

## Залечивание трещин, остановившихся при несимметричном сколе в щелочно-галогидных кристаллах и кальците

© В.А. Федоров, Т.Н. Плужникова, Ю.И. Тялин

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

E-mail: feodorov@feodorov.tstu.ru

(Поступила в окончательном виде 30 сентября 1999 г.)

Исследованы пластические зоны у вершин трещин. Предложены возможные механизмы самозалечивания трещин. Показано, что нагрев и излучение видимого диапазона влияют на развитие микропластических сдвигов в вершине трещины. Установлен экспоненциальный характер зависимостей изменения плотности дислокаций у вершин трещин от температуры и времени экспозиции излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 98-01-00617), а также Министерства общего и профессионального образования (грант по фундаментальным исследованиям в области естественных наук № 97-0-4.3-185).

При асимметричном сколе кристаллов со спайностью высока вероятность откола более узкой части образца за счет перехода трещины из плоскости (100) в ортогональную ей плоскость (001) [1]. При этом наблюдается самозалечивание трещины, оставшейся в кристалле после откола [2].

Настоящая работа посвящена исследованию морфологии пластических зон, формирующихся у вершины трещины при ее остановке, установлению механизма самопроизвольного залечивания трещин и влияния на это процесс нагрева и излучения видимого диапазона.

Исследование проводили на щелочно-галогидных кристаллах (ЩГК) LiF, NaCl, KCl и на CaCO<sub>3</sub>. Содержание примесей в кристаллах не превышало  $\sim 10^{-3}$ . Образцы с размерами  $15 \times 30 \times 2$  mm скалывали по плоскости (100) на некотором расстоянии  $S_1$  от оси симметрии кристалла (см. вставку к рис. 2). Степень асимметричности скола определяли отношением размера  $S_1$  к полуширине образца  $S_2/2$ . Скол осуществляли тарированным ударом с энергией  $\sim 17$  mJ. Затем кристалл дополнительно раскалывали на две части по плоскости (010) для получения контрольного и испытываемого образцов.

Часть образцов нагревали в печи в интервале температур от 300 до 365 К. Другую часть подвергали освещению вольфрамовой лампой накаливания мощностью 100 W с максимумом в спектре излучения, приходящимся на длину волны  $\lambda = 1 \mu\text{m}$  ( $E = 1.24$  eV), одновременно нагревающей образцы до температуры  $\sim 355$  К. Время воздействия варьировалось от 2 до 1400 часов. Освещенность поверхности образцов составляла  $\sim 15$  klx.

Экспериментально установлено, что при остановке исходной трещины боковой откол в ЩГК происходит преимущественно по плоскости (001) ( $\sim 73\%$ ) и с меньшей вероятностью по плоскости (101) ( $\sim 22\%$ ). В кальците боковой откол проходит только по плоскости (001). Прямоугольный откол зарождается, как правило, на расстоянии 2–5 mm от вершины исходной трещины. Откол же под углом  $45^\circ$  развивается непосредственно из верши-

ны остановившейся трещины. Оставшаяся в кристалле трещина после откола и разгрузки образца чаще всего самозалечивается.

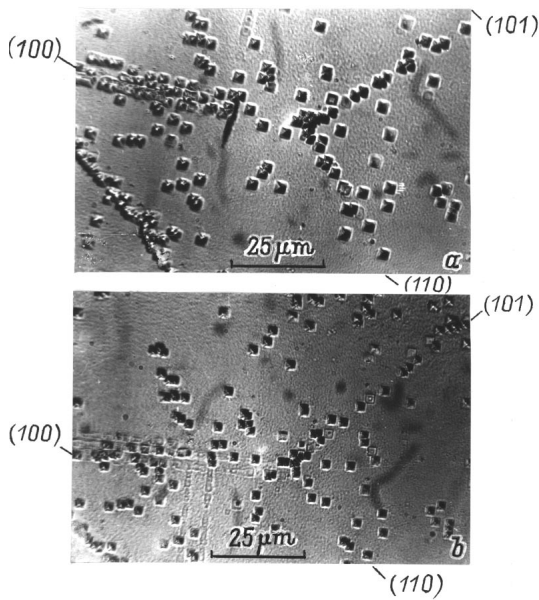
Длина залеченного участка трещины уменьшается при увеличении степени асимметричности скола. Наблюдались и незалеченные трещины. В вершинах таких трещин имела место значительная микропластичность. Пластическое вскрытие  $\delta = (nb\sqrt{2})/2$  для них превышало 40 nm ( $b$  — вектор Бюргерса дислокаций [100] {101},  $n$  — число дислокаций в полосе скольжения). В CaCO<sub>3</sub> микропластичность в вершине трещин отсутствует. В единичных случаях в ЩГК, как и в CaCO<sub>3</sub>, дислокационных "розеток" в вершине трещины не наблюдалось.

При увеличении асимметричности скола в ЩГК имеет место тенденция к понижению симметрии фигур травления относительно плоскости трещин. Уменьшается число лучей и изменяется их длина, а также соотношение размеров лучей, лежащих по разные стороны от плоскости трещины. Отмечено также увеличение плотности дислокаций у вершины трещины от  $10^{10} \text{ m}^{-2}$  при степени асимметричности 0.2 до  $3 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-2}$  при степени асимметричности 0.8. Плотность дислокаций в лучах "розеток" экспоненциально спадает по мере удаления от вершины трещины. В непосредственной близости от вершины трещины имеется ограниченная зона, свободная от дислокаций.

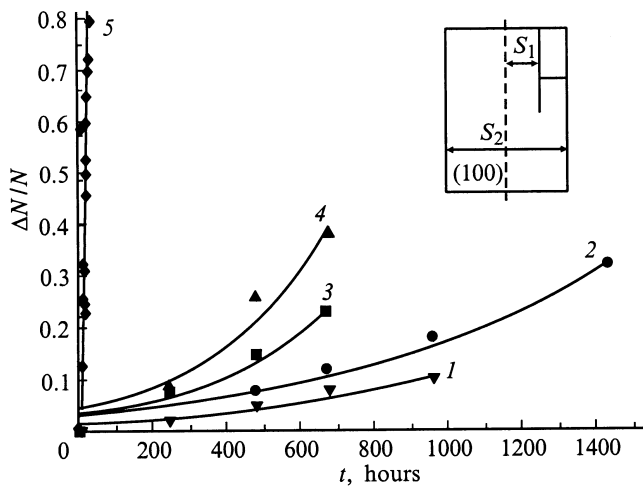
Отжиг или длительная выдержка при комнатной температуре не оказывают влияния на длину залеченного участка, но существенно изменяют дислокационную картину у вершины трещины.

Такой же результат получается и при одновременном отжиге и воздействии излучения видимого диапазона (рис. 1), но в этом случае изменения дислокационной структуры происходят интенсивнее (рис. 2).

Рассматривая деформацию частей разрушаемого кристалла в балочном приближении, можно утверждать, что более узкая часть кристалла подвержена большей деформации и, как следствие, предпочтительнее для от-



**Рис. 1.** Дислокационная структура у вершин трещин скола в кристаллах LiF. *a* — контрольный кристалл при комнатной температуре; *b* — кристалл после воздействия излучения оптического диапазона  $E = 1.24 \text{ eV}$ ,  $T = 355 \text{ K}$ ,  $15 \text{ klx}$ ,  $20 \text{ часов}$ .



**Рис. 2.** Относительное изменение числа дислокаций у вершины трещины ( $\Delta N/N$ ) в зависимости от времени воздействия ( $t$ ): 1 —  $T = 263 \text{ K}$ , 2 —  $T = 288 \text{ K}$ , 3 —  $T = 325 \text{ K}$ , 4 —  $T = 365 \text{ K}$ , 5 — освещение и одновременный нагрев. На вставке — схема скола кристаллов.

кола. Зарождение трещин откола возможно на различных дефектах типа ступеней скола, субграницах. Интенсивная релаксация напряжений в вершине трещин может проходить за счет скольжения по плоскостям (101). Тогда оказывается возможным откол под углом  $45^\circ$  за счет охрупчивания материала в полосе скольжения.

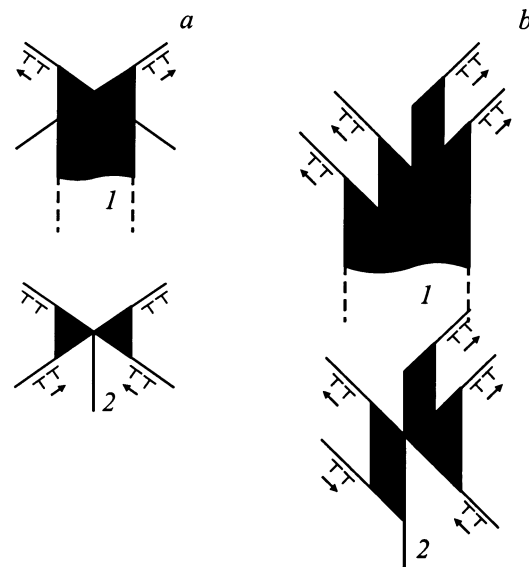
Неоднородное распределение напряжений в вершине трещины влияет на развитие микропластических сдвигов

в этой области. Увеличение асимметричности скола и, как следствие, неоднородности поля напряжений сопровождается изменением фигур травления в вершине трещины от симметричных к несимметричным, содержащим преимущественно одну из систем скольжения.

Механизм залечивания трещин представляется следующим.

Вследствие бокового откола начинается разгрузка образца и исходная трещина тормозится. Пока еще образец остается нагруженным, в вершине трещины имеет место заметная эмиссия дислокаций [3]. В зависимости от их числа и геометрии скольжения создается различное по величине пластическое вскрытие  $\delta$  трещины. Некоторые из возможных форм вершин таких трещин приведены на рис. 3.

В какой-то момент времени эмиссия дислокаций прекратится и по мере дальнейшего уменьшения нагрузки начнется первая "быстрая" стадия залечивания — пластическое закрытие трещины. Оно может развиваться как за счет обратимого сваливания в нее испущенных дислокаций, так и за счет движения новых дислокаций противоположного знака по соседним параллельным плоскостям скольжения или им перпендикулярным плоскостям (что наблюдается значительно реже), если движение дислокаций по первичной полосе скольжения затруднительно. Первое обусловлено действием сил отталкивания между дислокациями, лежащими в одной плоскости скольжения, и сил изображения, второе — действием упругих напряжений в образце (рис. 3). Если результирующее (конечное) вскрытие  $\delta$  окажется достаточно малым,  $\delta < 40 \text{ nm}$ , то части кристалла, двигаясь по инерции навстречу друг другу, схлопываются. Поскольку



**Рис. 3.** Схемы форм вершин самозалечившихся трещин: без относительного сдвига поверхностей трещин (*a*); с относительным сдвигом (*b*). 1 — вершина пластического вскрытия трещин, 2 — вершина трещины после первой стадии — "быстрого залечивания".

процесс развивается достаточно быстро, то большая часть поверхности трещины остается ювенильной, что также способствует восстановлению ионных связей. Совершенство залечивания будет, очевидно, определяться разностью испущенных и "новых" дислокаций (и геометрией их скольжения). При сравнимости этих величин на месте фронта остановившейся вершины трещины сохранится микропустота в виде узкого канала (рис. 3, а, поз. 2). Размеры этого канала в дальнейшем могут быть уменьшены (2-я стадия залечивания), если в результате какого-либо внешнего воздействия часть оставшихся дислокаций будет поглощена им. В наших экспериментах такими стимулирующими факторами служили нагрев образца и его облучение в оптическом диапазоне длин волн, влияющими на подвижность дислокаций и сопротивление их движению.

В "быстрой" стадии залечивания, очевидно, немаловажным фактором является совпадение рельефа соединяемых поверхностей, которое может быть идеальным.

В случае значительной пластичности в вершине трещины ее раскрытие  $\delta$  оказывается достаточно велико,  $\delta > 40 \text{ nm}$ , и за счет описанных выше процессов возможно лишь частичное сближение берегов вскрытия. Необходимо внешнее силовое воздействие, направленное на сближение поверхностей, которые уже не будут ювенильными. После их соединения на поверхности наблюдения будут выявляться строчки обычных и реанимирующих дислокаций [4–6].

Наличие перед вершиной трещины зон, свободных от дислокаций, обусловлено соотношением сил трения, удерживающих дислокации в полосе скольжения, сил отталкивания и изображения.

При отжиге образца активизируются процессы залечивания за счет увеличивающейся подвижности дислокаций, обусловленной температурной зависимостью напряжения трения.

Воздействие же излучения видимого диапазона приводит к изменению энергетического состояния дислокаций и стопоров, фотоподвижности дислокаций [7,8]. Последняя зависит от интенсивности излучения и спектрального состава действующего света. Одновременное воздействие света и нагрев усиливают эффект залечивания.

## Список литературы

- [1] Дж.Дж. Гилман. Скол, пластичность и вязкость кристаллов. Атомный механизм разрушения. Металлургия, М. (1963). 220 с.
- [2] В.А. Федоров, И.В. Ушаков, Т.Н. Плужникова. Вестн. Тамбовского ун-та **2**, 3, 291 (1997).
- [3] Н.В. Дорохова. Исследование процессов формирования фрактологического рельефа и его влияние на залечивание трещин в ряде монокристаллов. Канд. дис. (1994). 154 с.
- [4] В.М. Финкель, Б.Б. Конкин. ФТТ **25**, 5, 1553 (1983).

- [5] В.М. Финкель, О.Г. Сергеева, В.В. Шегай. Кристаллография **36**, 1, 170 (1991).
- [6] В.М. Финкель, О.Г. Сергеева. ФТТ **29**, 3, 857 (1987).
- [7] Г.А. Ермаков, Э.М. Надгорный. Докл. АН СССР **181**, 1, 76 (1968).
- [8] С.И. Бредихин, Ю.А. Осипьян, С.З. Шмурак. ЖЭТФ **68**, 2, 750 (1975).