

Недислокационная пластичность и ее роль в массопереносе и формировании отпечатка при динамическом индентировании

© Ю.И. Головин, А.И. Тюрин

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,
392622 Тамбов, Россия

E-mail: golovin@tsu.tmb.ru; golovin@inbox.ru

(Поступила в Редакцию 20 марта 2000 г.)

Новым методом динамического индентирования установлена доля недислокационной пластичности в процессе массопереноса материала из-под индентора для ряда ионных, полупроводниковых и металлических материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 98-02-16549).

Сама возможность и вероятная роль недислокационных механизмов макропластичности в различных условиях деформирования обсуждается несколько десятилетий. Как показано в [1–3], наиболее конкурентоспособными (по отношению к дислокационным) при высоких давлениях или больших локальных напряжениях могут быть деформации за счет движения точечных дефектов. В [4–11] приводятся свидетельства проявлений междоузельной пластичности при образовании отпечатка под индентором даже в очень пластичных кристаллах типа NaCl. Они получены несколькими независимыми методами: анализом формы микрорельефа (специфических бугорков) на боковой и тыльной поверхностях образца после укола, по данным катодолюминесценции материала вблизи отпечатка и др. Однако вопрос о количественной роли точечных дефектов и междоузельных (краудионных) механизмов массопереноса при индентировании в зависимости от типа материала и условий локального нагружения практически не исследован.

В [12–16] показано, что, регистрируя временную зависимость кинетики погружения индентора в материал с высоким временным разрешением (порядка $100 \mu\text{s}$) при разных температурах и условиях вдавливания, можно получить информацию о величине активационного объема γ и его изменении по мере внедрения индентора.

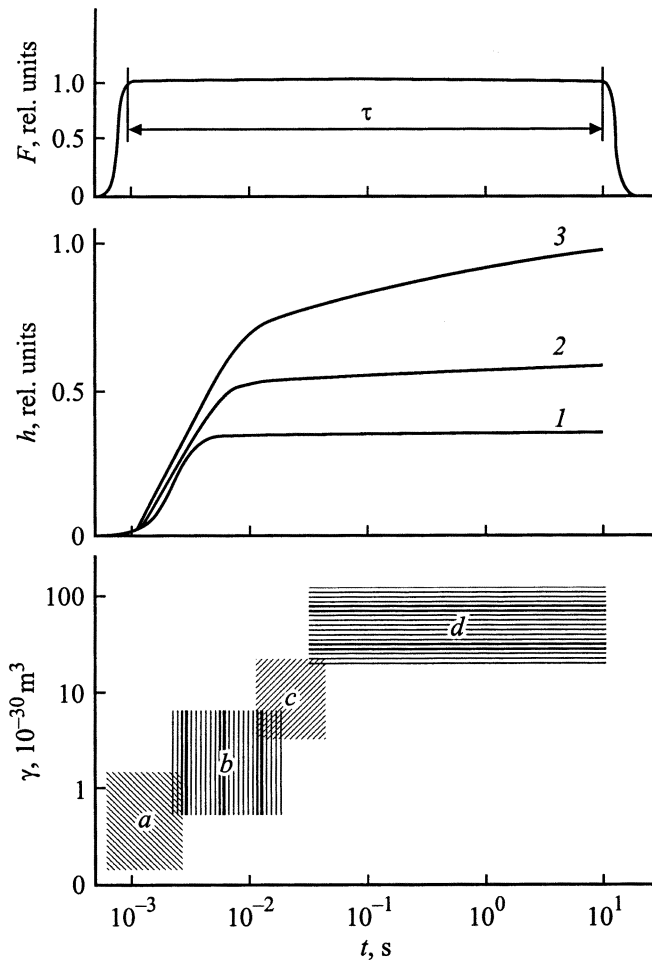
Механизмы термоактивированного массопереноса за счет нескоррелированного движения отдельных точечных дефектов характеризуются активационным объемом $\gamma \leq V_a$ (где V_a — объем, приходящийся в решетке на один атом или ион), за счет скоррелированного движения малоатомных кластеров — краудионов — величиной $\gamma \leq 10V_a$ [17], а дислокационные механизмы — объемом $\gamma \gg V_a$ [18]. Величина γ для различных механизмов пластического течения отличается во много раз, что дает возможность даже при относительно невысокой точности ее определения, свойственной динамическим методам (особенно в условиях сильно неоднородного напряженного состояния, возникающего при индентировании), уверенно различать малоатомные механизмы массопереноса от дислокационных, которым присуща гораздо большая степень коллективизации перемещения атомов.

Цель работы — определение доли недислокационной пластичности *in situ* в процессе образования отпечатка в материалах с различным типом связи при измерении микротвердости.

Экспериментально исследовали кинетику погружения индентора в виде алмазной пирамидки Виккерса или Берковича, установленной на конце горизонтально подвешенного штока, к которому с помощью электродинамического привода прикладывали импульс силы $F(t)$ прямоугольной формы (см. рисунок) с регулируемой амплитудой и длительностью (от 1 ms до 10 s). Емкостный датчик перемещения позволял регистрировать мгновенные значения глубины погружения индентора $h(t)$ с разрешением 10 nm, а пьезоэлектрический датчик — силу сопротивления внедрению. Сигналы с датчиков перемещения, силы и мгновенного значения силы тока в приводе подавались на компьютер через коммутатор и аналогово-цифровой преобразователь. Программа обработки записанной информации позволяла определять мгновенные значения глубины $h(t)$, скорости погружения $v(t) = dh/dt$, динамической твердости $H_d(t)$, объема отпечатка $V(t)$ и активационного объема $\gamma(t)$.

Такая методика позволяла непрерывно *in situ* анализировать скорость деформации в функции мгновенного значения контактных напряжений, выделять по особенностям кинетической кривой различные фазы процесса, проводить их термоактивационный анализ и по его результатам судить о микромеханизмах массопереноса в приконтактной области [12–16].

Активационный объем γ определяли по соотношению $\gamma = (d[\ln(v)]/d\sigma)kT$, исходя из наклонов зависимостей $\ln(v) = f(\sigma)$, где σ — мгновенное значение среднего контактного напряжения под индентором, k — постоянная Больцмана, T — температура. Сопоставляя полученные данные о величине γ со значениями, характерными для различных структурных дефектов (точечные дефекты, краудионы, дислокации), можно идентифицировать механизмы пластической деформации, определяющие процесс формирования отпечатка. В совокупности с данными о приросте глубины отпечатка на каждой i -й стадии Δh_i это позволяет установить вклад различных



Схематическое изображение динамики и атомных механизмов деформации в микроконтактной области, выявленные методами динамического наноиндентирования. F — величина силы контактного взаимодействия индентора с исследуемым материалом, τ — длительность импульса нагрузки, h — глубина отпечатка, γ — величина активационного объема. 1 — аморфный металлический сплав ($\text{Co}_{50}\text{Fe}_{35}\text{B}_{15}$), 2 — Si, 3 — NaCl. a — elastic deformation; b — interstitial atoms; c — crowdions; d — dislocations.

микромеханизмов массопереноса на каждой из выявленных стадий, оценить долю размера $\Delta h_i/h_0$ и объема $\Delta V_i/V_0$, вытесненного при формировании отпечатка посредством того или иного микромеханизма пластической деформации. Здесь h_0 и V_0 — установившиеся значения глубины и объема отпечатка.

Для количественной оценки доли пластической деформации, реализующейся за счет движения отдельных точечных дефектов и их кластеров ("краудионов") или дислокаций, условно примем интервалы характерных значений γ для них $\gamma_p < 10 \times 10^{-30}$ и $\gamma_d > 10 \times 50^{-30} \text{ m}^3$ соответственно. Как следует из эксперимента, переход от малых значений γ (порядка атомных или ионных объемов) к большим (порядка десятков b^3 , где \mathbf{b} — вектор Бюргера для скользящих дислокаций) происходит достаточно резко (если он вообще происходит в данной структуре), так что варьирование γ_p и γ_d в разумных

пределах мало отражается на оценках относительного вклада обсуждаемых процессов в конечный результат — формирование отпечатка известных размеров.

Как следует из таблицы, даже при длительной выдержке индентора значительную часть пластической деформации во всех исследованных материалах обеспечивают моно- или малоатомные микромеханизмы массопереноса. В некоторых структурах (например, аморфных сплавах на основе железа) их доля достигает 100%, но даже в мягких кристаллах (NaCl, KCl, Al, Pb) она составляет десятки процентов.

Отметим, что, поскольку $H \sim 1/h^2$, а $V \sim h^3$, относительный вклад точечных дефектов в формирование числа микротвердости H даже больше (а дислокационной пластичности — меньше), чем в величину вытесненного объема V . Отсюда следует, что изменение условий движения и торможения дислокаций в кристалле, их подвижности и плотности не может приводить к пропорциональным изменениям H , что и наблюдается в эксперименте [19]. Более того, зачастую изменение температуры, предварительной обработки влечет за собой увеличение твердости и вместе с тем кажущийся парадоксальным рост подвижности дислокаций [19,20], что вполне объяснимо в свете полученных данных о роли дислокационной пластичности при микроиндентировании. Из приведенных данных также вытекает, что с уменьшением продолжительности контактного взаимодействия и размеров отпечатка роль и вклад точечных дефектов возрастают, а дислокаций — падает. Поэтому анализ микроконтактной пластичности, возникающей во

Доля вклада точечных дефектов в процесс формирования отпечатка при динамическом индентировании

Тип материала	Усилие внедрения F, N	Продолжительность выдержки индентора в материале под нагрузкой, τ	Доля точечных дефектов	
			$\Delta h_i/h_0$	$\Delta V_i/V_0$
KCl	0.11	10 s	0.7	0.34
		< 10 ms	1.00	1.00
NaCl	0.11	10 s	0.69	0.33
		< 9 ms	1.00	1.00
LiF	0.11	10 s	0.64	0.26
		< 8 ms	1.00	1.00
MgO	6.0	10 s	0.68	0.31
		< 12 ms	1.00	1.00
Pb	0.25	10 s	0.46	0.10
		< 13 ms	1.00	1.00
Al	0.25	10 s	0.58	0.20
		< 10 ms	1.00	1.00
$\text{Co}_{50}\text{Fe}_{35}\text{B}_{15}$	0.25	6 ms	1.00	1.00
Ge	2.3	10 s	0.67	0.30
		< 7 ms	1.00	1.00
GaAs	3.8	10 s	0.49	0.12
		< 8 ms	1.00	1.00

многих практически важных ситуациях (соударение мелких частиц, абразивный износ, шлифовка, виброобработка, механохимические реакции при тонком измельчении и помоле и т.д.), должен с большей степени опираться на представления о модах пластичности с участием точечных дефектов, нежели дислокаций.

Таким образом, в работе количественно оценена роль различных микромеханизмов пластической деформации в процессе образования отпечатка при динамическом микроиндентировании. Показано, что даже в мягких кристаллах доля точечных дефектов в формировании числа микротвердости всегда очень существенна, а при переходе к жестким материалам (например, аморфным сплавам) и малым продолжительностям контакта формирование отпечатка может быть вообще целиком обусловлено недислокационной пластичностью.

Список литературы

- [1] В.Л. Инденбом. Письма в ЖЭТФ **12**, 526 (1970).
- [2] В.Л. Инденбом, А.Н. Орлов. ФММ **43**, 3, 469 (1977).
- [3] В.Л. Инденбом, А.Н. Орлов. УФН **76**, 557 (1962).
- [4] V.N. Rozhanskii, M.A. Velednitskaya. Phys. Stat. Sol. (a) **8**, 551 (1971).
- [5] M.A. Velednitskaya, V.N. Rozhanskii, L.F. Comolova et al. Phys. Stat. Sol. (a) **32**, 123 (1975).
- [6] В.Н. Рожанский, Н.Л. Сизова, А.А. Урусовская. ФТТ **11**, 411 (1971).
- [7] M.N. Chaudhri, J.T. Hagan, J.K. Wells. J. Mat. Sci. **15**, 5, 1189 (1980).
- [8] J. Llopis, C. Ballasteros., J. Piguera. et al. Phys. Stat. Sol. (a) **78**, 679 (1983).
- [9] M.Sh. Akchurin, V.G. Galstyan, V.R. Regel. Scanning **14**, 194 (1992).
- [10] M.Sh. Akchurin, V.R. Regel. Chem. Rev. **23**, 59 (1998).
- [11] М.Ш. Акчуриц, В.Г. Галстян, В.Р. Регель, В.Н. Рожанский. Поверхность **3**, 119 (1983).
- [12] Ю.И. Головин, А.И. Тюрин. Письма в ЖЭТФ **60**, 10, 722 (1994).
- [13] Ю.И. Головин, А.И. Тюрин. Изв. РАН. Сер. физ. **59**, 49 (1995).
- [14] Ю.И. Головин, А.И. Тюрин. Кристаллография **40**, 5, 884 (1995).
- [15] Ю.И. Головин, А.И. Тюрин. ФТТ **6**, 1812 (1996).
- [16] Ю.И. Головин, А.И. Тюрин, В.З. Бенгус, В.И. Иволгин, В.В. Коренков. ФММ **88**, 6, 103 (1999).
- [17] M. Koganagi, T. Tsutsumi, K. Ohsawa, E. Kuramoto. Computational Materials Science **14**, 103 (1999).
- [18] А. Ивенс, Р. Роулингс. В сб.: Термически активированные процессы в кристаллах. Мир, М. (1973). С. 172.
- [19] Ю.С. Боярская, Д.З. Грабко, М.С. Кац. Физика процессов микроиндентирования. Штиинца, Кишинев (1986). 256 с.
- [20] Ю.С. Боярская, Д.З. Грабко, Р.П. Житару. Псевдоподвижность дислокаций в чистых и примесных щелочно-галоидных кристаллах. Препринт АН МССР, Кишинев (1986). 28 с.