.В. Шиндяпин, А.П. Занина

Ключевые слова: скорость относительной деформации, сверхпластичность, деформация, субмикроробъем, наноконтакт, активационный объем, скоростная чувствительность.

В работе рассматривается сверхпластическая деформация в субмикроробеме при наноконтактном взаимодействии.

Хорошо известно, что с уменьшением области деформирования материалов до десятков – сотен нанометров все их свойства могут сильно измениться. Смоделировать поведение материала в таких условиях

можно методом динамического наноиндентирования сосредоточенной нагрузкой, создавая различные условия взаимодействия путем варьирования формы, амплитуды и характерных времен импульса нагрузки.

Исследования процесса формирования зоны пластической деформации в микро- и нанобъеме с высоким пространственным и временным разрешением, особенно на начальной стадии, могут дать качественно новое понимание механизмов деформирования при действии высоких локальных напряжений.

Поэтому целью данной работы является исследование скорости относительной деформации –  $\dot{\varepsilon}$ , размера зоны деформирования и температуры –  $T$  на кинетику деформирования, величину динамической твердости –  $H_d$ , коэффициент скоростной чувствительности нано- и микротвердости –  $m$  и микромеханизмы массопереноса при наноконтактной деформации полимеров (ПММА) и ионных кристаллов (LiF, ZnS).

Идентификация материала осуществляли на динамическом наноиндентометре собственной конструкции алмазной пирамидой Берковича, под действием треугольных симметричных импульсов силы с варьируемой амплитудой и длительностью нагрузки.

В широком интервале скоростей относительной деформации  $\dot{\varepsilon}$  (от  $3 \cdot 10^{-3}$  до  $10^2 \text{ c}^{-1}$ ), перекрывающем около пяти порядков величины, исследована зависимость кинетики формирования пластического отпечатка, а также определены величины –  $H_d$ , и  $m$  от размеров зоны деформирования, скорости относительной деформации, температуры и прочностных свойств материала (отношения статической твердости к модулю Юнга исследуемого материала). Проведенный термоактивационный анализ позволил установить мгновенные значения ряда активационных параметров (величину активационного объема  $\gamma$ ) процессов пластической деформации в субмикробъеме.

Показано, что в диапазоне глубин пластической деформации  $h_c$  от 30 нм до 1 мкм и температур от 25 до 125 °С в достаточно широком интервале  $h_c$  величина  $m$  остается практически постоянной во всем интервале исследованных температур как для ПММА, так и для кристаллов LiF и ZnS, а затем начинает расти с уменьшением  $h_c$ . Так, например, для ПММА при  $T = 25 \text{ °C}$  в диапазоне  $h_c$  от 1000 до 400 нм величина  $m = 0,09$ , а при дальнейшем уменьшении  $h_c$  до 30 нм  $m$  возрастает до 0,15–0,2. Увеличение температуры показало, что величина  $m$  остается постоянной в интервале температур от 25 °С до 86 °С ( $m = 0,09$ ), а при увеличении  $T$  от 86 °С до 125 °С начинает расти, достигая значения 0,38

(при  $T = 125 \text{ °C}$ ). Высокие значения величины  $m$  при малых  $h_c$  (порядка нескольких десятков нм) и высоких  $T$  ( $T > 100 \text{ °C}$ ) свидетельствует о переходе ПММА в этих условиях в сверхпластичное состояние.

В ионных кристаллах (LiF, ZnS) коэффициент скоростной чувствительности нанотвердости  $m$  оставался практически неизменным в широком интервале размеров зоны пластической деформации, и только при переходе в область малых глубин начал расти, достигая значений  $m = 0,2–0,25$ , при  $h_c = 20 \text{ нм}$ , что может свидетельствовать о состоянии материала близком к сверхпластичному.

Учитывая полученные значения величины активационного объема, можно предположить, что локальная наноконтактная деформация ПММА, при комнатной температуре на первом этапе ( $h_c \leq 300 \text{ нм}$ ), может происходить преимущественно за счет движения отдельных боковых групп макромолекулы, а затем – на II этапе ( $h_c > 300 \text{ нм}$ ) доминирующую роль в пластической деформации начинают играть хребтовые звенья макромолекулы. При увеличении  $T$  (от 25 до 125 °С) и  $h_c$  (до 1 мкм) величина активационного объема возрастает до значений сопоставимых с объемом отдельных макромолекул ПММА. В LiF и ZnS пластическая деформация на I этапе происходила за счет движения краудионов и малоатомных кластеров, сменяющейся на II этапе дислокационной пластичностью.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить номенклатуру структурных дефектов и кинетику доминирующих микромеханизмов пластичности при действии высоких локальных напряжений в зависимости от размера зоны деформирования, скорости относительной деформации и температуры, а также выявить явление сверхпластичности в субмикробъеме.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-02-00906).

Поступила в редакцию 17 ноября 2008 г.

Tyurin A.I., Hlebnikov V.V., Shindyapin V.V., Zanina A.P. Superplastic deformation in submicroeme at nano-contact interaction. In the paper, superplastic deformation in submicrovolumе at nano-contact interaction is considered.

Key words: speed of relative deformation, superplasticity, deformation, sub-micro-volume, nano-contact, activation volume, speed sensitivity.