

СКОРОСТНЫЕ И МАСШТАБНЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЧИСЛА НАНОТВЕРДОСТИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИИ

Головин Ю. И., Тюрин А. И., Хлебников В. В.

Тамбовский государственный университет, г. Тамбов, Россия
oolovin@tsu.tmb.ru

Хорошо известно, что с уменьшением размеров объекта испытания или области деформирования до десятков – сотен нанометров все свойства материалов могут сильно измениться. Один из немногих способов, пригодных для определения физико-механических свойств материалов в субмикроробъектах – наноиндентирование, реализуемое непрерывным вдавливанием в поверхность хорошо аттестованного зонда линейно нарастающим во времени усилием $P(t)$. Спецификой (а в ряде случаев – и преимуществом) этого теста является контролируемое увеличение в процессе испытания размеров деформированной зоны по мере увеличения глубины отпечатка $h(t)$ на несколько порядков величины при одновременном уменьшении скорости относительной деформации $\dot{\epsilon} \approx (dh/dt)/h$. То есть, фактически, в одном цикле испытания происходит сканирование свойств материала и вдоль масштабной, и вдоль скоростной переменных. Вместе с тем, это приводит к смешиванию соответствующих зависимостей микротвердости от h и от $\dot{\epsilon}$.

Цель настоящей работы состояла в разделении вкладов масштабного и скоростного факторов в число динамической твердости H_d на различных этапах формирования отпечатка.

В качестве объектов исследования были выбраны ионные и ковалентные кристаллы (LiF, Ge, Si), полимер (ПММА) и плавленый кварц, представляющие различные группы материалов.

Индентирование осуществляли алмазной пирамидой Берковича под действием симметричного треугольного импульса силы с варьируемой амплитудой P_{max} (от 0,4 до 240 мН) и длительностью фронта импульса нагружения τ_ϕ (в диапазоне времен τ_ϕ от 10 мс до 100 с) на динамическом наноиндентометре собственной конструкции. Зависимости $P(t)$ и $h(t)$ регистрировались с временным разрешением ~ 50 мкс и записывались компьютером. Затем по этим данным строились диаграммы полного цикла нагружения – разгрузки в координатах $P - h$. Это обеспечивало полностью контролируемые условия испытания для различных значений средней скорости относительной деформации $\langle \dot{\epsilon} \rangle \approx (dh/dt)/h \sim 1/\tau_\phi$ (в интервале от 10^{-2} до 10^2 с $^{-1}$), а также позволяло определять мгновенные значения величины действующей силы, глубины отпечатка и динамической твердости H_d в момент времени t .

Знание мгновенных значений H_d для различных скоростей относительной деформации и глубин отпечатка, а также величины статической твердости материала H_0 позволило найти доли H_d , которые контролируются скоростным ΔH_s и масштабным ΔH_h факторами при заданных величинах h_c и $\langle \dot{\epsilon} \rangle$, в предположении аддитивности вкладов всех трех составляющих твердости.

Таким образом, в работе в достаточно широких диапазонах $\langle \dot{\epsilon} \rangle$ (от 10^{-2} до 10^2 с $^{-1}$) и h_c (от 2 мкм до 30 нм) предложен и реализован метод разделения вклада масштабного и скоростного факторов в формирование величины числа нанотвердости исследуемых материалов при динамическом наноиндентировании.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 01-02-16573 и № 04-02-17198) и Министерства образования РФ, грант в области естественных наук (шифр Е02-3.4-263).