

Таким образом, в работе на разных масштабных уровнях проведены феноменологические исследования механических свойств структур, состоящих из аморфной пленки нитрида алюминия на кремниевой подложке. Методом сканирующей электронной микроскопии получены изображения отпечатков индентора, а также срезов, выполненных на трещинах и отслоениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nakamura S., Senoh M., Nagahama Sh., Iwasa N., Yamada T., Mitsu-shita T., Kiyoku H., Sugimoto Y., Kozaki T., Umemoto H., Sano M., Chocho K. // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. V. 37. Part 2. P. L309.
2. Miskys C.R., Garrido J.A., Nebel C.E., Hermann M., Ambacher O., Eickhoff M., Stutzmann M. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 290.
3. Andrei A., Krupa K., Jozwik M., Delobelle P., Hirsinger L., Gorecki C., Nieradko L., Meunier C. // Sensors and Actuators A. 2008. V. 141. P. 565.
4. Головин Ю.И. // ФТТ. 2008. Т. 50. №. 12. С. 2113.

5. Badylevich M., Shamulia S., Afanas'ev V.V., Stesmans A., Fedorenko Y.G., Zhao C. // J. Appl. Phys. 2008. V. 104. P. 093713.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-02-97541).

Поступила в редакцию 20 ноября 2009 г.

Dmitrievskiy A.A., Efremova N.Yu., Kosirev P., Korenkov V.V., Shuklinov A.V., Badylevich M., Fedorenko Y.G. Electronic microscopy and mechanical properties of AlN/Si structures.

Mechanical properties of AlN/Si structures were investigated by the dynamic micro- and nanoindentation method. Monitoring of imprints with the depth from 100 nm to 3 μm were carried out by the method of scanning electronic microscopy.

Key words: thin foils; aluminium nitride; micro- and nano-indenting; scanning electronic microscopy.

УДК 539.21:539.12.04

ПОЛЗУЧЕСТЬ МАТЕРИАЛОВ В НАНОШКАЛЕ И МЕТОДЫ ЕЕ ДИАГНОСТИКИ

© А.А. Дмитриевский, В.М. Васюков, М.Ю. Синегубов, А.В. Шуклинов,
Р.А. Столяров, Е.Ю. Исаева, К.В. Тихомирова

Ключевые слова: ползучесть; тестирование ползучести; ползучесть в наномасштабе.

Изучены механические свойства материалов, в частности, ползучесть и пластическая деформация. Отлажена установка и разработана методика диагностики механизмов ползучести в наномасштабе. Получены первые результаты.

При производстве деталей и узлов машин и конструкций из различных материалов (кристаллических, аморфных, полимерных) наиболее существенными являются их механические свойства – прочность, твердость, пластичность, износостойкость и пр. Именно благодаря комплексу этих свойств они получили столь широкое практическое применение. Особый интерес вызывают механизмы ползучести и пластической деформации в наномасштабе, т. к. они дают наиболее полную и комплексную информацию о связи «структурно-свойства» неразрушающим методом.

Ползучесть – медленное деформирование тела под действием постоянной нагрузки или постоянного напряжения. Адаптация атомной решетки макроскопически проявляется как деформация. Зависимость такой деформации от времени называется кривой ползучести. Эта кривая характеризуется (в зависимости от температуры и напряжения) одной, двумя, а иногда и тремя стадиями ползучести (рис. 1).

Первая стадия, на которой после первоначальной мгновенной деформации скорость ползучести со временем падает, называется стадией первичной или неустановившейся ползучести (1 на рис. 1). Вторая стадия (2 на рис. 1) – стадия установившейся, или вторичной ползучести – ее скорость постоянна. Наконец, на третьей стадии (3 на рис. 1) скорость ползучести со временем возрастает. Третья стадия ползучести завершается разрушением [1].

Описанные выше стадии хорошо согласуются с экспериментальными данными в макро- и микрообъе-

мах. Но механические свойства материалов в наномасштабе (при характерных размерах объекта или элементов его структуры $R \leq 1$ мкм) не могут быть выведены путем простой экстраполяции из макро- или микрообластей [2].

В УИЦ «Нанотехнологии и наноматериалы» ГОУ ВПО «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина» разработана и создана линейка универсальных динамических нанотестеров (УДНТ), предназначенных для проведения исследований физико-механических параметров различных материалов в субмикрообъемах и тонких приповерхностных слоях. УДНТ позволяют реализовывать такие виды испытаний как определение модуля Юнга, нанотвердости, коэффициента трения, ползучести, абразивного износа и др.

Тестирование ползучести осуществлялось на УДНТ-07-2. Для отладки установки предварительно проводилась калибровка прибора. Осуществляли калибровки датчика смещения, силы и жесткости пружин подвеса штока.

Тестирование осуществлялось следующим образом: сначала нагрузка на индентор в течение 15 минут составляла 50 мН, затем увеличили нагрузку до 500 мН и после 2 часов выдержки разгрузили образец до 50 мН.

На рис. 2 представлена зависимость прироста глубины внедрения индентора в образец от времени выдержки под постоянной нагрузкой, величина которой составляла 500 мН.

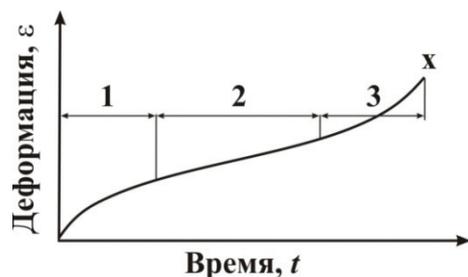


Рис. 1. Кривая ползучести. X – разрушение

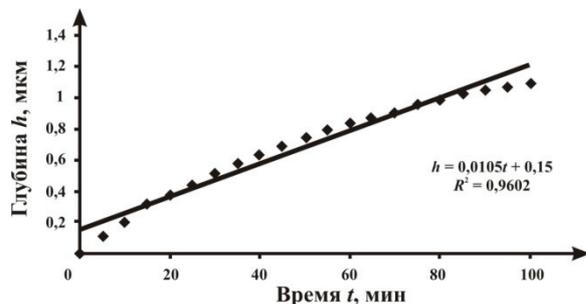


Рис. 2. Кривая ползучести кремния

Для наглядности рассматривался участок, соответствующий стадии установившейся ползучести. Полученные данные аппроксимировались линейной зависимостью. Коэффициент корреляции при этом составлял $\sim 0,96$. Тангенс угла наклона прямой, или

скорость установившейся ползучести, при этом составил $0,0105$ мкм/мин. ($0,175$ нм/с) (рис. 2).

Ползучесть в наномасштабе мало изучена (ввиду крайней скудности экспериментальных данных), и выявить доминирующий механизм пока не представляется возможным. В связи с этим, получение новой экспериментальной информации о процессах, происходящих в материалах в условиях ползучести, представляется актуальным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чадек Й. // Ползучесть металлических материалов: пер. с чешск. М.: Мир, 1987. 304 с.
2. Головин Ю.И. // Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикроробъектах, тонких приповерхностных слоях и пленках (обзор) // ФТТ. 2008. Т. 50. Вып. 12.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена в рамках Приоритетного национального проекта «Образование» Министерства образования и науки РФ, а также при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 06-02-96316, № 09-02-97541-р_центр-а).

Поступила в редакцию 4 октября 2009 г.

Dmitrievskii A.A., Vasyukov V.M., Sinegubov M.Yu., Shuklinov A.B., Stolyarov R.A., Isaeva E.Yu., Tikhomirova K.V. Creeping of materials in nanoscale and methods of its diagnostics.

The mechanical properties such as creeping and plastic deformation were investigated. The adjustment and the methodic were of creeping mechanisms diagnostics in nanoscale were worked out. The first results were received.

Key words: creeping; creeping testing; creeping in nano-scale.

УДК 539.2

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В ТВЕРДОСТИ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ Nb

© Ю.И. Головин, М.Г. Исаенкова, О.А. Крымская, В.М. Васюков, Р.А. Столяров, А.В. Шуклинов, Л.Е. Поляков

Ключевые слова: размерный эффект при нано-/микроиндентировании; Nb; теория пластичности; дислокации. Методами индентирования исследован размерный эффект в твердости Nb. Получены размерные зависимости твердости в диапазоне глубин отпечатка от 20 нм до 70 мкм.

Известно, что при глубоком (на много порядков величины) уменьшении характерных размеров R^* объекта или порции вещества хотя бы в одном из трех измерений их свойства перестают быть инвариантными относительно R^* . Размерные эффекты (РЭ) – значительные изменения свойств материалов при уменьшении R^* – могут носить самый различный характер: растущий, падающий, осциллирующий и др. [1]. В механических свойствах, в частности в твердости, РЭ в разных диапазонах R^* могут иметь различную природу, чему отвечает наличие на зависимости $H(h)$ нескольких участков (здесь H – твердость, h – глубина отпечатка, характеризующая размеры области локальной пластической деформации) [2].

Цель данной работы заключалась в исследовании РЭ в твердости поликристаллического Nb (средний размер зерен ~ 1 мкм) методами макро-, микро- и наноиндентирования в широком диапазоне глубины отпечатка h (а следовательно, объема сдеформированной области) от 20 нм до 70 мкм.

В эксперименте использовали образцы Nb чистотой 99,9 %. Измерение H в макро- и микромасштабе проводили на твердомерах Duramin A300 и ПМТ 3М в диапазоне нагрузок на индентор 1...100 Н и 0,1...1 Н соответственно, а нанотвердости – на наноиндентометре G200 фирмы MTS (США) в диапазоне нагрузок на индентор 0,015...2 Н. Полученные зависимости $H(h)$ были аппроксимированы тремя (химически полированный