

О локализации пластической деформации при сжатии кристаллов LiF

© С.А. Баранникова, М.В. Надежкин, Л.Б. Зуев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Томск, Россия

E-mail: bsa@ispms.tsc.ru

(Поступила в Редакцию 14 октября 2009 г.)

Исследованы картины локализации пластического течения в щелочно-галлоидных кристаллах LiF при сжатии. Установлены основные пространственно-временные закономерности локализации деформации на разных стадиях деформационного упрочнения в таких монокристаллах. Выявлена связь ориентировки очагов локализованной деформации с кристаллографией систем скольжения исследуемых образцов, наблюдаемых одновременно методами двухэкспозиционной спекл-фотографии и фотоупругости.

Работа выполнена по проекту № 3.6.1.2 Программы № 3.6.1 фундаментальных исследований СО РАН (2006–2009 гг.), проекту № 21 Программы фундаментальных исследований № 11 Президиума РАН, а также поддержана грантом РФФИ (№ 09-08-00213-а).

Неоднородность пластического течения характерна для необратимого изменения формы твердых тел на всех масштабах наблюдения. Как показано в экспериментальных исследованиях, пластическая деформация твердых тел развивается локализованно, а картины локализации на разных стадиях пластического течения однозначно связаны с действующими на них законами деформационного упрочнения [1]. Экспериментально картины локализации пластического течения наблюдались в наших исследованиях при использовании разработанной для этих целей методики двухэкспозиционной спекл-фотографии [2], родственной голографии сфокусированных изображений и позволяющей определять поле векторов смещения $\mathbf{r}(x, y)$ в деформируемом образце и рассчитывать продольные ε_{xx} , поперечные ε_{yy} , сдвиговые ε_{xy} и поворотные ω_z компоненты тензора пластической дисторсии $\beta_{ij} = \nabla \mathbf{r}(x, y)$. Ранее проблема макролокализации пластической деформации была изучена главным образом в металлических моно- и поликристаллах при растяжении [1]. В то же время важно получить информацию о локализации макродеформации в щелочно-галлоидных кристаллах (ЩГК) — традиционных модельных для изучения механизмов пластического течения материалах [3–6].

В работе использованы монокристаллы LiF, выращенные методом Киропулоса, с пределом текучести при сжатии $\sigma_y \approx 6.5\text{--}7.5$ МПа и деформацией при разрушении $\sim 0.1\text{--}0.15$. Образцы размером $30 \times 19 \times 8$ мм выкалывались из монокристаллических буль по плоскостям спайности $\{100\}$ и деформировались при 300 К сжатием вдоль $[001]$ на испытательной машине Instron-1185 при скорости движения подвижного захвата $3.3 \cdot 10^{-6}$ м/с. Кривые сжатия кристаллов LiF, как и в [7], содержали линейные стадии, выделяемые по значениям коэффициентов деформационного упрочнения. Одновременно с записью диаграмм сжатия с начала нагружения и до полного разрушения образцов методом двухэкспозиционной спекл-фотографии [2], как и в [8], последовательно регистрировались поля векторов смещений $\mathbf{r}(x, y)$ точек на грани (010) исследуемых образцов. Построение и

анализ пространственных $\varepsilon_{xx}(x, y)$ и пространственно-временных $\varepsilon_{xx}(x, y)$ картин позволяют определить положение зон локализации деформации и проследить за их эволюцией во времени. Синхронно с записью спекл-фотографий в ходе нагружения для наблюдения за распределением макронапряжений аналогично работе [7] был использован метод фотоупругости [9]. Образец, размещенный между скрещенными поляризаторами, наблюдался в поляризованном свете в направлении $[100]$. Картины двулучепреломления содержали информацию об изменении распределения макронапряжений, характеризующем изменение действующих систем скольжения в ходе деформации на грани (100) .

Как показано в [7], при сжатии в направлении $[001]$ в ЩГК действуют четыре равнонагруженные системы скольжения $\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$. На экспериментальной кривой сжатия $\sigma(\varepsilon)$ образца LiF, представленной на рис. 1, отчетливо выявляются три стадии линейного деформационного упрочнения: стадия I (с коэффициентом деформационного упрочнения $\theta_I \approx 115$ МПа и протяженностью общей деформации $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.002\text{--}0.008$); стадия II ($\theta_{II} \approx 285$ МПа, до $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.026$); стадия III ($\theta_{III} \approx 365$ МПа, до $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.04$).

Таким образом, по мере роста деформации $\theta_I < \theta_{II} < \theta_{III}$, что отражает упрочнение кристалла [7] по мере последовательного включения скольжения по плоскостям семейства $\{110\}$.

На всех стадиях одновременно фиксировались картины локализации пластической деформации и картины оптического двулучепреломления. Анализ картин локализации деформации показал, что при сжатии кристаллов LiF на стадии I пластическая деформация сосредоточена в одной зоне, наклоненной на грани (010) к продольной оси образца под углом $\varphi = \pi/2$. По-видимому, это обусловлено действием первичной системы скольжения $(0\bar{1}1)[011]$, следы скольжения от которой наклонены на этой грани к оси $[001]$ на угол $\varphi_1 = \pi/2$. Это подтверждается показанным на рис. 2, а совмещением картин оптического двулучепреломления, свидетельствующих о действии системы скольжения $(0\bar{1}1)[011]$,

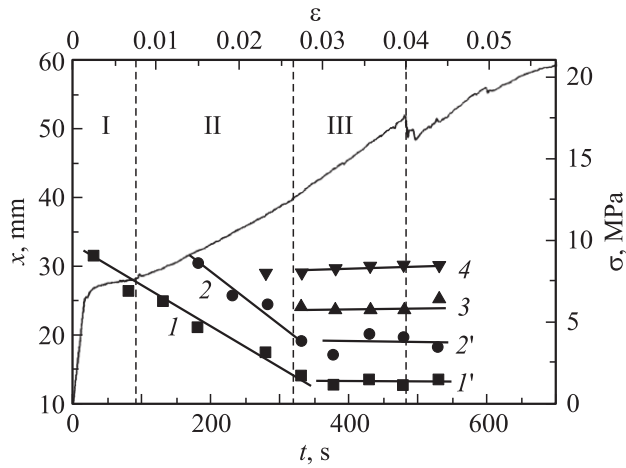


Рис. 1. Кривая пластического сжатия LiF и соответствующая диаграмма положений очагов локализации деформации в интервале общей деформации $\varepsilon_{\text{tot}} \approx 0.002-0.04$. $\sigma(\varepsilon)$ — кривая нагружения („пилообразные“ участки с резким падением напряжений соответствуют образованию микротрещин в образце); $x(t)$ — положение координат очагов локализации деформации вдоль оси образца с течением времени ($1, 2$ — подвижные очаги, $1', 2', 3, 4$ — неподвижные очаги).

следы скольжения которой на грани (100) составляют с осью образца угол $\varphi_1 = \pi/4$, и картин локализации деформации в виде одиночного максимума распределения компоненты локальных деформаций ε_{xx} на грани (010).

Далее на линейной стадии II наряду с первой зоной локализации деформации зарождается еще одна зона, представленная в виде распределения ε_{xx} на грани (010) на рис. 2, *b*. Ее появление может быть связано с включением второй системы скольжения (011)[0 $\bar{1}$ 1], следы скольжения которой на грани (100) составляют с осью образца угол $\varphi_2 = 3/4\pi$. Две зоны локализованной деформации на грани (010) показаны на рис. 3, *a* как распределения локальных деформаций ε_{xx} . Они наклонены к продольной оси образца на $\varphi = \pi/2$ и движутся со скоростью $V_{\text{aw}} \approx 8.5 \cdot 10^{-5}$ м/с, определенной по наклону зависимости $x(t)$ — положений координат очагов локализации деформации ε_{xx} вдоль оси образца с течением времени (рис. 1, кривые $1, 2$). К концу стадии II произошла остановка двух очагов локализации ε_{xx} .

При переходе к стадии III характер локальных деформаций изменился. Картины их распределений на линейной стадии III состоят из четырех неподвижных зон локализации деформации, расположенных на расстоянии $\lambda \approx 5 \pm 1$ мм друг от друга (рис. 1, кривые $1', 2', 3, 4$). Зоны локализованной деформации на грани (010) также наклонены к продольной оси образца под углом $\varphi = \pi/2$ (рис. 3, *b*).

Согласно полученным данным, при сжатии LiF пластическое течение локализовано в определенных активных зонах образца, закономерно расположенных по его длине. При этом в зонах между такими очагами деформация практически не развивается, а активные зоны на стадиях I и II движутся вдоль оси образца.

Эту особенность впервые удалось наблюдать в неметаллических кристаллах LiF в настоящей работе, а также в KCl и NaCl в [8], хотя для металлических монокристаллов и поликристаллов ряда чистых веществ и сплавов она изучена достаточно подробно [1]. Сравнение данных при сжатии LiF, полученных методами лазерной

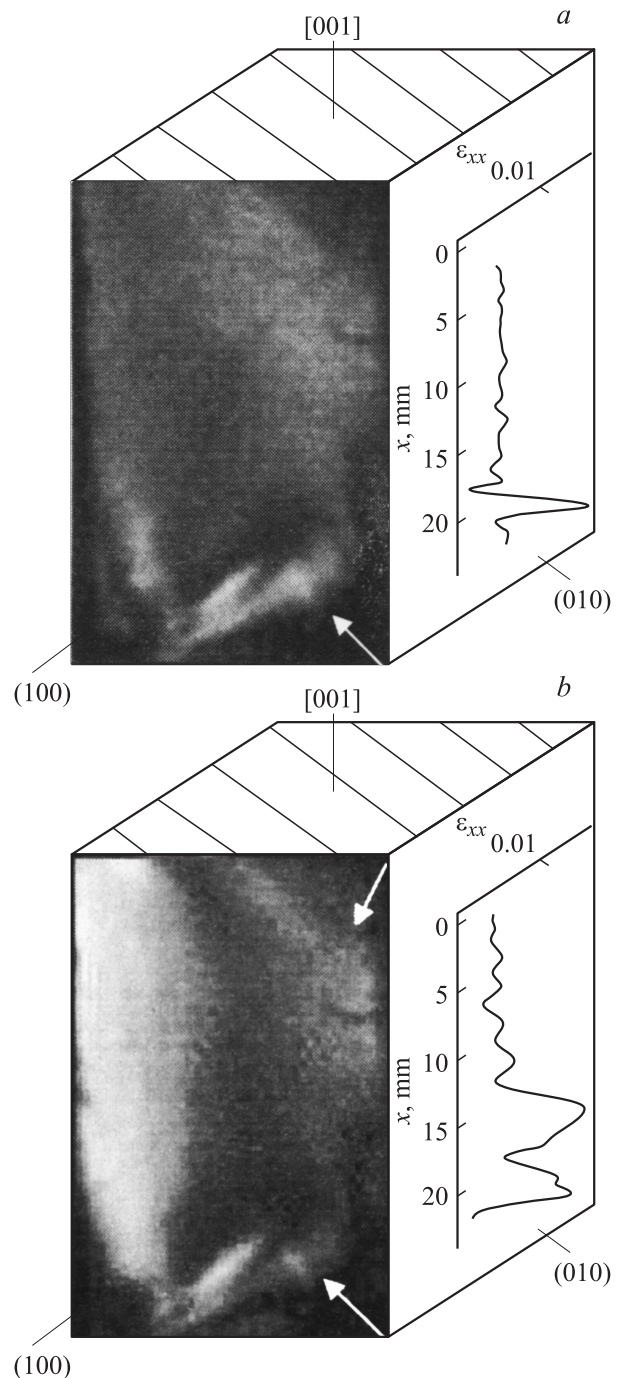


Рис. 2. Совмещенные картины оптического двулучепреломления (стрелками указаны последовательно действующие системы скольжения) и локализации пластической деформации (в виде распределений $\varepsilon_{xx}(x)$ для средней линии образца) на разных гранях кристалла LiF. *a* — на стадии I при $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.006$, *b* — на стадии II при $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.014$.

Основные данные о деформационном упрочнении и локализации деформации при сжатии ЩГК

Кристалл	σ_y , МПа	Интервал деформации	Наблюдавшиеся стадии деформационного упрочнения	Наблюдавшиеся картины локализации деформации
NaCl [8]	1	0.002–0.02 до 0.055 до 0.09	Линейная стадия I ($\theta_I \approx 120$ МПа) Линейная стадия II ($\theta_{II} \approx 490$ МПа) Линейная стадия III ($\theta_{III} \approx 300$ МПа)	Движение двух зон локализации деформации ($V_{aw} \approx 6.1 \cdot 10^{-5}$ м/с) Движение четырех зон локализации деформации ($V_{aw} \approx 7.7 \cdot 10^{-5}$ м/с) Стационарная система из трех зон локализации деформации ($\lambda \approx 4 \pm 1$ мм)
KCl [8]	5	0.002–0.01 0.05–0.085	Линейная стадия I ($\theta_I \approx 178$ МПа) Линейная стадия II ($\theta_{II} \approx 137$ МПа)	Движение двух зон локализации деформации ($V_{aw} \approx 6 \cdot 10^{-5}$ м/с) Движение двух зон локализации деформации ($V_{aw} \approx 4.5 \cdot 10^{-5}$ м/с), одна из которых остановилась
LiF	6.5	0.002–0.008 до 0.026 до 0.04	Линейная стадия I ($\theta_I \approx 115$ МПа) Линейная стадия II ($\theta_{II} \approx 285$ МПа) Линейная стадия III ($\theta_{III} \approx 365$ МПа)	Движение одной зоны локализации деформации ($V_{aw} \approx 8.5 \cdot 10^{-5}$ м/с) Движение двух зон локализации деформации ($V_{aw} \approx 8.5 \cdot 10^{-5}$ м/с) Стационарная система из четырех зон локализации деформации ($\lambda \approx 5 \pm 1$ мм)

спекл-фотографии и фотоупругости, показало, что зоны локализации пластической деформации представляют собой совокупность сдвигов по плоскостям скольжения кристаллов. Было также установлено, что на линейных стадиях I и II две зоны локализации деформации в кристаллах LiF движутся со скоростью $V_{aw} \approx 8.5 \cdot 10^{-5}$ м/с. Согласно ранее полученным в [8] данным, в кристаллах NaCl на стадии I две зоны локализации деформации движутся со скоростью $V_{aw} \approx 6.1 \cdot 10^{-5}$ м/с, а в KCl — со скоростью $V_{aw} \approx 6 \cdot 10^{-5}$ м/с. Указанные значения

скоростей близки к ранее зафиксированным на стадиях легкого скольжения и линейного деформационного упрочнения ряда металлических монокристаллов [1], для которых механизмом пластической деформации, как и для ЩГК, является дислокационное скольжение. На стадии II в кристаллах LiF, как и в кристаллах KCl, NaCl [8] при сжатии и в металлических монокристаллах [1] при растяжении, возникают подвижные системы очагов пластического течения.

Ранее для всех исследованных металлических материалов было установлено, что скорость движения деформационных очагов V_{aw} на стадии линейного деформационного упрочнения, когда $\sigma \sim \epsilon$, т.е. $\theta = \text{const}$, обратно пропорционально коэффициенту деформационного упрочнения $\theta = G^{-1}d\sigma/d\epsilon$ на этой стадии (G — модуль сдвига), т.е. $V_{aw}(\theta) = V_0 + \Xi/\theta$ [1]. Установлено, что данные настоящей работы о скоростях очагов пластического течения в LiF и KCl, NaCl [8] удовлетворяют зависимости $V_{aw}(\theta)$ с коэффициентом корреляции ~ 0.9 . Полученные результаты обобщены в таблице и прежде всего подтверждают единую природу волновых процессов на линейных стадиях деформационного упрочнения ЩГК. Они также подчеркивают сходство картин локализации в ЩГК с картинами, соответствующими этим стадиям в моно- и поликристаллах металлов и сплавов [1].

В кристаллах LiF, как и следовало ожидать, на линейных стадиях картина распределения деформаций ϵ_{xx} сначала представляла собой подвижные очаги, зародившиеся на стадии II, которые затем остановились (рис. 1). Далее, на стадии III с постоянным коэффициентом деформационного упрочнения сформировалась система четырех неподвижных очагов локализации деформации, что в металлических кристаллах характерно для стадии параболического деформационного упрочнения [1].

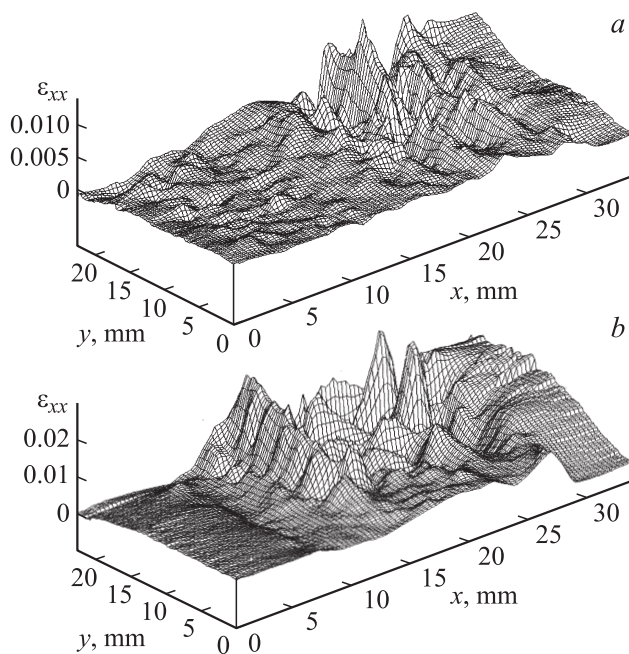


Рис. 3. Очаги локализации $\epsilon_{xx}(x, y)$ в кристалле LiF. *a* — на стадии II при $\epsilon_{\text{tot}} = 0.014$, *b* — на стадии III при $\epsilon_{\text{tot}} = 0.032$.

Проведенные исследования позволили обнаружить существенные различия в характере деформации ЩГК. Так, например, имеются особенности характера локализации (волновой картины) пластической деформации на линейной стадии III в кристаллах NaCl, KCl [8] и LiF, для которых остальные параметры процесса на линейных стадиях I и II почти совпадают. Имеется принципиальное отличие в поведении движущихся зон локализации деформации в ЩГК при сжатии на линейной стадии II и в металлических кристаллах на стадии линейного деформационного упрочнения. В металлах эквидистантно расположенные очаги деформации многократно проходят по образцу, образуя фазовую автоволну [1]. В ЩГК же возможно только однократное прохождение очага по объему образца. Тем не менее исследование пластической деформации сжатия кристаллов LiF подтвердило справедливость утверждений авторов [1] об обнаружении нового типа волн, распространяющихся с малой скоростью и связанных с процессами самоорганизации в деформируемых средах [10].

Таким образом, с учетом данных, представленных в настоящем исследовании, а также данных, полученных в недавних работах [11–13], автоволновой характер пластической деформации, детально изученный в металлических поли- и монокристаллах [1], приобретает универсальный для процессов пластического течения твердых тел смысл.

Список литературы

- [1] Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, С.А. Баранникова. Физика макролокализации пластического течения. Наука, Новосибирск (2008). 327 с.
- [2] L.B. Zuev, V.V. Gorbatenko, S.N. Polyakov. Proc. SPIE. **4900**, 1197 (2002).
- [3] И.В. Обреимов. Избранные труды. Молекулярная физика. Оптические методы. Наука, М. (1997). 316 с.
- [4] А.А. Урусовская. В сб.: Некоторые вопросы физики пластичности кристаллов / Под ред. М.В. Классен-Неклюдовой. Изд-во АН СССР, М. (1960). С. 75.
- [5] Б.И. Смирнов. Дислокационная структура и упрочнение кристаллов. Наука, М. (1981). 236 с.
- [6] Л.Б. Зуев. Физика электропластичности щелочно-галогидных кристаллов. Наука, Новосибирск (1990). 120 с.
- [7] В.З. Бенгус, С.Н. Комник, В.А. Левченко. В сб.: Физика конденсированного состояния / Под ред. Б.Н. Есельсона. ФТИНТ АН УССР, Харьков (1969). В. 5. С. 152.
- [8] С.А. Баранникова, М.В. Надежкин, Л.Б. Зуев. ФТТ **51**, 1081 (2009).
- [9] Н.М. Меланхолин. Методы исследования оптических свойств кристаллов. Наука, М. (1970). 156 с.
- [10] А.И. Олемской, А.А. Кацнельсон. Синергетика конденсированной среды. УРСС, М. (2003). 335 с.
- [11] A. Asharia, A. Beaudoin, R. Miller. Math. Mech. Solids **131**, 292 (2008).
- [12] R.J. McDermald, C. Efstathiou, P. Curath. J. Eng. Mater. Technol. **4**, 692 (2009).
- [13] C. Fressengeas, A. Beaudoin, D. Entemeyer. Phys. Rev. B **79**, 014108-1 (2009).