

05;12

Об упругом деформировании индентируемой поверхности щелочно-галогидных кристаллов

© В.А. Федоров, Л.Г. Карьев, А.Н. Глушков

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,
392622 Тамбов, Россия
e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

(Поступило в Редакцию 13 сентября 2001 г. В окончательной редакции 11 декабря 2001 г.)

Экспериментально показано существование при микроиндентировании упругой деформации поверхности нагружаемого участка кристалла, содержащей формирующийся отпечаток. Предложена методика, позволяющая определять величину этой упругой деформации в щелочно-галогидных кристаллах.

Введение

Деформация материала под индентором включает в себя пластическую компоненту, обусловленную необратимым нормальным и тангенциальным перемещением материала, и упругую, под которой принято считать упругое восстановление отпечатка [1]. Последняя проявляется в отличии формы и размеров отпечатка под индентором и после его поднятия. Одним из перспективных методов исследования закономерностей пластической деформации при индентировании является метод, при котором производится непрерывная регистрация глубины погружения индентора по мере увеличения нагрузки [2–6].

Однако в указанных работах при анализе механизмов пластичности, меняющихся по мере внедрения индентора в материал, не учитывается вклад упругой деформации (упругого прогиба поверхности (рис. 1)) в общем перемещении индентора.

В связи с изложенным была поставлена задача разработать метод, позволяющий фиксировать и оценивать количественно величину упругого прогиба поверхности индентируемого участка кристалла при различных нагрузках на индентор.

Материалы и методика эксперимента

В опытах использовали монокристаллы LiF (10^{-3} wt %, Ca^{+2} , Mg^{+2} , Ba^{+2}), NaCl (10^{-2} – 10^{-5} wt %, Fe^{+2}), KCl (10^{-2} – 10^{-5} wt %, Mg^{+2}). Размер образцов $4 \times 8 \times 20$ mm. Эксперименты проводили при температуре 293 K на микротвер-

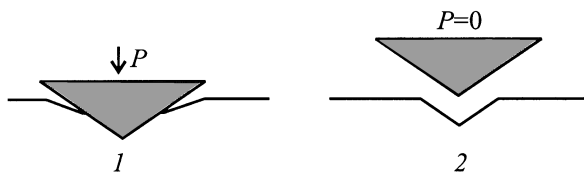


Рис. 1. Упругая деформация поверхности индентируемого участка кристалла. 1 — нагрузка, 2 — разгрузка.

доме PMT-3 со стандартным индентором. Нагрузку на индентор изменяли в пределах $0.1 \leq P \leq 1.0$ N. Во всех опытах использовали свежие поверхности скола образцов. Изменение рельефа поверхности кристаллов контролировали с помощью микроинтерферометра „Линника“ МИИ-4.

Поставленная задача решалась путем индентирования поверхности (001) кристалла в непосредственной близости от берегов искусственно введенных в кристалл трещин.

В первой серии опытов использовали макротрещины скола длиной 10–15 mm, полученные в результате воздействия лезвия ножа на торцевую поверхность образцов (рис.2, a). Во второй — микроскопические трещины в монокристаллах LiF, залегающие в плоскостях {110}, введенные в образец по методике, описанной в [7] (рис. 2, b).

При индентировании поверхность (001) кристалла вблизи берега трещины, подвергнутая воздействию индентора, испытает упругопластический прогиб. Противоположный берег трещины не будет испытывать прогиба, в результате чего на нем останется след от ребра индентора — метка (диагональ отпечатка d ориентирована перпендикулярно плоскости трещины).

Во всех опытах берега трещины (010) до индентирования были расположены в одном горизонтальном уровне.

Результаты экспериментов

Результаты опытов первой серии представлены на рис. 3, a: между отпечатком и меткой от индентора на противоположном берегу трещины расположен не попавший в отпечаток участок поверхности кристалла. Такая картина наблюдается не только вблизи вершины трещины, где расстояние между берегами $l \sim 1 \mu\text{m}$, но и для участков большего ее раскрытия ($l \geq 10 \mu\text{m}$).

Во второй серии опытов, как и в первой, на противоположных индентируемых берегах трещин также наблюдали следы от воздействия на них индентора (рис. 3, b).

Обсуждение результатов

Результаты опытов можно объяснить совокупным перемещением индентруемого участка берега трещины, включающим в себя пластическую и упругую компоненты.

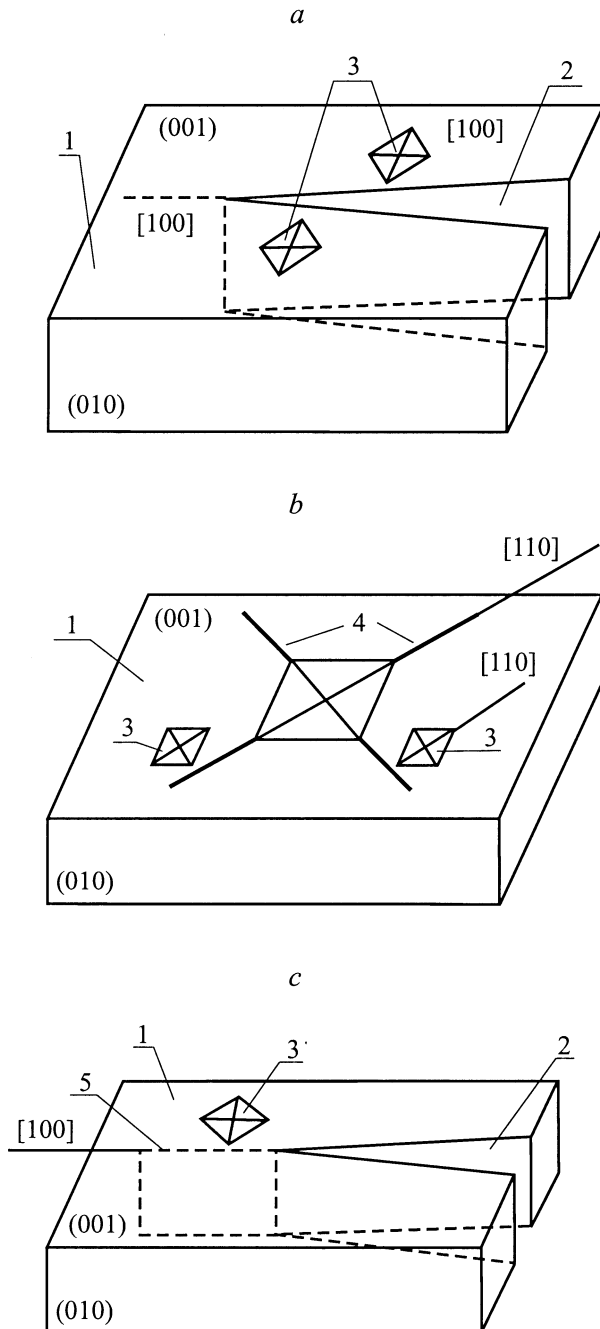


Рис. 2. Схемы проведения первой (а), второй (б) и третьей (с) серии опытов: 1 — индентруемая поверхность (001) кристалла; 2 — трещина скола (010); 3 — отпечатки индентора на испытуемых участках поверхности (001) кристалла; 4 — микротрещины по {110}, полученные по методике [7]; 5 — продолжение следа трещины скола.

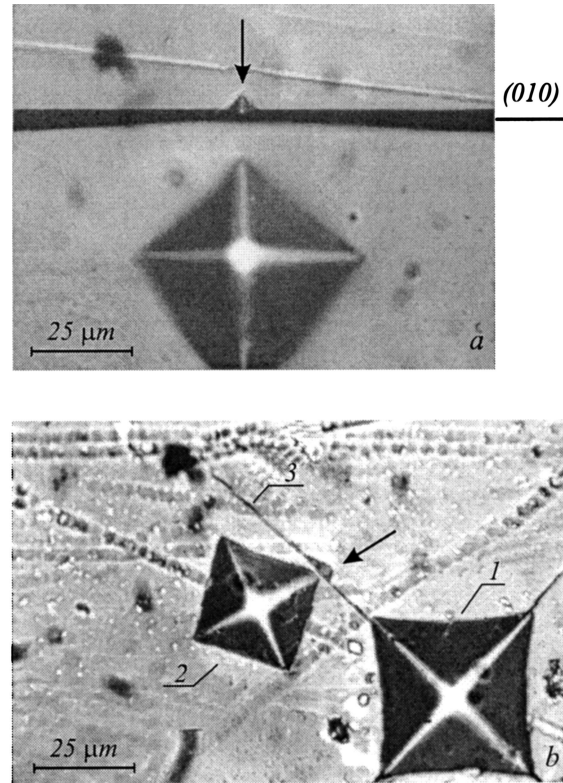


Рис. 3. Индентирование поверхности монокристаллов: а — вблизи макротрещины, NaCl (10^{-2} wt %), $P = 0.3$ N; б — вблизи микротрещины 3 по плоскости {110}, полученной от отпечатка 1; 2 — отпечаток, оставивший метку на противоположном берегу микротрещины, LiF (10^{-3} wt %), $P = 0.5$ N (метки указаны стрелками).

Для практически полного исключения влияния пластической составляющей, присутствующей в предыдущих опытах, была проведена третья серия экспериментов.

На поверхность наблюдения (001) кристаллов NaCl и KCl (у этих кристаллов отсутствует упругое восстановление отпечатка [1]) наносили отпечаток индентором вблизи от продолжения следа плоскости трещины скола по (010), предварительно введенной в кристалл (рис. 2, с). После этого инициировали рост трещины до размеров, соответствующих схеме рис 2, а. Далее, повторно воздействовали индентором в первичный отпечаток при нагрузке и ориентации, соответствующих получению первоначального. При этом на противоположном берегу трещины после разгрузки также наблюдали след от индентора, аналогичный показанному на рис. 3, а.

Из проведенного эксперимента следует, что пластическая деформация кристалла не может быть причиной появления метки при микроиндентировании. Следовательно, результаты опытов можно объяснить упругим прогибом индентруемого участка поверхности под действием нагрузки.

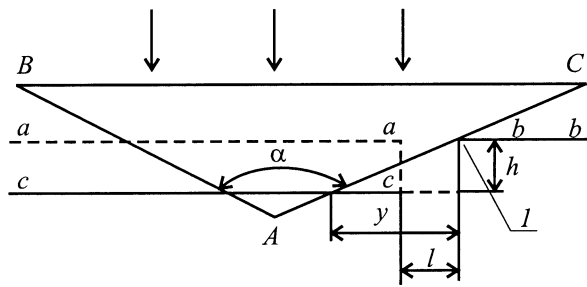


Рис. 4. Схема расчета величины упругой деформации поверхности кристалла под индентором: AB, AC — ребра индентора; y — расстояние от края отпечатка до метки; α — угол между ребрами пирамиды; aa и bb — исходные уровни берегов трещины; cc — уровень поверхности в результате упругого смещения; h — величина упругого смещения; l — метка.

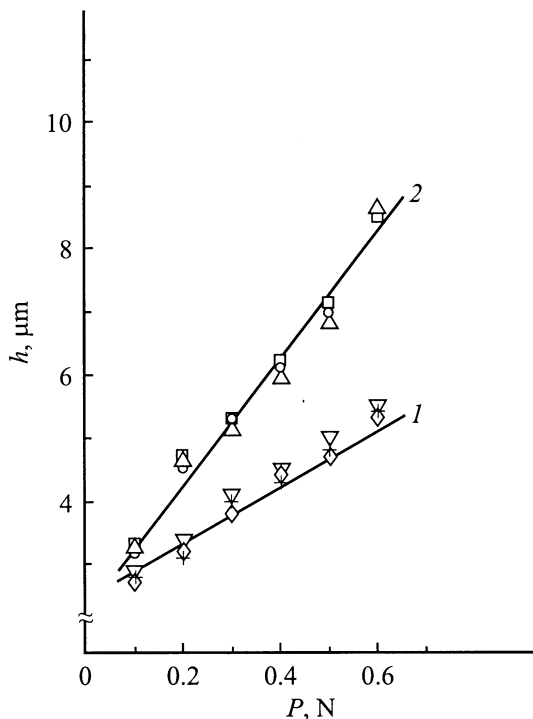


Рис. 5. Зависимость величины упругого перемещения индентируемой поверхности щелочно-галогидных кристаллов с различным содержанием примесей от нагрузки на индентор: 1 — NaCl (∇ — 10^{-5} , \diamond — 10^{-3} , $+$ — 10^{-2} wt %); 2 — KCl (\square — 10^{-5} , \circ — 10^{-3} , \triangle — 10^{-2} wt %).

Оценить величину упругой деформации (h) (рис. 4) кристалла под индентором можно из выражения

$$h = y \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}.$$

Если β — угол между гранями пирамиды ($\beta = 136^\circ$), тогда, выразив α через β , окончательно получим

$$h \approx 0.29 \cdot y.$$

Таким образом, экспериментально определив y , получаем величину упругого прогиба поверхности кристалла

под индентором. Существенно отметить следующее: зависимости $h(P)$, полученные по методикам, соответствующим рис. 2, a и c , практически совпадают.

На рис. 5 представлены зависимости $h(P)$ для монокристаллов NaCl и KCl, у которых отсутствует упругое восстановление отпечатка [1]. Ошибка измерений этих величин не более 10%. Видно, что различие концентрации примесей в кристаллах почти не влияет на величину упругой деформации, однако для кристаллов с большим значением модуля Юнга (NaCl) величина h заметно меньше, чем для образцов с меньшим значением модуля Юнга (KCl).

В случае индентирования участков поверхности образца, удаленных от края кристалла, полученные значения упругой деформации (h), по-видимому, несколько меньше.

Выводы

1. При индентировании поверхности кристаллов общее перемещение индентора складывается за счет 1) пластического течения материала (формирование отпечатка); 2) упругого прогиба нагружаемого участка поверхности вместе с формирующимся отпечатком. По величине эти перемещения соизмеримы.

2. При индентировании кристалла отпечаток формируется в упруго деформированной области образца, что, по-видимому, влияет на численные оценки значений не только микротвердости, но и активационных характеристик процессов пластичности под индентором.

Список литературы

- [1] Боярская Ю.С., Грабко Д.З., Кац М.С. Физика процессов микроиндентирования. Кишинев: Штиинца, 1986. 296 с.
- [2] Булычев С.И., Алехин В.П. и др. // Физика и хим. обраб. материалов. 1981. № 2. С. 110–116.
- [3] Алехин В.П., Берман Г.С. и др. // Зав. лаб. 1972. Т. 38. № 4. С. 488–493.
- [4] Дегтярев В.И., Ланвешкин В.Я. // Зав. лаб. 1977. Т. 43. № 8. С. 999–1003.
- [5] Головин Ю.И., Тюрин А.И. // Вестник ТГУ. 2000. Т. 5. № 2–3. С. 249–251.
- [6] Орлов В.И., Иунин и др. // Вестник ТГУ. 2000. Т. 5. № 2–3. С. 367–369.
- [7] Карьев Л.Г., Федоров В.А. и др. // Вестник ТГУ. 2000. Т. 5. № 2–3. С. 378–381.