

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ В СУБМИКРООБЪЕМАХ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ

© А.И. Тюрин, М.А. Юнак

Достаточно большое количество пластических свойств твердых тел исследуются при действии на материал постоянного усилия. При этом изучение процессов ползучести помогает понять механизмы пластической деформации, протекающие в различных материалах под влиянием разных условий (температурных, механических, магнитных и др.).

Применительно к индентированию методика ползучести может быть реализована посредством приложения к индентору импульса нагрузки трапецеидальной формы. Она заключается в приложении к индентору нарастающей нагрузки (с варьруемым фронтом и амплитудой), последующем выдерживании материала при постоянной нагрузке и дальнейшей разгрузке отпечатка.

Такая методика может позволить исследовать процессы ползучести в субмикроробъемах при динамическом наноиндентировании.

Поэтому цель работы заключалась в исследовании кинетики процесса ползучести в LiF и ПММА в зависимости от времени нарастания нагрузки и температуры индентирования.

Установлено, что ползучесть в LiF и ПММА на плато нагрузки проходит в две стадии.

В LiF кинетика первой стадии (характерное время t до 7–8 с) зависит от скорости нагружения, а второй (8 с < t < 20 с) – практически нет. Проведен активационный анализ выявленных стадий ползучести. Показано, что на первой стадии величина активационного объема γ изменяется от $5 \cdot 10^{-29}$ до 10^{-28} м³, а на второй – составляет величину порядка 10^{-27} м³. Полученные значения величины γ соответствуют переходу от моно-

атомных к дислокационным механизмам течения в этих условиях.

В ПММА скорость нагружения также влияет на кинетику I стадии (характерное время t составляет 4–5 с) и практически не влияет на кинетику второй (5 с < t < 20 с). Проведенный активационный анализ при комнатной температуре показал, что величина γ меняется на первой стадии от 10^{-28} до $5 \cdot 10^{-28}$ м³, а второй стадии остается неизменной $\sim 5 \cdot 10^{-28}$ м³. Полученные значения γ сопоставимы с объемом хребтового звена макромолекулы ПММА. Это свидетельствует в пользу того, что на стадии ползучести пластическая деформация ПММА обусловлена движением хребтовых сегментов макромолекулы.

Температурные исследования ползучести (в интервале от 25 до 116 °С) при постоянном времени нарастания силы позволили определить кинетику формирования отпечатка и процесса ползучести, а также определить скоростные (скорость внедрения индентора и скорость относительной деформации), силовые (контактные напряжения и динамическая твердость) и активационные (энергия активации и активационный объем) параметры. Показано, что в ПММА процесс формирования отпечатка обусловлен деформацией материала за счет движения отдельных боковых или хребтовых звеньев макромолекулы (в зависимости от времени нарастания нагрузки, стадии индентирования и температуры).

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 СКОРОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ В PbWO₄

© А.И. Тюрин, В.В. Коренков, Г.В. Повернинова

Динамическое индентирование является одним из актуальных методов исследования прочности, хрупкости, пластичности твердых тел. Этот метод позволяет проводить эксперименты с высоким пространственным (до 1 нм) и временным (до 50 мс) разрешением в микро- и наноробъемах без разрушения всего образца. При этом о величине трещиностойкости, как характеристи-

ке хрупкости, судят по количеству и длине трещин около отпечатка.

Цель данной работы исследовать влияние скорости относительной деформации $\dot{\epsilon}$ и величины приложенной нагрузки P на коэффициент интенсивности напряжений первого рода при динамическом индентировании PbWO₄.

Испытания проводились на специально разработанной установке по динамическому индентированию. В качестве индентора использовалась стандартная пирамида Берковича. Диапазон скоростей относительной деформации $\dot{\epsilon}$ составлял от 10^{-2} до 10^2 с^{-1} . Установлено, что в исследованном материале при постоянной температуре и нагрузке $P = 158$ мН трещины около отпечатка появляются в интервале $\dot{\epsilon}$ от 0,05 до 100 с^{-1} и отсутствуют при $\dot{\epsilon}$ от 0,01 до 0,05 с^{-1} .

При постоянной глубине пластического отпечатка $h_c = 1,73$ мкм трещины образуются в том же интервале скоростей относительной деформации. Коэффициент трещиностойкости $K_{Ic} = 0,054$ МПа·м^{1/2} в диапазоне $\dot{\epsilon}$ от 0,05 до 100 с^{-1} начинает интенсивно возрастать при $\dot{\epsilon} < 0,05$ с^{-1} (рис. 1).

Таким образом, в данной работе установлена зависимость длины трещины S и коэффициента трещиностойкости K_{Ic} РbWO₄ в зависимости от глубины, величины действующей силы и скорости относительной деформации.

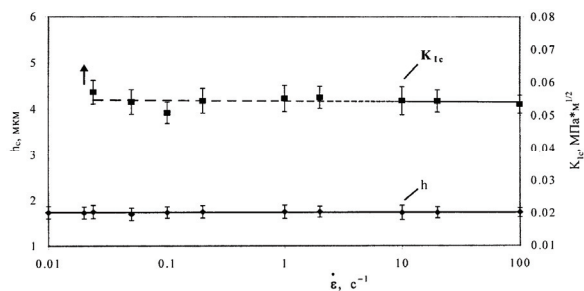


Рис. 1. Зависимость K_{Ic} от скорости относительной деформации $\dot{\epsilon}$ при постоянной глубине отпечатка $h_c = 1,73$ мкм

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 04-02-17198 и Министерства образования РФ, грант в области естественных наук (шифр E02-3.4-263).

НЕУСТОЙЧИВАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ И РАЗРУШЕНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ПРОЦЕССЕ НЕПРЕРЫВНОГО ВДАВЛИВАНИЯ ИНДЕНТОРА

© В.В. Коренков, Н.В. Коренкова

Как известно, макроскопическая пластическая деформация всегда является результатом громадного числа взаимообусловленных динамических процессов в дефектной структуре материала. Ввиду большого числа таких событий в единицу времени и инерционности традиционных механических средств испытания материалов реальная кинетика пластического течения, заложенная природой на микроуровне, маскируется, что затрудняет ее обнаружение и исследование.

Интенсивное развитие в последнее десятилетие методов атомно-силовой микроскопии и динамического наноиндентирования обеспечило возможность исследования механических свойств в нанобъемах, а в пределе – на уровне отдельных молекул или небольших групп атомов. Это дало возможность по-новому взглянуть на ряд фундаментальных нерешенных проблем физики прочности и пластичности.

Механические свойства большинства материалов испытывают значительные изменения в субмикронных масштабах, особенно сильные в областях с характерными размерами $L \leq 100$ нм. Отсюда вытекает необходимость их изучения, выяснения физических причин и механизмов масштабных эффектов и кинетических процессов в этих условиях. В работе представлены данные, относящиеся к процессам фазовых превращений и зарождения микротрещин в различных кристаллических, квазикристаллических и аморфных материалах в условиях локального деформирования субмикробъемов.

Для исследования механических свойств и поведения различных твердых тел в наномасштабе в работе ис-

пользовался метод динамического наноиндентирования. Он заключается в прецизионном локальном нагружении поверхности материала хорошо аттестованным острым зондом (алмазным индентором Берковича с радиусом сферического притупления вершины $R \sim 150$ нм) с одновременной непрерывной регистрацией кинетики его погружения. Непрерывное наноиндентирование обеспечивает сканирование по размерам деформированной области и скорости относительной деформации на несколько порядков величины во время одного испытания. Это позволяет получить большой объем информации с одного образца, не разрушая его.

Результаты были получены с помощью нескольких моделей нанотвердомеров, отличающихся своими техническими характеристиками и возможностями: ультрамикротвердомера DUN-W201E фирмы Shimadzu и динамических нанотвердомеров оригинальной конструкции, разработанных в лаборатории наномеханики ТГУ. Последние, наряду с высокой разрешающей способностью по смещению индентора ($\sim 0,1$ нм), обеспечивали дискретизацию отсчетов на уровне до 50 мкс (против 50 мс у DUN-W201E).

Исследования микроструктуры и аттестацию инденторов в работе проводили на атомно-силовом микроскопе Solver-LS, работавшем в бесконтактной и латеральной моде. Это позволяло визуализировать отпечатки глубиной до 50 нм и исследовать тонкую структуру поверхности как вокруг отпечатка, так и внутри него.