

В настоящей работе ставилась цель определения влияния масштабного фактора (при глубине отпечатка от 30 нм до 1 мкм) на коэффициент скоростной чувствительности твердости  $H$  керамики (керамика на основе  $ZrO_2$ ) в диапазоне  $\dot{\epsilon}$  от  $3 \cdot 10^{-3}$  до  $10^2 \text{ c}^{-1}$ , перекрывающем около пяти порядков величины.

С этой целью на специально разработанном компьютеризированном наноиндентометре осуществляли индентирование поверхности образца алмазной пирамидкой Берковича под действием треугольного импульса силы с варьируемой амплитудой  $P_{\max}$  (от 0,4 мН до 200 мН) и длительностью  $\tau_{\phi}$  (от  $10^{-2}$  с до  $10^2$  с) фронта импульса нагружения.

Исследование коэффициента скоростной чувствительности  $\alpha$  в зависимости от  $h_c$  показывает, что в достаточно широком интервале значений  $h_c$  наклон зависимости  $\log(H_d/H_{st}) = f(\dot{\epsilon})$  остается практически неизменным, и только при переходе в область малых глубин (менее 100 нм) начинает расти с уменьшением  $h_c$ .

Появление наклонных участков (возрастание  $H$  с увеличением  $h_c$ ) на зависимости  $H = f(h_c)$  может означать, наряду с изменением свойств материала в поверхностном слое, изменение геометрических условий, необходимых для начала (проявления) того или иного доминирующего механизма релаксации напряжений.

Причем очевидно, что эти условия будут различными для различных материалов (имеющих различную величину вектора Бюргера –  $b$ ) и скоростей нагружения (из-за необходимости достижения некоторой критической глубины за время, когда величина  $\dot{\epsilon}$  падает до некоторого критического значения).

Из этого обстоятельства (в совокупности с размерами деформированной зоны) можно извлечь информацию о смене основных носителей или механизмов пластической деформации. Изменение наклона зависимости  $H_d(\dot{\epsilon})$  и  $H_d(h_c)$ , по-видимому, соответствует переходу от одного преимущественного механизма

релаксации напряжений к другому. Отсутствие скоростной зависимости  $H_d$  в некотором интервале  $\dot{\epsilon}$  и  $h_c$  означает преобладание такого высокоэффективного (в данных условиях) механизма релаксации напряжений, который успевает обеспечивать квазистатические условия при самой высокой скорости деформирования в этом интервале  $\dot{\epsilon}$  и  $h_c$ . Это, однако, не исключает существования и возможности выявления скоростных зависимостей  $H_d$  в других интервалах значений  $\dot{\epsilon}$  и  $h_c$ .

Заметим, что наличие значительной пластической деформации под индентором при одновременном отсутствии или малой величине коэффициента скоростной чувствительности  $H_d$  для  $ZrO_2$  и очень малом количестве или полном отсутствии образующихся дислокаций с крайне низкой их подвижностью при комнатной температуре, а также отсутствие зависимости  $H_d$  от  $h_c$  означает, на наш взгляд, что пластическую релаксацию в этих материалах обеспечивают недислокационные процессы: генерирование и движение из-под индентора неравновесных точечных дефектов, зародышей новых фаз или полос локализованного сдвига, индуцируемых высокими контактными давлениями.

Таким образом, в работе определены величины коэффициентов скоростной чувствительности нанотвердости керамики ( $ZrO_2$ ). Показано влияние масштабного и скоростного факторов на коэффициент скоростной чувствительности твердости. Установлены критические значения глубины отпечатка и скорости относительной деформации для изменения коэффициента скоростной чувствительности нанотвердости.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №04-02-17198 и Министерства образования РФ, грант в области естественных наук (шифр Е02-3.4-263).

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВРЕМЯ-ЗАВИСИМЫЕ СВОЙСТВА ПММА ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ СТУПЕНЧАТО-НАРАСТАЮЩИМ ИМПУЛЬСОМ СИЛЫ

© А.И. Тюрин, В.В. Хлебников

Одним из наиболее распространенных неразрушающих методов исследования механических свойств твердых тел в микро- и нанобъемах является метод микро- и наноиндентирования. При этом определяется достаточно большое количество различных физико-механических характеристик материала, среди которых наиболее простой и доступной является микро- и нанотвердость. Числовые значения величины твердости зависят от типа исследуемого материала, температуры, глубины отпечатка, времени индентирования, вида и скорости приложения нагрузки и многих других факторов.

Цель работы заключалась в исследовании кинетики формирования отпечатка, выявлении стадийности его

формирования, определении кинетических и активационных параметров, установлении типа структурных дефектов и доминирующих микромеханизмов пластической деформации материала под индентором для различных температур при индентировании ступенчато-нарастающим импульсом силы полимера ПММА.

Исследования осуществляли алмазной пирамидой Берковича на наноиндентометре собственной конструкции с высоким пространственным (до 1 нм) и временным (до 100 мс) разрешением.

В ходе эксперимента образец нагружали ступенчато-нарастающим импульсом силы  $P$  с варьируемым временем нагрузки  $\tau_{\phi}$  от 0,1 до 100 с, и амплитуды действующей силы  $P_{\max}$  от 4 до 20 мН.

В условиях действия ступенчато-нарастающей нагрузки исследована кинетика формирования отпечатка (рис. 1), определены кинетические (мгновенные значения скорости внедрения индентора –  $v$  и скорости относительной деформации –  $\dot{\epsilon}$ ), силовые (мгновенные значения среднего контактного напряжения под индентором –  $\sigma$ ) и активационные (величина активационного объема –  $\gamma$ ) параметры процесса формирования отпечатка. Выявлено, что на каждом этапе постоянства величины приложенной силы при ступенчато-нарастающей нагрузке отпечаток формируется в несколько стадий, отличающиеся динамикой формирования отпечатка, характерными временами, кинетическими и активационными параметрами.

Для всех выявленных стадий определены кинетические параметры, а также значения динамической твердости и скорости относительной деформации материала. Проведенный активационный анализ выявленных стадий позволил определить активационные параметры, выявить спектр структурных дефектов и предложить микромеханизмы массопереноса материала из-под индентора.

Показано, что формирование отпечатка при индентировании ПММА обусловлено пластической деформацией за счет движения отдельных боковых групп макромолекулы, которые сменяются движением хребтовых звеньев и деформацией всей макромолекулы на завершающих стадиях.

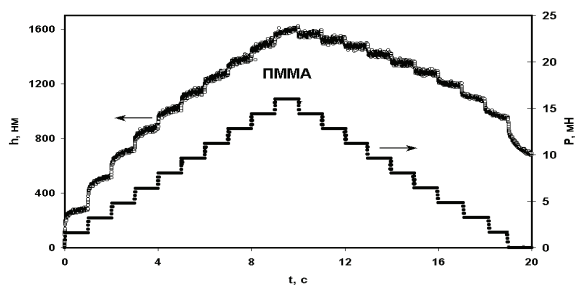


Рис. 1. Зависимость глубины внедрения индентора и приложенной нагрузки от времени, при индентировании ПММА ступенчато-нарастающим импульсом силы

Таким образом, для ПММА в широком интервале температур (от комнатной до  $T = 125$  °С) и скоростей относительной деформации (от  $10^{-1}$  до  $10^2$   $\text{с}^{-1}$ ) определена кинетика формирования отпечатка, его стадийность, величина динамической твердости и активационные параметры и предложены микромеханизмы пластичности ПММА при индентировании ступенчато-нарастающим импульсом силы.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 04-02-17198 и Министерства образования РФ, грант в области естественных наук (шифр Е02-3.4-263).

## ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ И СКОРОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МИКРОМЕХАНИЗМЫ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ ТРЕУГОЛЬНЫМ ИМПУЛЬСОМ СИЛЫ

© В.В. Хлебников

Индентирование, заключающееся во вдавлении жесткого индентора в поверхность с последующим определением микро-, а в последнее время и нанотвердости, продолжает оставаться одним из наиболее распространенных методов исследования механических свойств в поверхностных и приповерхностных слоях, а также в объеме твердых тел.

Это обусловлено тем, что в настоящее время все более актуальными становятся практические разработки создания интегрированных микроэлектромеханических систем и интеллектуальных микроботов; систем записи, хранения и считывания информации на механических носителях путем нанесения уколов атомарно острыми иглами и другими потребностями нанотехнологии. Кроме того, многие практически важные случаи получения и механической обработки материалов, изготовления из них различных изделий и их дальнейшая эксплуатация (микро- и наноконтактное взаимодействие при сухом трении, механическая шлифовка и полировка, абразивный и эрозивный износ и т. д.) подразумевают значительную локальную упруго-пластическую деформацию в субмикронных обла-

стях в условиях действия высоких скоростей относительной деформации  $\dot{\epsilon}$  (более  $10^2$   $\text{с}^{-1}$ ).

Ситуация осложняется тем, что в рассмотренных примерах зона деформации материала достаточно мала и может определяться в микронной или даже в нанометровой шкале, кроме того, происходящие процессы характеризуются высокими скоростями относительной деформации, их высокой локализацией и малыми временами контакта. Все это делает исследование механических свойств, кинетики и микромеханизмов пластичности деформации различных материалов на уровне отдельных элементарных событий в одном микро- или наноконтакте при действии высоких локальных напряжений достаточно актуальным.

Целью данного исследования было определение величины активационного объема  $\gamma$ , его зависимости от глубины пластического отпечатка  $h_c$  и средней скорости относительной деформации  $\dot{\epsilon}$ .

В качестве экспериментального материала были выбраны образцы с различной структурой: ионные и ковалентные кристаллы (LiF, ZnS, Ge, Si), объемные аморфные металлические сплавы