

Залечивание трещин в щелочно-галогидных кристаллах

© Ю.И. Тялин, В.А. Тялина, В.А. Федоров, М.В. Чемёркина, А.А. Бутягин

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

E-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

(Поступила в Редакцию 23 января 2004 г.)

Изучено залечивание микро- и макротрещин при локальном нагреве и рентгеновском облучении монокристаллов LiF. Описаны основные особенности залечивания, связанные с локальным характером воздействия. Оценен вклад пластической зоны, формирующейся при остановке и залечивании трещины, в прочность кристаллов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-01-01173).

К настоящему времени опубликовано достаточно большое число работ, посвященных исследованию залечивания трещин, которое в основном наблюдалось в ионных кристаллах с хорошо выраженными плоскостями спайности [1]. Описаны основные особенности процесса залечивания под действием сжимающих нагрузок [2] и самозалечивание трещин, имеющее место при остановке трещины и быстрой разгрузке образца (например, за счет бокового откола) [3,4]. Определенное внимание уделялось влиянию внешних факторов (нагрев, электрическое поле) на восстановление сплошности кристаллов и их прочностных свойств [5].

В данной работе изучалась возможность залечивания трещины в кристаллах LiF при локальном механическом воздействии на ее вершину. Локальная нагрузка в вершине трещины создавалась в результате нагрева или рентгеновского облучения материала в малой окрестности вершины трещины. В этом случае в зоне воздействия образуются сжимающие напряжения, которые можно использовать для восстановления нарушенной сплошности. Отличие данных схем нагружения образцов состоит в том, что температурные напряжения после охлаждения образца исчезают, а напряжения, созданные при облучении, могут существовать в кристалле достаточно долго и удерживать трещину в закрытом состоянии даже в том случае, если сплошность материала не восстановится.

Основными задачами работы в связи с этим являлось: 1) выбор режимов и схем локального воздействия на вершину трещины, обеспечивающих восстановление сплошности материала в вершине трещины; 2) разработка методики и проведение прямых измерений прочности образцов с залеченной трещиной.

1. Методика эксперимента

Из крупных блоков монокристаллов LiF по плоскостям спайности выкалывали призматические образцы размером $3 \times 8 \times 40$ мм. В образцах создавалась зародышевая трещина длиной $L = 20\text{--}30$ мм в плос-

кости (001). Трещина располагалась симметрично относительно широкой грани образца.

Дислокационная структура вершины остановившейся трещины выявлялась химическим травлением образцов в водном растворе хлористого железа FeCl_3 . Травлению подвергались только свежие поверхности образца. Для этого исходный образец раскалывался на две части по плоскости (100). На одной части фиксировалась исходная дислокационная структура в вершине трещины, на другой — структура после залечивания.

Получение нужной длины трещины достигалось скачкообразным продвижением ее под действием малой ударной нагрузки. Длина отдельного скачка трещины при этом составляла 2–3 мм. При таком характере распространения трещины в местах ее остановки образуются линии скольжения в виде характерного дислокационного „креста“.

Использовалось несколько схем залечивания трещины: локальный нагрев, облучение, сжатие. Для нагрева образцов использовался медный стержень диаметром 4 мм, температуру которого изменяли от 100 до 350°C. Применялся односторонний и двухсторонний нагрев. Облучение образцов проводилось на аппарате ДРОН-2 при напряжении на трубке 25–30 кВ и токе 8–10 мА. Этим параметрам облучения соответствует доза 0.05 R/s. Сжатие образцов нагрузкой до 20 N осуществлялось либо с помощью призмы, либо в струбине. В некоторых опытах воздействие было комбинированным — слегка поджатый образец локально нагревался в области вершины трещины.

Часть экспериментов проводилась на микротрещинах, образующихся при индентировании кристаллов [6]. Такие трещины имеют дискообразную форму и лежат в плоскостях (110). В этих экспериментах оптическим методом измерялась длина трещин до и после воздействия на образцы.

Для оценки качества залечивания макротрещин проводились механические испытания образцов с исходной и залеченной трещиной. При этом фиксировались длина трещины L и критическое усилие разрыва образца F . По этим данным определялся коэффициент интенсивности

напряжений в вершине трещины [7]

$$K_1 = \frac{2\sqrt{3}LF}{wh\sqrt{h}},$$

где h — полуширина образца, w — его толщина.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Залечивание микротрещин. Для получения микротрещин при индентировании использовались нагрузки 0,5, 1 и 2 N. При таких нагрузках характерный размер образующихся трещин составлял 20–60 μm (рис. 1). На небольшой площадке зарождалось несколько микротрещин. Затем ее подвергали либо нагреву, либо рентгеновскому облучению через свинцовую маску с отверстием диаметром 2 мм. Фиксировались размеры трещин до и после воздействия. В опытах по локальному тепловому воздействию мы не обнаружили изменения длин микротрещин. При рентгеновском облучении отмечено небольшое уменьшение их размеров (см. таблицу).

Изменение размеров микротрещин при локальном облучении (μm)

<i>a</i>	91	77	79	65	42	103	112	78	161	148	124	192
<i>b</i>	82	70	79	65	39	91	108	75	155	140	123	184

Примечание. *a* — размер трещины до воздействия, *b* — после воздействия.

Образцы облучались в течение 2 часов. При меньших выдержках (порядка 10^3 s) какого-либо эффекта отмечено не было. Следовательно, при больших дозах облучения эффект будет усиливаться. Хотя отсутствие залечивания при температурном воздействии говорит о том, что микротрещины, образующиеся при индентировании, являются достаточно „жесткими“. Это может быть связано с геометрией их поверхностей $\{110\}$, не являющихся плоскостями спайности. Трещины в таких плоскостях имеют сильно развитый поверхностный рельеф, препятствующий залечиванию. Травление облученных образцов не выявляло канавок, характерных для участков залеченных трещин. Это говорит о том, что в данном случае имеет место только визуальное уменьшение размеров трещины (восстанавливается оптический контакт).

2.2 Залечивание макротрещин. Как правило, при однократном тепловом воздействии на образец исходная трещина закрывается на участке размером порядка зоны воздействия (2–3 мм). Чаще всего трещина залечивается полностью по всей указанной длине. Фронт исходной трещины не является прямолинейным, а слегка изогнут в сторону движения трещины. С ростом толщины образца фронт трещины распрямляется, но овальная форма сохраняется для всех размеров кристаллов, использующихся в наших экспериментах (рис. 2, *a*).

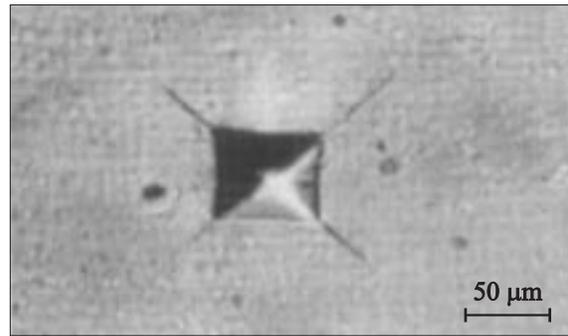


Рис. 1. Микротрещины при индентировании пирамидой Виккерса.

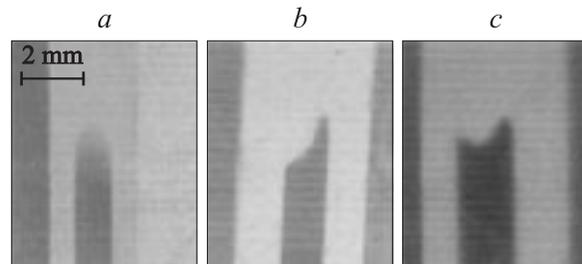


Рис. 2. Форма фронта исходной и залеченной трещин: *a* — исходная трещина, *b* — односторонний нагрев, *c* — двухсторонний нагрев.

В части экспериментов использовался односторонний нагрев образца. Геометрические особенности залечивания трещин в этом случае иллюстрирует рис. 2, *b*. Видно, что по глубине образца трещина залечивается не одинаково.

Длина залеченного участка, примыкающего к нагревающему стержню, больше, чем в глубине и на противоположной стороне образца. Эта неоднородность проявляется тем ярче, чем больше толщина образца. Более однородное залечивание получается при двухстороннем нагреве образца (рис. 2, *c*). В этом случае образец более равномерно прогревается по глубине, и вся вершина трещины попадает в зону сжимающих напряжений. Отмечено, что фронт залечивания трещины изогнут в сторону, противоположную исходной. Это может быть связано с тем, что в центре образца рельефы противоположных берегов трещины совпадают лучше, чем на краях. На краю образца чаще наблюдаются микросколы, которые могут препятствовать сближению берегов трещины и ее залечиванию.

Предпринималась попытка залечить трещину на большем участке. Для этого зону нагрева смещали к началу трещины по мере ее залечивания. Фрагмент залеченной трещины приведен на рис. 3. Залечивание уже не является столь совершенным, как в первом случае. С удалением от вершины качество залечивания снижается. Незалеченные участки могут встречаться как у края образца, так и в его центре.

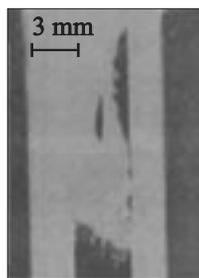


Рис. 3. Поверхность залеченной трещины при многократном локальном тепловом воздействии.

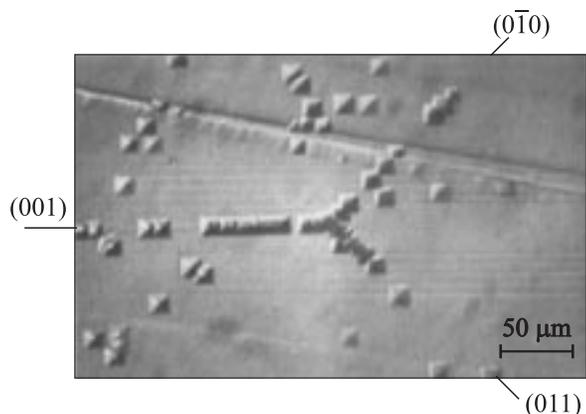


Рис. 4. Дислокационная структура вершины залеченной трещины.

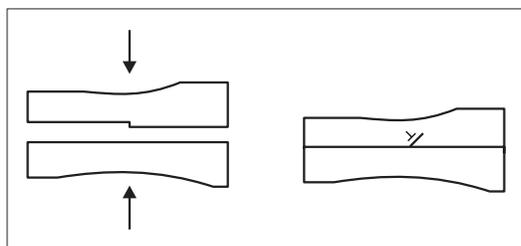


Рис. 5. Схема образования ямок травления на траектории залеченной трещины.

При малых температурах нагрева и в случае „жестких“ кристаллов закрытие трещины идет в результате обратимого скольжения по тем же полосам и линиям, которые формируются в процессе остановки трещины. В этом случае появление новых интенсивных зон пластической деформации не наблюдалось. В „мягких“ кристаллах и при максимальных температурах нагрева зоны термического влияния деформируются значительно. Отмечается не только увеличение размеров полос в вершине исходной трещины, но и интенсивная пластическая деформация в зоне термического контакта по другим плоскостям скольжения.

Анализ картин травления образцов с залечившимися трещинами показывает, что в большинстве образцов

при залечивании восстанавливается не только оптический контакт, но и сцепление между противоположными берегами трещины. Причем качество залечивания выше в областях, примыкающих к вершине трещины. Здесь травлением в некоторых случаях выявляются лишь единичные ямки на следе залечившейся трещины (рис. 4). Последние можно рассматривать как результат пластического смятия несовпадений субатомных размеров (рис. 5).

По мере удаления от вершины число таких несовпадений возрастает. Формируются группы ямок травления, строчки и канавки травления. И, наконец, сумма рельефных несовпадений становится настолько большой, что для залечивания макронесовпадений необходимо существенно повышать напряжения в зоне воздействия. При этом уже будет иметь место деформация не только в окрестности трещины, но и в объеме кристалла. В наших экспериментах мы не заходили в область таких нагрузок и ограничивались только напряжениями, не создающими заметной деформации всего образца.

Представлялось интересным выяснить, насколько полно восстанавливаются прочностные свойства кристаллов. Для этого образцы с залеченной трещиной разрушались по схеме нормального разрыва. При этом фиксировалось усилие критического разрыва F образца с трещиной заданной длины. Результаты экспериментов для двух серий образцов с исходными и залеченными трещинами приведены на рис. 6.

Отметим, что усилия разрыва образца с залеченной трещиной выше, чем у необработанных образцов. На рис. 6 приведены усилия разрыва в зависимости от длины исходных залеченной и незалеченной трещин. Первая и естественная причина указанного различия — это сокращение длины трещины. Это связано с тем, что у залеченной трещины не всегда можно определить величину L , так как фронт ее сильно отличается от прямолинейного.

Однако если по изменению критического усилия определить эффективную длину залечивания ΔL , то она, как

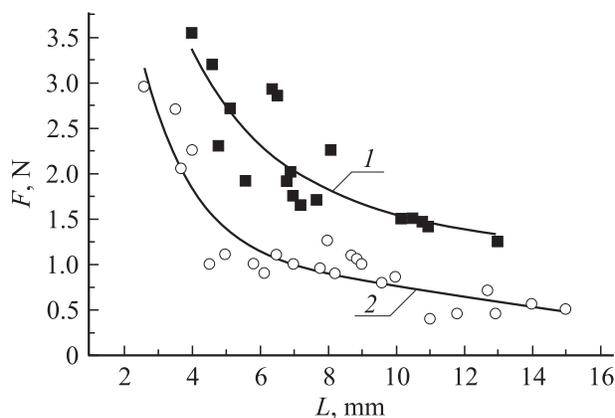


Рис. 6. Критические усилия разрыва образцов с трещиной. 1 — образцы с залеченной трещиной, 2 — образцы с незалеченной трещиной.

правило, несколько превышает те средние значения ΔL , которые наблюдаются в эксперименте. Иными словами, помимо сокращения длины трещины существует и иная причина некоторого упрочнения образцов с залеченной трещиной. В частности, ею может быть взаимодействие трещины с пластической зоной, формируемой при ее остановке и залечивании.

Представим последнюю двумя линиями скольжения в полуплоскостях $(0\bar{1}1)$ и (011) , обращенных в сторону начала трещины, и дисклинационным диполем в вершине залеченной трещины в плоскости (001) . Тогда изменение коэффициента интенсивности напряжения ΔK_1 за счет упругих напряжений пластической зоны будет равно

$$\Delta K_1 = \frac{2\sqrt{3}L}{wh\sqrt{h}} \int_{\Delta L}^{\Delta L+L} \sigma_{xx}(x) dx,$$

где σ_{xx} — напряжения на берегах трещины, ΔL — длина залеченной области. При определенных условиях ($l < \Delta L\sqrt{2}$, где l — длина линий скольжения), которые выполняются практически всегда в случае самопроизвольной остановки трещины [8], напряжения σ_{xx} будут сжимающими. Изменение ΔK_1 можно представить в следующем виде:

$$\Delta K_1 = \frac{2\sqrt{6}LAN}{wh\sqrt{h}} \ln\left(1 + \frac{L}{\Delta L}\right)\alpha,$$

где $A = Gb/2\pi(1 - \nu)$, G — модуль сдвига, b — вектор Бюргера дислокаций, ν — коэффициент Пуассона, n — число дислокаций в линии скольжения, α — численный коэффициент, определяемый геометрией пластической зоны ($\alpha < 1$).

Для достаточно больших n (> 100) изменение ΔK_1 может достигать десятков процентов. Причем упрочняющий эффект может быть сменен разупрочняющим при других способах остановки трещины, когда пластическое течение будет более интенсивным в полуплоскостях $(0\bar{1}1)$ и (011) , лежащих перед ее вершиной.

Список литературы

- [1] М.П. Шаскольская, Ван-Янь-Энь, Гу-Чжу-Чжао. Кристаллография **6**, 4, 605 (1961).
- [2] Ю.В. Грдина, В.В. Неверов. Кристаллография **12**, 3, 493 (1967).
- [3] В.М. Финкель, О.Г. Сергеева. ФТТ **29**, 3, 857 (1987).
- [4] В.А. Федоров, Т.Н. Плужникова, Ю.И. Тялин. ФТТ **42**, 4, 685 (2000).
- [5] В.А. Федоров, Л.Г. Карьев, А.М. Николокин, В.П. Иванов. ФТТ **38**, 2, 664 (1996).
- [6] В.А. Федоров, Л.Г. Карьев. Физика прочности и пластичности материалов: Тез. докл. XIV Междунар. конф. Самара (1995). С. 72.
- [7] Г.П. Черепанов. Механика хрупкого разрушения. Наука, М. (1974). С. 640.
- [8] Ю.И. Тялин, В.А. Федоров, Т.Н. Плужникова, В.А. Куранова. ФТТ **42**, 7, 1253 (2000).