

## Динамика формирования отпечатка и дислокационной розетки при импульсном микроиндентировании ионных кристаллов

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

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

(Поступила в Редакцию 5 мая 1996 г. В окончательной редакции 17 сентября 1996 г.)

Физические механизмы формирования деформированной зоны около отпечатка остаются до сих пор дискуссионными. Это определяется главным образом недостатком данных о динамике структуры материала под индентором в процессе формирования отпечатка. Имеющаяся информация (о размерах дислокационной розетки, ее структуре и т.д.) относится к большим временам индентирования (порядка десятков-сотен секунд), и практически отсутствуют данные для меньших времен индентирования, когда формируется основная доля отпечатка. Как было установлено ранее [1–3], формирование отпечатка при микроиндентировании ионных кристаллов с решеткой типа NaCl происходит в несколько четко выраженных стадий продолжительностью от единиц миллисекунд до десятков секунд. Они отличаются характерными временами, кинетикой, активационными параметрами и микромеханизмами массопереноса материала в зоне контакта, так что можно ожидать различного строения и динамики зоны деформации на каждой стадии.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании взаимосвязи размеров отпечатка и дислокационной розетки в процессе их формирования с временным разрешением порядка 1 мс.

Исследования проводились на ионных кристаллах KCl и LiF на установке, позволяющей варьировать длительность приложения нагрузки к индентору в диапазоне времен  $t$  от 1 мс до 30 с. Величина нагрузки, прикладываемой к индентору, могла изменяться в интервале от 0.2 до 0.6 Н (в зависимости от целей эксперимента). Размеры диагонали отпечатка  $d$  фиксировались после разгрузки образца с помощью оптического микроскопа, а длина краевых лучей дислокационной розетки  $l$  измерялась после разгрузки и химического травления образца. Обработка экспериментальных данных проводилась по результатам измерений не менее десяти отпечатков, полученных при одинаковой длительности и амплитуде прикладываемой нагрузки.

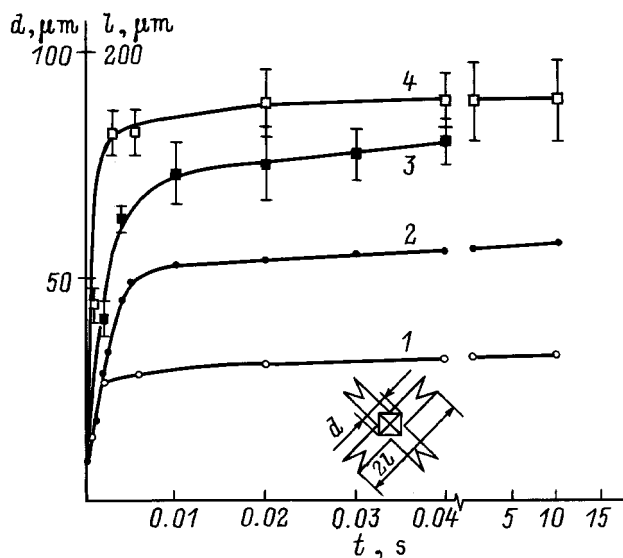
Результаты измерений, представленные на рисунке, показывают, что зависимости  $d(t)$  и  $l(t)$  имеют быструю и медленную стадии. За время быстрой стадии, составляющей от 2 до 8–10 мс в зависимости от типа исследуемого кристалла, диагональ отпечатка и размеры лучей дислокационной розетки достигали

70–80% от окончательно установившихся значений, а оставшиеся 20–30% могли формироваться еще в течение единиц-десятков секунд.

Приведенные экспериментальные данные по динамике формирования отпечатка и дислокационной розетки (см. рисунок) показывают, что времена быстрого нарастания  $d$  и  $l$  коррелируют с длительностью активных стадий кинетики формирования отпечатка, полученных ранее [1–3] методом анализа кинетики непрерывного погружения индентора.

Из таблицы следует, что  $l$  определяется только величиной  $d$  и практически не зависит от продолжительности формирования отпечатка (в пределах точности эксперимента) в диапазоне времен от 1 мс до 30 с.

Скоррелированность величин  $l$  и  $d$ , на наш взгляд, может быть обусловлена двумя причинами: малым временем релаксации дислокационной структуры ( $< 1$  мс) или ее перестройкой при разгрузке отпечатка. Первая причина представляется менее вероятной. Однако химическое травление в силу большой инерционности не позволяет однозначно ответить на



Зависимость размеров диагонали отпечатка индентора (1, 3) и длины лучей дислокационной розетки  $l$  (2, 4) от времени индентирования для LiF (1, 2) и KCl (3, 4). Нагрузка на индентор составляла 0.35 Н.

Зависимость длины краевых лучей дислокационной розетки от времени индентирования при постоянном размере диагонали отпечатка

KCl			LiF		
$d, \mu\text{m}$	$t, \text{s}$	$l, \mu\text{m}$	$d, \mu\text{m}$	$t, \text{s}$	$l, \mu\text{m}$
$30.7 \pm 1.7$	$2 \cdot 10^{-3}$	$81.4 \pm 7.4$	$26.8 \pm 0.8$	$1 \cdot 10^{-3}$	$28.8 \pm 1.3$
$28.7 \pm 1.7$	7	$77.7 \pm 11.8$	$26.1 \pm 0.8$	10	$24.4 \pm 6.0$
$31.3 \pm 1.5$	30	$83.6 \pm 6.3$	–	–	–

вопрос: формируется ли дислокационная розетка в процессе внедрения и выдержки индентора в материале, или же в процесс ее формирования может вносить существенный вклад релаксация материала во время разгрузки и последующего травления? Из общих соображений ясно, что чем меньше продолжительность нагружения, тем более неравновесна структура деформированной зоны и тем более вероятно ее релаксация при снятии нагрузки и последующем химическом травлении, которое требует разгрузки образца и достаточно большого времени (десятки-сотни секунд) для выявления дислокационной структуры кристалла.

В пользу предположения о возможности структурных перестроений дислокационной структуры при разгрузке отпечатка также свидетельствуют данные об изменении картин розетки фотоупругости [4] и величины электрического дипольного момента, регистрируемые в ионных кристаллах при разгрузке отпечатка [5].

Таким образом, полученные экспериментальные данные свидетельствуют о скоррелированности изменения размеров отпечатка и длины краевых лучей срелаксированной дислокационной розетки в достаточно широком интервале времен индентирования (от 1 ms до 30 s).

## Список литературы

- [1] Ю.И. Головин, А.И. Тюрин. Письма в ЖЭТФ **60**, 10, 722 (1994).
- [2] Ю.И. Головин, А.И. Тюрин. Кристаллография **40**, 5, 884 (1995).
- [3] Ю.И. Головин, А.И. Тюрин. Изв. РАН. **59**, 10, 49 (1995).
- [4] Ю.И. Головин, А.А. Шибков, А.И. Тюрин, Ю.С. Боярская, М.С. Кац. ФТТ **30**, 11, 3491 (1988).
- [5] Ю.С. Боярская, Ю.И. Головин, М.С. Кац, А.А. Шибков, А.И. Тюрин. Латв. физ-техн. журн., 5, 41 (1991).