

УДК 539.3

ПЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ И ФОРМА ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ В ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛАХ

© Ю.И. Тялин, В.А. Тялина

Ключевые слова: трещина; вершина трещины; пластичность.

Исследуется влияние локального пластического течения на форму вершины трещины в кристаллах. Показано, что контур пластической трещины зависит от числа линий скольжения и интенсивности пластической деформации в них. При этом собственно вершина трещины формируется только одной из них, ближайшей к вершине. В щелочно-галогидных кристаллах наиболее вероятной формой вершины является треугольная с углом раствора, определяемым числом дислокаций в линии скольжения и ее шириной.

Торможение или полная остановка трещин сопровождаются пластической деформацией в ее вершине [1–3]. В ЩГК пластическая зона формируется в результате развития скольжения по плоскостям, расположенным под углом 45° к поверхности скола. При этом наблюдаются как симметричные относительно направления распространения и плоскости трещины, так и несимметричные линии и полосы скольжения. В частности, для скачкообразно продвигающихся трещин симметрия дислокационной структуры чаще нарушается за счет более интенсивного скольжения в полуплоскостях, примыкающих к трещине [4]. В настоящей работе исследуется связь дислокационной структуры пластической зоны с формой вершины трещины в кристаллах фтористого лития.

Эксперименты проводились на призматических образцах монокристаллов LiF размером $4 \times 8 \times 40$ мм. В образце создавалась зародышевая трещина, которая затем скачкообразно продвигалась через кристалл под действием импульсной нагрузки. Дислокационная структура выявлялась химическим травлением. Рельеф поверхности скола изучался с помощью оптической и силовой микроскопии. Для измерения высоты ступенек использовали интерференционный профилометр с латеральным разрешением порядка единиц нанометров.

Каждая испущенная вершиной трещины дислокация создает на поверхности скола микроступеньку высотой $h_1 = \sqrt{2}b/2$, где b – величина вектора Бюргерса дислокаций (рис. 1). Соответственно, при формировании линии или линий скольжения пластическое вскрытие трещины составит $\delta = Nh_1$, где N – общее число испущенных дислокаций. Форма вершины при этом будет зависеть от того, в каких из плоскостей скольжения произошел пластический сдвиг. При скольжении в одной из плоскостей форма вершины будет определяться геометрией ступенек на поверхности трещины (рис. 1). В случае скольжения по плоскостям 2 и 3 трещина примет форму щели высотой δ с углом в вершине $2\alpha = 90^\circ$.

Для других вариантов дислокационной структуры ситуация не будет столь определенной. Если имеет место скольжение по плоскостям 2 и 1, то здесь конечный результат может быть представлен несколькими

конфигурациями, две из которых приведены на рис. 2. Они соответствуют линиям скольжения в плоскостях 1 и 2 с неодинаковым числом дислокаций $N_2 > N_1$. Более вероятной представляется конфигурация б). Согласно [1], большему числу дислокаций в линии скольжения соответствуют и большие напряжения, инициирующие скольжение. Поэтому линия с большим N будет сформирована первой. В зависимости от кинетики пластической деформации форма контура может несколько измениться. При одновременном скольжении в обеих плоскостях прямолинейные отрезки могут быть частично фрагментированы с образованием лестничной структуры. Но средний угол раствора α в вершине будет определяться только количеством дислокаций в линиях скольжения

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{N_1 + N_2}{N_1 - N_2}.$$

При изменении величин N_1 и N_2 угол α будет меняться в пределах от $\pi/4$ ($N_1 = 0$) до $3\pi/4$ ($N_2 = 0$).

Аналогично можно определить угол раствора для скольжения в плоскостях 3 и 4 и общий угол раствора в вершине трещины.

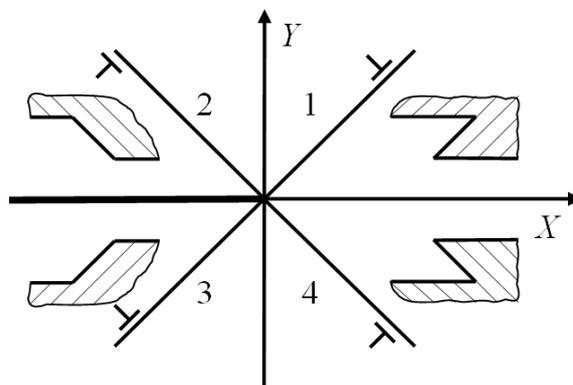


Рис. 1. Схема пластического течения в вершине трещины (трещина расположена на отрицательной полуоси X)

Таким образом, если пластическая зона представлена отдельными линиями скольжения, то профиль вершины трещины может состоять из нескольких прямолинейных отрезков, расположенных под фиксированными углами к поверхности трещины. Отметим, что все вышесказанное будет иметь место, если все линии скольжения зарождаются непосредственно в вершине трещины. В противоположном случае смещение линий скольжения друг относительно друга приведет к горизонтальному сдвигу наклонных участков в точке M (рис. 2). Вершина трещины в таком случае будет формироваться только одной линией скольжения, и головная ее часть может быть представлена половиной трапеции с углом у основания 45° .

Точно такие же соображения будут иметь место, если каждая из одиночных линий будет заменена широкой полосой скольжения, состоящей из нескольких линий. В этом случае профиль кончика трещины также будет формироваться только одной линией полосы, выходящей из вершины. Ступеньки, созданные остальными линиями, будут разделены прямолинейными горизонтальными участками, образующими террасообразную структуру. Размер горизонтальных фрагментов в ней будет определяться расстоянием между соседними линиями скольжения, а высоты ступенек – числом дислокаций в них.

На рис. 3 приведены оптическое изображение ступени, формирующейся при остановке трещины, и дислокационная структура полосы скольжения, образующейся в вершине трещины. Движению трещины до

остановки соответствует верхняя часть рисунка. Ступени скола на нем параллельны направлению движения трещины. При возобновлении движения ступеньки сначала веерообразно расходятся в обе стороны от центральной линии на плоскости скола, а затем их регулярная структура восстанавливается после прохождения трещиной расстояния $\sim(1 \div 5)$ мм. Общее количество дислокаций в полосе скольжения $n \approx 100$.

Для экспериментально наблюдаемых значений n числа дислокаций, испускаемых вершиной трещины, и результатов моделирования [1, 4] средняя величина пластического вскрытия трещины составляет значения примерно от единиц до $20 \div 60$ нм. Вместе со ступеньками такой величины зачастую обнаруживаются и ступеньки, высота которых существенно превышает данные значения. Ступеньки большего размера могут быть связаны с переходом фронта трещины в соседние плоскости спайности. В этом случае дислокационные ступеньки могут поглощаться более крупными ступеньками, получающимися при отклонении трещины от первоначальной плоскости ее распространения. Различие обоих типов ступенек можно установить по тому, как соотносятся высоты поверхностей разрушения до и после остановки трещины на зеркальных поверхностях трещины. Если поверхность трещины отклоняется от первоначальной плоскости на расстоянии, меньшее δ , то для обеих частей кристалла поверхности трещины после остановки будут располагаться выше поверхностей скола до остановки.

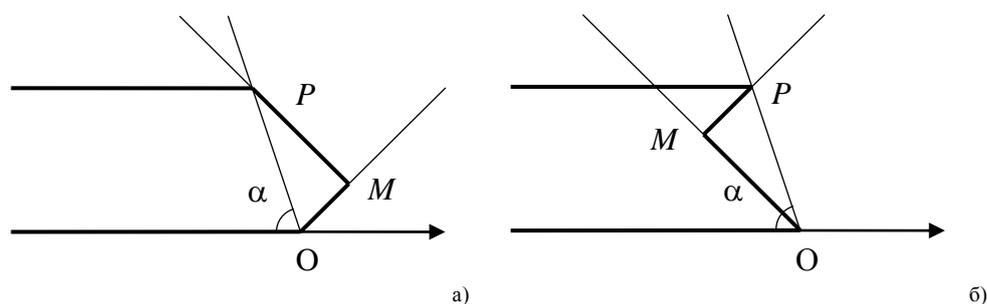


Рис. 2. Профиль трещины при скольжении в двух полуплоскостях 1 и 2 при неодинаковом числе дислокаций в линиях скольжения

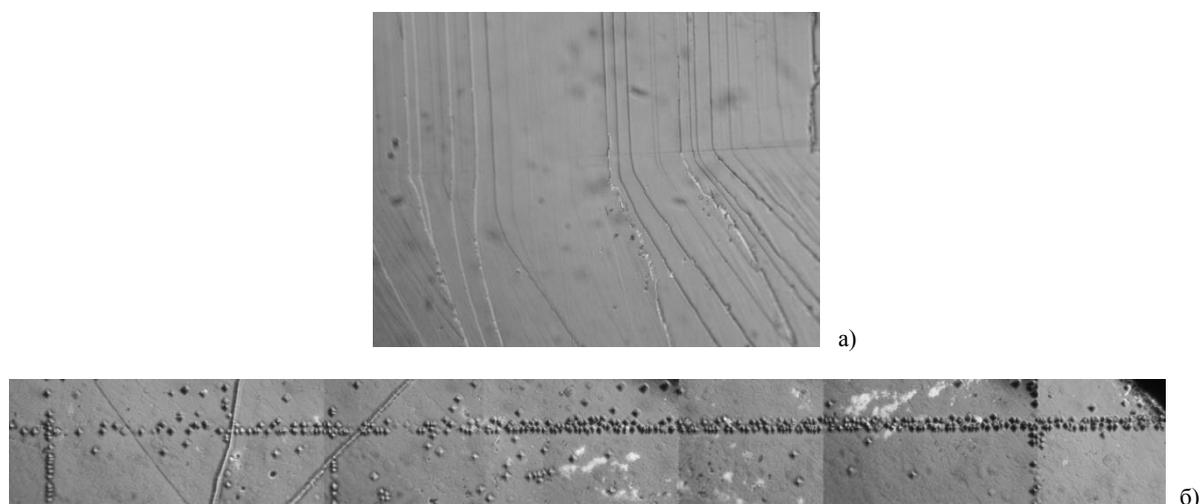


Рис. 3. Ступенька на поверхности трещины (а) и дислокационная структура в месте остановки трещины (б)

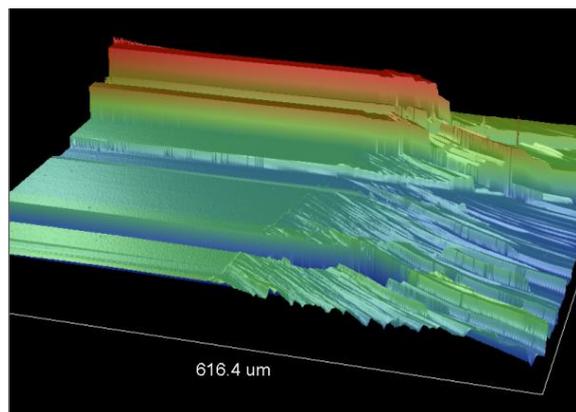


Рис. 4. Рельеф поверхности скола в месте остановки трещины (трещина двигалась слева направо)

Исследование обеих поверхностей скола показало, что при дальнейшем распространении трещина практически всегда выходит из коридора, ограниченного величиной пластического вскрытия δ . Поверхности скола, соответствующие положению трещины до ее остановки, располагаются в этом случае для одной части кристалла выше, а для другой – ниже поверхности дальнейшего распространения трещины. Разность высот на одной и той же базе измерений составляет в этом случае величину порядка 100 нм. Плоскость же разрушения отклоняется гораздо значительно на расстоянии ~ 1 мкм и более.

Но в обоих случаях на поверхности скола не наблюдаются участки с геометрически правильной формой, соответствующей кристаллографии скольжения под углом 45° (рис. 1). Если допустить, что отдельная линия обладает тонкой структурой [5], то вершина трещины может в принципе иметь более сложную форму. В частности, наклонные участки поверхности трещины могут составлять с направлением ее движения углы, зависящие как от высоты ступеньки, так и от ширины линии скольжения ω . Характерное отношение $\omega/\delta = 10$ соответствует размытости линии скольжения в поперечном направлении порядка 1 мкм.

Прямоугольные или заостренные неоднородности на фронте трещины могут стать причиной отклонения ее в соседние плоскости при дальнейшем движении. При этом геометрический рельеф поверхности в переходной зоне будет существенно отличаться от такового при ее движении по плоскости спайности (рис. 4).

Видно, поверхность трещины после остановки сильно фрагментирована. Поверхность разрушения не совпадает с плоскостью спайности и образует совершенно незакономерный рельеф в достаточно широкой полосе аккомодации за фронтом остановившейся трещины. При тангенциальном смещении противоположных поверхностей трещины восстановить их контакт будет практически невозможно. Очевидно, по этой причине скачкообразно растущие трещины в кристаллах могут спонтанно залечиваться на небольших участках до последней остановки трещины [4]. Такое же совершенное залечивание наблюдается для внутренних трещин, где совпадение рельефов противоположных поверхностей обеспечивает практически бездефектное восстановление нарушенной сплошности [6, 7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Тялин Ю.И., Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Куранова В.А. Аналитическая оценка распределения дислокаций в вершине остановившихся трещин // Физика твердого тела. 2000. Т. 42. № 7. С. 1253-1255.
2. Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Тялин Ю.И. Залечивание трещин, остановившихся при симметричном сколе в ШГК и кальците // Физика твердого тела. 2000. Т. 42. № 4. С. 685-687.
3. Тялин Ю.И., Тялина В.А., Федоров В.А., Чемеркина М.В., Бутягин А.А. Залечивание трещин в щелочно-галогидных кристаллах // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. № 9. С. 1614-1617.
4. Тялин Ю.И., Тялина В.А. Электрические эффекты при пластической деформации и разрушении кристаллов. Тамбов: Издат. дом ТГУ им. Г.Р. Державина, 2011. 87 с.
5. Тялин Ю.И., Тялина В.А., Золотова Д.В., Бутягин А.А., Осипова Е.Н. Структура полос скольжения, формируемых в вершине трещины при ее остановке // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 3. С. 23-26.
6. Финкель В.М., Федоров В.А., Плотников В.П., Тялин Ю.И., Куранова В.А. Механизм и кинетика зарождения упругих каналов Розе первого рода в кальците // Кристаллография. 1988. Т. 33. Вып. 5. С. 1244-1250.
7. Федоров В.А., Тялин Ю.И., Тялина В.А., Плужникова Т.Н., Чемеркина М.В. О зарождении трещин на границе свободного упругого двойника в кальците // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2004. Т. 68. № 10. С. 1484-1487.

Поступила в редакцию 5 февраля 2014 г.

Tyalin Y.I., Tyalina V.A. PLASTIC FLOW AND FORM FOR CRACK TOP IN ALKALI-HALIDE CRYSTALS

The influence of local plastic flow at the crack top in the form of crystals is considered. It is shown that the shape of plastic crack depends on the number of slip lines and intensity of plastic deformation in them. In this case the actual crack top is formed only one of those closest to the top. In alkali halide crystals the most likely form of vertices is triangular with an angle determined by the number of dislocations in the slip line and its width.

Key words: crack; crack top; plasticity.

Тялин Юрий Ильич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики, e-mail: tyalin@mail.ru

Tyalin Yuriy Ilich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor of General Physics Department, e-mail: tyalin@mail.ru

Тялина Валентина Анатольевна, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, e-mail: tyalin@mail.ru

Tyalina Valentina Anatolyevna, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of Business Informatics and Mathematics Department, e-mail: tyalin@mail.ru