

05;12

Определение времязависимых пластических свойств твердых тел посредством динамического наноиндентирования

© Ю.И. Головин, В.И. Иволгин, В.В. Коренков, А.И. Тюрин

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина

Поступило в Редакцию 13 марта 1997 г.

Описан новый способ определения времязависимых упругопластических и диссипативных свойств твердых тел в нанобъемах, основанный на регистрации мгновенных значений усилия и глубины внедрения жесткого индентора, а также измерений энергий: а) подведенной к индентору W_1 , б) рассеянной в процессе погружения U и в) возвращенной индентору при разгрузке W_0 . Приведены результаты измерения динамической микротвердости, а также величин W_0 и U в кристаллах NaCl в функции продолжительности контакта индентора с поверхностью в диапазоне времен от 1 ms до 10 s.

Один из наиболее простых и широко распространенных способов определения механических свойств твердых тел в микро- и нанобъемах заключается во вдавлении жесткого индентора и последующем вычислении величины твердости H как отношения усилия внедрения F к площади образовавшегося отпечатка A [1–3]. Как в традиционной методике, так и в технике "наноиндентирования", приобретшей большую популярность в последние годы [4–6], фактически оцениваются квазистатические упругопластические свойства материала в тонких приповерхностных слоях. Величина H , определенная таким образом, не может отражать динамических свойств материала или кинетических характеристик каких-либо определенных физических процессов в нем, так как суммирует *post factum* результаты всех событий, протекавших на разных стадиях формирования отпечатка. Вследствие этого H не имеет ясного физического смысла и не может быть соотнесена с известными фундаментальными характеристиками материала. Вместе с тем во многих случаях эксплуатационные возможности, поведение и природа разнообразных вторичных процессов при кратковременном контактном

взаимодействии определяются именно динамикой структурных дефектов и пластического течения в зоне контакта, а также величиной поглощенной энергии. Подобные условия реализуются весьма часто, например: при сухом абразивном износе трущихся твердых тел, повреждении поверхности мелкими быстро летящими частицами, дроблении и тонком помоле, механическом сплавлении, в кончике быстро растущей трещины при квазихрупком разрушении и т. д.

В работе описан способ, позволяющий определять динамические значения твердости H_d времязависимую часть поглощенной при индентировании энергии. Также представлены первые полученные результаты. Предлагаемый способ (рис. 1) заключается в укалывании поверхности жестким индентором, установленным на конце горизонтально подвешенного штока, к которому с помощью электродинамического привода прикладывается импульс силы $F(t)$ с регулируемой формой (прямоугольной, трапецидальной, треугольной), амплитудой (от 0.1 мН до 1Н), крутизной фронтов и длительностью (от 50 мкс до 10 с). Емкостный датчик перемещения позволял регистрировать мгновенное значение глубины погружения индентора $h(t)$ с разрешением 10 нм, а пьезоэлектрический датчик — силу сопротивления внедрению. Сигналы с датчиков перемещения, силы и мгновенного значения силы тока в приводе подавались на компьютер через коммутатор и аналого-цифровой преобразователь. Программа обработки записанной информации позволяла определять мгновенные значения h , H_d , величины энергии отскока индентора W_0 , поглощенной при индентировании энергии U и величину приведенной поглощенной энергии U_d . Величина U определялась по разнице работы, совершенной приводом (или кинетической энергии штока перед соприкосновением индентора с поверхностью образца) W_1 , и кинетической энергии отскока штока W_0 , а U_d — нормированием U на объем отпечатка.

Эксперименты проводились при комнатной температуре на номинально чистых кристаллах NaCl, обычно используемых для калибровки индентометров. Индентор приводился в движение прямоугольным импульсом силы $F = 0.2$ Н длительностью τ от 1 мс до 10 с. Из рис. 2 следует, что значения H_d приобретают обычную для NaCl величину 200 Н/мм² при $\tau \geq 1$ с, а при уменьшении τ быстро возрастают (до ~ 650 Н/мм² при $\tau = 4$ мс). Аналогичное поведение $H_d(t)$ наблюдалось в [7–8] при скачкообразном приложении к индентору длительно действующей постоянной силы. Прерывание нагружения на

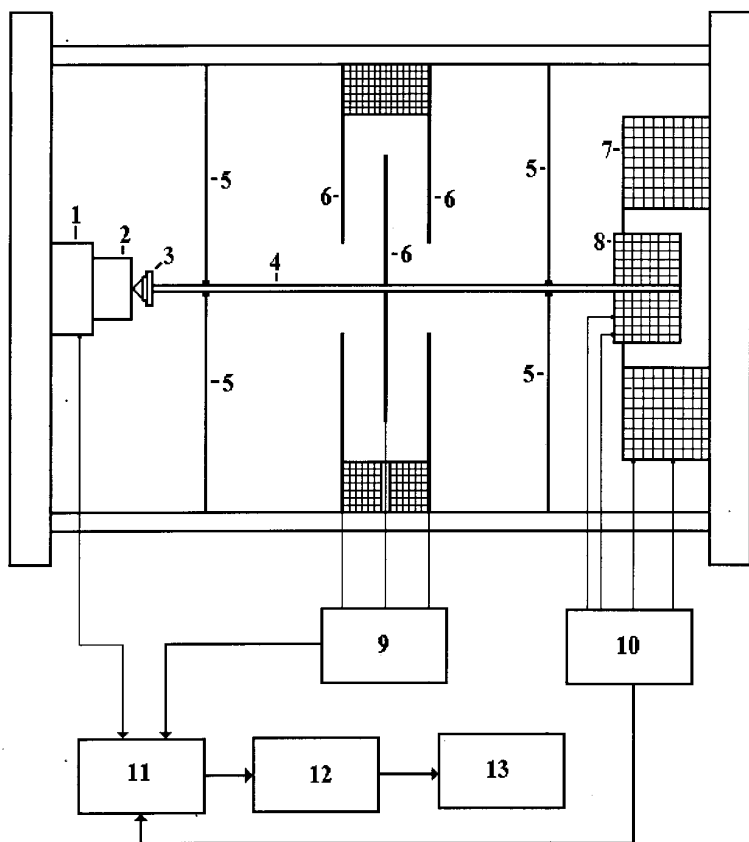


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — пьезодатчик; 2 — образец, 3 — индентор; 4 — шток; 5 — элементы подвеса штока; 6 — емкостный датчик перемещения; 7 — неподвижная катушка; 8 — подвижная катушка; 9 — блок обработки сигнала емкостного датчика; 10 — генератор импульсов тока; 11 — аналого-цифровой преобразователь с коммутатором сигналов; 12 — компьютер; 13 — принтер.

ранних стадиях позволяет исследовать зависимость W_0 от времени нагружения. Она оказалась еще более сильной, чем $H_d(\tau)$ (рис. 2). При $\tau = 4 \text{ ms}$ W_0 составляла 45 nJ, а при $\tau \geq 10^2 \text{ ms}$ становилась

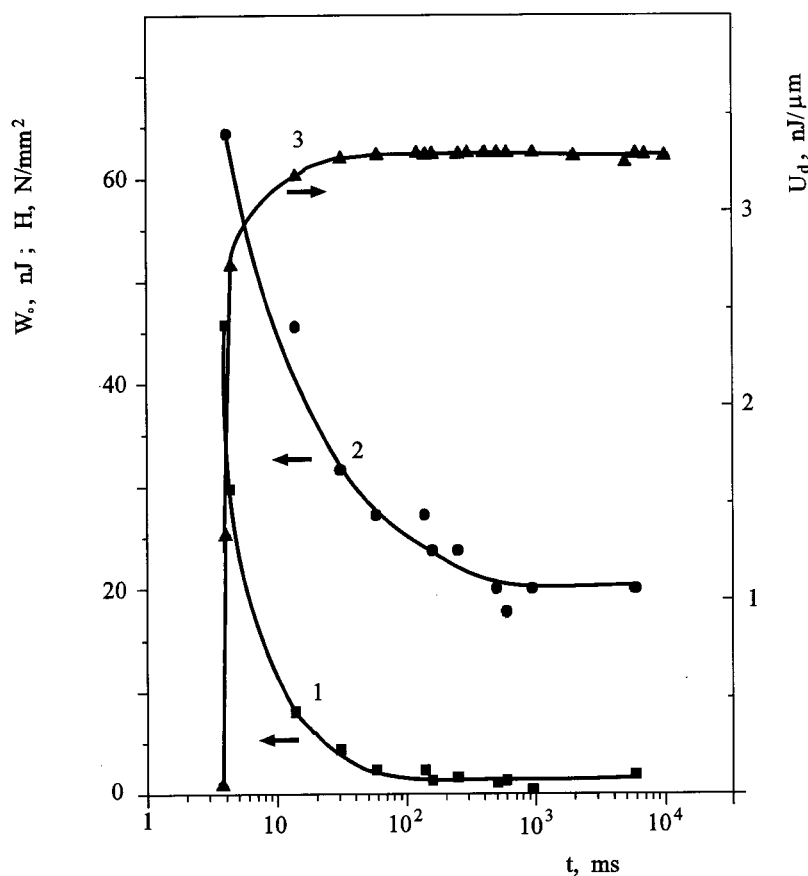


Рис. 2. Кинетические зависимости энергии отскока W_0 (1); динамической твердости H_d (2) и приведенной поглощенной энергии U_d (3) при динамическом наноиндентировании кристаллов NaCl.

близкой к амплитуде механических флуктуаций штока с индентором ($\sim 1\text{ nJ}$). Времязависимая часть приведенной поглощенной энергии U_d также менялась в десятки раз в интервале τ от единиц до десятков ms (рис. 2). Из этих данных следует, что H_d , W_0 и U_d являются

независимыми характеристиками материала, описывающими его времязависимые упругопластические и диссипативные свойства в контактной зоне с объемом $\sim 1 \mu\text{m}^3$. Очевидно, характерные времена изменения H_d , W_0 и U_d определяются динамикой пластического течения в контактной зоне под действием кратковременно приложенной постоянной силы. С другой стороны, они содержат информацию о динамике зарождения и перемещения структурных дефектов, являющихся элементарными носителями этой деформации, в условиях действия высоких локальных напряжений и относительных скоростей деформации. Действительно, средние значения контактных напряжений $\sigma \approx H_d$ превышают при $\tau = 4 \text{ ms}$ предел текучести при квазистатическом одноосном сжатии почти в 1000 раз. Скорость относительной деформации $\dot{\epsilon} \approx \dot{h}/h$, несмотря на невысокую абсолютную скорость перемещения индентора $\dot{h} < 1 \text{ mm/s}$ в максимуме, достигает при $h < 1 \mu\text{m}$ величин $\sim 10^3 \text{ s}^{-1}$, характерных для соударений макроскопических тел с высокими скоростями.

Таким образом, в работе предложен способ исследования поведения материала в условиях действия кратковременно приложенных высоких напряжений, моделирующих ситуации, часто встречающиеся при контактном взаимодействии двух тел. Полученные результаты свидетельствуют о существенном возрастании скорости диссипации энергии при уменьшении продолжительности контакта ($\tau < 20 \text{ ms}$) и увеличении динамической микротвердости при $\tau < 1 \text{ s}$.

Список литературы

- [1] Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 230 с.
- [2] Рыжков Э.В., Колесников Ю.В., Суслов А.Г. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках. Киев.: Наук. Думка, 1982. 172 с.
- [3] Гудков А.А., Славский Ю.И. Методы измерения твердости металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1982. 168 с.
- [4] Doerner M.F., Gardner D.S., Nix W.D. // J. Mater. Res. 1986. V. 1. N 6. P. 845–851.
- [5] Oliver W.C., Pharr G.M. // J. Mater. Res. 1992. N 7. P. 1564–1570.
- [6] Mutakami Y., Tanaka K., Itokazu M., Shimamoto A. // Philos. Mag. A. 1994. V. 69. P. 1131–1136.
- [7] Головин Ю.И., Тюрин А.И. // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60. В. 10. С. 722–726.
- [8] Головин Ю.И., Тюрин А.И. // ФТТ. 1996. Т. 38. С. 1812–1819.