

# О локализации пластического течения при сжатии кристаллов NaCl и KCl

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

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

E-mail: bsa@ispms.tsc.ru

(Поступила в Редакцию 22 сентября 2008 г.)

Исследованы картины локализации пластического течения в щелочно-галогидных кристаллах при сжатии. Установлены основные пространственно-временные закономерности локализации деформации на стадиях деформационного упрочнения в таких монокристаллах. Прослежена связь ориентировки очагов локализованной деформации с кристаллографией систем скольжения исследуемых образцов на начальных стадиях пластической деформации. Определена скорость движения очагов локализованной деформации при сжатии.

Работа выполнена по проекту № 3.6.1.2 Программы 3.6.1 фундаментальных исследований СО РАН и при финансовой поддержке гранта Президента РФ (МД-278.2008.8), программы „Фундаментальные исследования и высшее образование“ Министерства образования и науки РФ и CRDF.

PACS: 05.45.Df, 05.70.Ln, 62.20.Fe, 62.50.+p, 81.40.Lm, 83.50.-v

## 1. Введение

Проведенные в последние годы исследования локализации пластического течения в металлах и сплавах позволили установить, что пластическое течение на всем протяжении кривой течения от предела текучести до разрушения образца локализовано, а формы макролокализации определяются законами деформационного упрочнения, действующими на соответствующих стадиях процесса [1–3]. В выполненных ранее работах проблема макроскопической локализации пластической деформации изучалась главным образом на металлических ГЦК-монокристаллах при растяжении. В то же время важно получить информацию о локализации макродеформации в щелочно-галогидных кристаллах (ЩГК), на которых традиционно изучаются механизмы пластического течения (см., например, [4–7]).

Очень заманчивой в этом отношении является возможность использования для исследований деформационных процессов в ЩГК поляризационно-оптического метода анализа напряжений [8] (метод фотоупругости [9]). Это обусловило интерес к исследованиям деформационного поведения ЩГК, поскольку их механические свойства и структура подробно изучены [6,10].

## 2. Материалы и экспериментальная методика

В работе использованы монокристаллы NaCl и KCl, выращенные методом Киропулоса, с пределом текучести при сжатии  $\sigma_y \approx 0.5\text{--}2\text{ МПа}$  и деформацией при разрушении  $\epsilon_f \sim 0.1$  для NaCl и  $\sigma_y \approx 1\text{--}5\text{ МПа}$ ,  $\epsilon_f \sim 0.22$  для KCl (рис. 1). Образцы размерами  $21 \times 19 \times 15\text{ мм}$  (NaCl) и  $30 \times 19 \times 8\text{ мм}$  (KCl) выкалывались из монокристаллических буль по плоскостям спайности и деформировались при 300 К сжати-

ем вдоль [001] на испытательной машине Instron-1185 со скоростью  $3.3 \cdot 10^{-6}\text{ м/с}$ . Одновременно с записью диаграммы сжатия с начала погружения и до полного разрушения образца методом двухэкспозиционной спекл-фотографии [11], как и в [1–3], последовательно регистрировались поля векторов перемещений  $\mathbf{r}(x, y)$  точек на грани (010) исследуемых образцов. Прирост общей деформации  $\Delta\epsilon_{\text{tot}}$  между двумя экспозициями при записи каждой спекл-фотографии составлял  $2 \cdot 10^{-3}$ , что позволяло получить последовательность из 15–20 кадров, содержащих информацию о распределении и эволюции деформации. Численным дифференцированием полей  $\mathbf{r}(x, y)$  по координатам  $x$  и  $y$  вычислялись продольные  $\epsilon_{xx}$ , поперечные  $\epsilon_{yy}$ , сдвиговые  $\epsilon_{xy}$  и поворотные  $\omega_z$  компоненты тензора пластической дисторсии  $\beta_{ij} = \nabla\mathbf{r}(x, y)$  во всех точках наблюдаемой поверхности. Построение и анализ пространственных  $\epsilon_{xx}(x, y)$  и пространственно-временных  $\epsilon_{xx}(x, t)$  картин позволяют

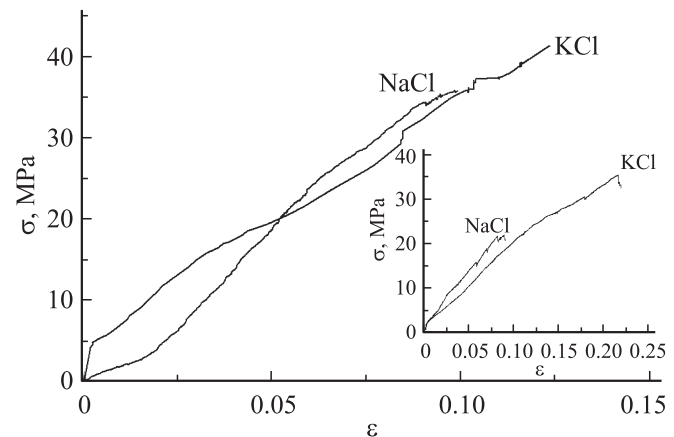
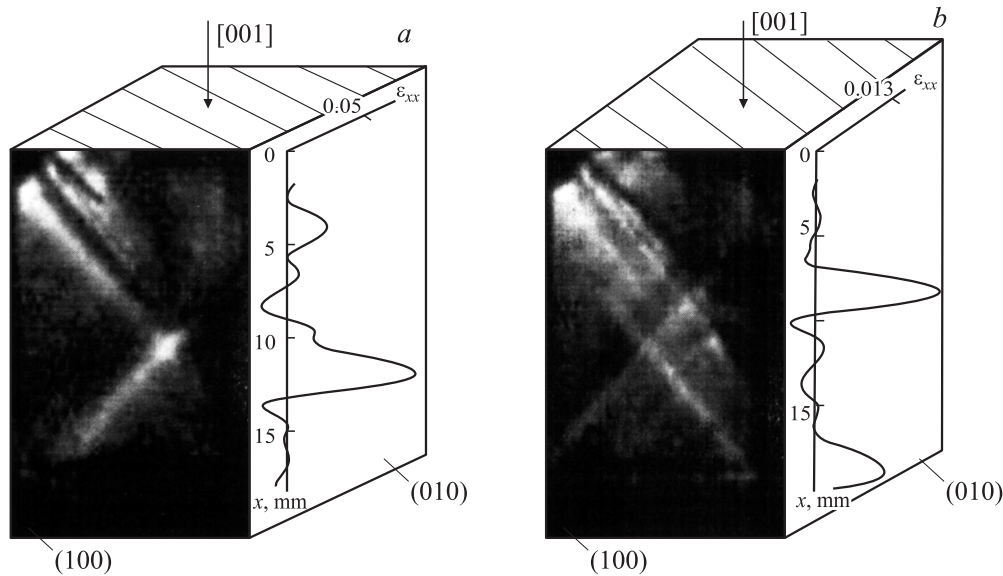


Рис. 1. Кривые сжатия кристаллов NaCl и KCl. На вставке — кривые течения образцов, доведенных до разрушения.



**Рис. 2.** Совмещенная картина двулучепреломления и локализации пластической деформации на разных гранях кристалла NaCl при двух последовательных значениях общей деформации сжатия:  $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.023$  (a) и  $0.027$  (b).

определить положение зон локализации деформации и проследить за их эволюцией во времени.

Совместно с записью спекл-фотографий в ходе нагружения для наблюдения за распределением макронапряжений был использован метод фотоупругости (аналогично работе [12]). Образец, размещенный между скрещенными поляризаторами, наблюдался в поляризованном свете, падающем нормально к его грани. По картинам двулучепреломления можно было судить об изменении распределения макронапряжений в кристалле в ходе деформации, характеризующем изменение действующих систем скольжения на грани (100).

### 3. Экспериментальные результаты

Как известно [10,12,13], степень деформации ЦГК при сжатии может достигать нескольких десятков процентов. При сжатии вдоль [001] в кристаллах NaCl, KCl действуют четыре равнонагруженные системы скольжения  $\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$  [12].

Примеры кривых сжатия  $\sigma(\varepsilon)$  исследуемых образцов с одновременной записью картин локализации деформации и двулучепреломления представлены на рис. 1, где на вставке приведены четырехстадийные кривые течения образцов NaCl, KCl, доведенных до разрушения, что согласуется с данными [12]. На экспериментальной кривой сжатия образцов NaCl, представленной на рис. 1, линейная стадия I с коэффициентом деформационного упрочнения  $\theta_I \approx 120$  МПа имеет протяженность общей деформации  $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.002-0.02$ , затем после короткого переходного участка переходит в линейную стадию II ( $\theta_{II} \approx 490$  МПа) протяженностью до 0.055 общей деформации. Далее снова наблюдались переходный участок

( $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.0055-0.06$ ) и стадия линейного упрочнения III ( $\theta_{III} \approx 300$  МПа) протяженностью  $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.09$ . На кривой сжатия образцов KCl, представленной на рис. 1, наблюдались стадия I ( $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.002-0.01$ ) с постоянным коэффициентом деформационного упрочнения  $\theta_I = 178$  МПа, протяженная переходная стадия ( $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.01-0.05$ ) и стадия II ( $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.05-0.085$ ) с постоянным коэффициентом деформационного упрочнения  $\theta_{II} = 137$  МПа.

Таким образом, анализ формы кривых пластического течения и распределения макронапряжений в кристалле в ходе деформации, характеризующем изменение действующих систем скольжения, не обнаружил существенных отличий от имеющихся для NaCl и KCl данных [12], и эти сведения приведены здесь как доказательства точности экспериментальной методики. Новые результаты получены при исследовании распределения пластической деформации по образцу на разных стадиях течения. Измерения локальных деформаций, выполненные методом спекл-фотографии, показали, что деформация макроскопически локализована на всех стадиях пластического течения.

Анализ картин локализации деформации показал, что при сжатии кристаллов NaCl на стадии I пластическая деформация сосредоточена в двух зонах, наклоненных к продольной оси образца под углом  $\varphi = 90^\circ$ . По-видимому, данный факт обусловлен действием первой пары систем скольжения  $(0\bar{1}1)[011]$ ,  $(011)[0\bar{1}1]$ , следы скольжения от которой наклонены к направлению оси [001] под углами  $\varphi_1 = \varphi_2 = 90^\circ$ . Это подтверждается рис. 2, на котором показаны примеры совмещения последовательных картин оптического двулучепреломления, свидетельствующих о действии пары систем скольжения  $(0\bar{1}1)[011]$ ,  $(011)[0\bar{1}1]$  на грани (100), и картин локализации деформации в виде двух зон  $\varepsilon_{xx}$ , наблю-

даемых на грани (010) на стадии I при общей деформации сжатия  $\epsilon_{tot} = 0.023$  и  $\epsilon_{tot} = 0.027$ . На протяжении линейной стадии I (аналог стадии легкого скольжения) наблюдалось движение двух зон локализации деформации со скоростью  $V_{aw} = 6.1 \cdot 10^{-5}$  m/s (рис. 3), значения которой определялись по наклону зависимости  $X(t)$  на рис. 4, где показаны положения  $X$  максимумов локализации компоненты  $\epsilon_{xx}$  на оси сжатия в зависимости от времени  $t$ .

Картины распределений локальных деформаций на линейной стадии II представляют собой 4–5 очагов локализации деформации, расположенных на расстоянии  $\lambda \approx 4 \pm 1$  mm друг от друга (рис. 5, a), которые двигались с постоянной скоростью  $V_{aw} = 7.7 \cdot 10^{-5}$  m/s (рис. 4). Зоны локализованной деформации наклонены к продольной оси образца под углом  $\varphi = 90^\circ$  (рис. 5, b). При переходе к стадии III характер распределения локальных деформаций изменился. Картина распределений деформаций  $\epsilon_{xx}$  сначала представляла собой подвижные очаги, зародившиеся на стадии II, которые затем остановились в средней части образца (рис. 4). Далее, на стадии III, сформировалась система из трех неподвижных очагов локализации деформации.

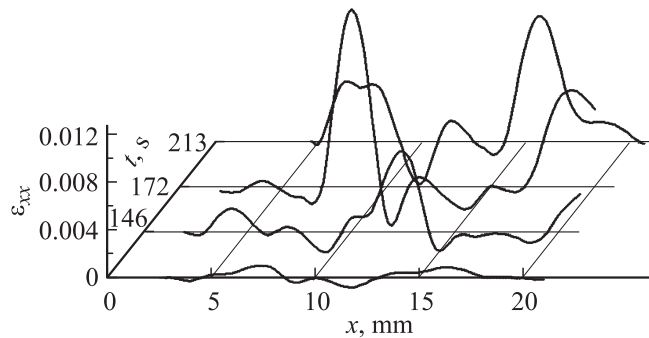


Рис. 3. Движущиеся очаги локализованной деформации в кристалле NaCl на стадии I.

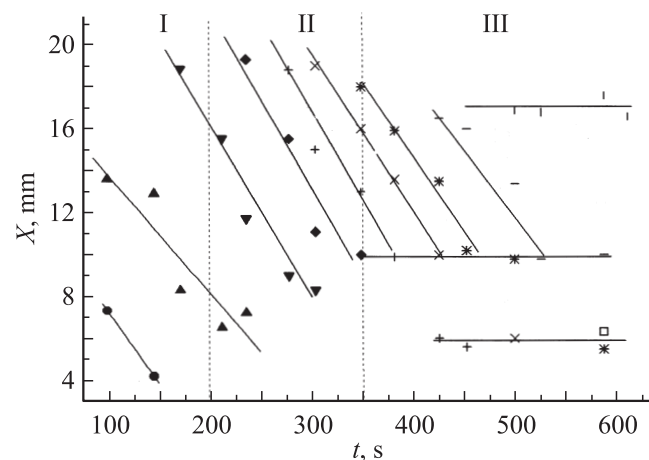


Рис. 4. Диаграмма положений очагов локализации деформации при сжатии кристаллов NaCl в интервале общей деформации  $\epsilon_{tot} \approx 0.002-0.09$ .

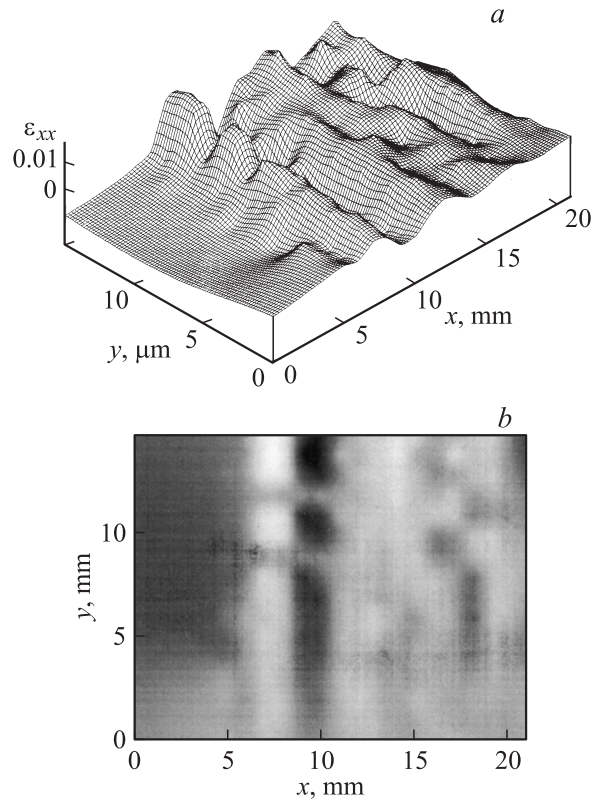


Рис. 5. Очаги локализации  $\epsilon_{xx}$  в кристалле NaCl на стадии II ( $\epsilon_{tot} = 0.037$ ) (a) и соответствующая полутоновая карта распределений (b).

Анализ распределений локальных деформаций  $\epsilon_{xx}$  при сжатии образцов KCl показал, что на стадии I две зоны локализованной деформации перемещаются с постоянной скоростью  $V_{aw} = 6 \cdot 10^{-5}$  m/s, а на стадии II отмечено движение других двух зон локализованной деформации со скоростью  $V_{aw} = 4.5 \cdot 10^{-5}$  m/s, одна из которых затем остановилась (рис. 6).

#### 4. Обсуждение результатов

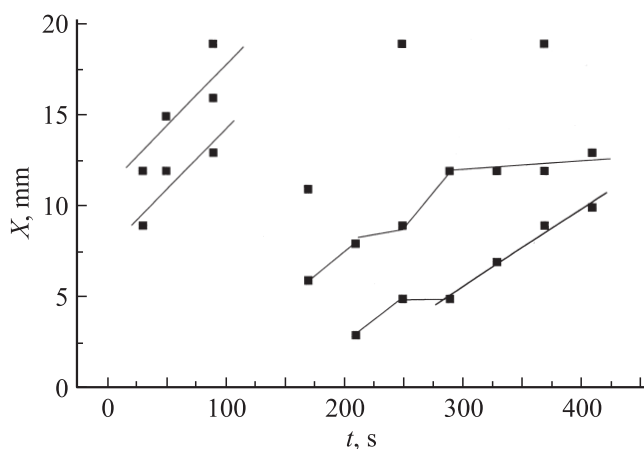
Согласно полученным данным, при сжатии ЩГК пластическое течение локализовано в определенных активных зонах образца, закономерно расположенных по его длине. При этом в зонах между такими очагами деформация практически не развивается, а активные зоны на стадиях I и II движутся вдоль оси образца. Эту особенность впервые удалось наблюдать в неметаллических кристаллах, хотя для металлических монокристаллов и поликристаллов ряда чистых веществ и сплавов она уже изучена достаточно подробно [1–3,14–16].

Было установлено, что на стадии I две зоны локализации деформации в кристаллах NaCl движутся со скоростью  $V_{aw} = 6.1 \cdot 10^{-5}$  m/s, а в KCl — со скоростью  $V_{aw} = 6 \cdot 10^{-5}$  m/s. Такие значения скоростей близки к ранее зафиксированным на стадиях легкого скольжения ряда металлических монокристаллов [3], для которых

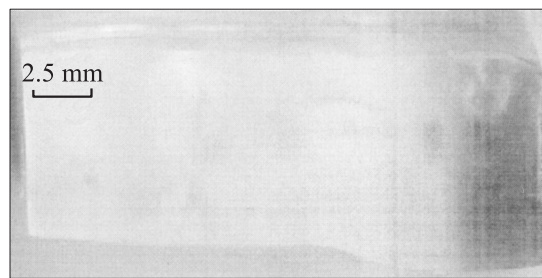
механизмом пластической деформации, как и для ЩГК, является дислокационное скольжение. В настоящем случае важно, что, как и в случае металлических монокристаллов, в ЩГК наклон зон макроскопической локализованной деформации к продольной оси образца определяется кристаллографическими параметрами последнего. Это проявляется в том, что наклон зон локализации совпадает с наклоном следов действующих систем скольжения с максимальным значением фактора Шмида. Количество же активных очагов локализованной пластической деформации, фиксируемых на стадии I, определяется числом действующих при заданной кристаллографической ориентировке систем скольжения. Для кристаллов KCl и NaCl на широкой грани (010) две зоны локализованной деформации наклонены к продольной оси образца [001] под углом  $\varphi = 90^\circ$  (рис. 5, b), совпадая с наклоном следов скольжения систем скольжения  $(0\bar{1}1)[011]$ ,  $(011)[0\bar{1}1]$ .

Таким образом, зоны локализации пластической деформации представляют собой совокупность сдвигов по плоскостям скольжения кристаллов, движение же двух зон локализации на стадии I может быть связано с расширением следов скольжения от соответствующих систем скольжения по образцу, что наглядно видно из сравнения двух последовательных картин локализации и двулучепреломления (рис. 2).

На стадии II в кристаллах NaCl и KCl, так же как и в металлических монокристаллах, возникают подвижные системы очагов пластического течения. В кристаллах NaCl они движутся со скоростью  $\sim 7.7 \cdot 10^{-5}$  м/с (рис. 4), а для KCl —  $4.5 \cdot 10^{-5}$  м/с (рис. 6). Ранее для всех исследованных металлических материалов было установлено, что скорость движения деформационных очагов  $V_{aw}$  на стадии линейного деформационного упрочнения, когда  $\sigma \sim \varepsilon$  ( $\theta = \text{const}$ ), обратно пропорциональна коэффициенту деформационного упрочнения  $\theta = G^{-1} \cdot d\sigma/d\varepsilon$  на этой стадии ( $G$  — модуль сдвига), т.е.  $V_{aw}(\theta) = V_0 + \Xi/\theta$  [3]. Установлено, что данные



**Рис. 6.** Диаграмма положений очагов локализации деформации при сжатии кристаллов KCl в интервале общей деформации  $\varepsilon_{\text{tot}} \approx 0.002-0.069$ .



**Рис. 7.** Сбросообразование на грани (100) кристалла NaCl при сжатии,  $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.1$ .

настоящей работы по скоростям очагов пластического течения в NaCl, KCl удовлетворяют этой же зависимости  $V_{aw}(\theta)$  с коэффициентом корреляции  $\sim 0.92$ . Полученный результат подтверждает однотипность волновых процессов, характерных для линейных стадий упрочнения металлических кристаллов и ЩГК.

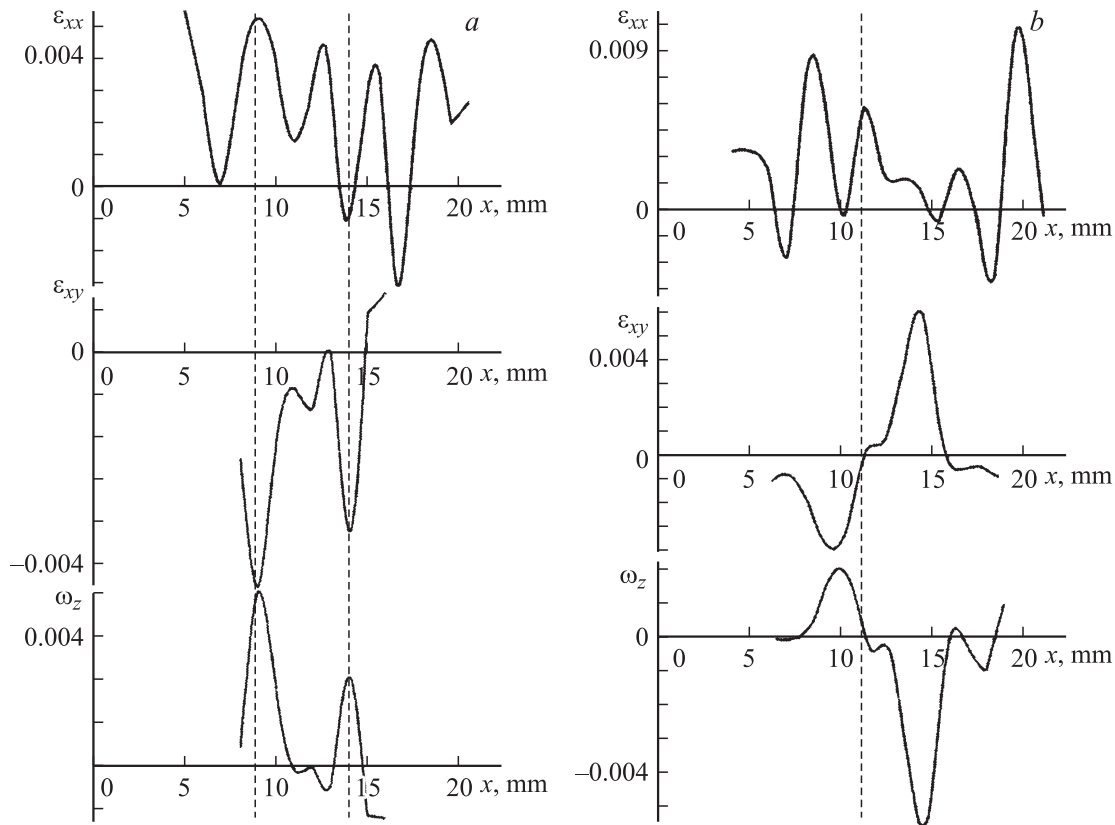
Рассмотрим эволюцию картин локализации деформации в кристаллах NaCl на стадии III с коэффициентом деформационного упрочнения  $\theta_{\text{III}} < \theta_{\text{II}}$ . Как и следовало ожидать для линейных стадий, картина распределений деформаций  $\varepsilon_{xx}$  сначала представляла собой подвижные очаги, зародившиеся на стадии II, которые затем остановились в средней части образца (рис. 4). Далее, на стадии III, сформировалась система из трех неподвижных очагов локализации деформации (рис. 4), что характерно для стадии параболического деформационного упрочнения в металлических кристаллах [3]. Причиной остановки подвижных очагов локализации посередине образца ( $\sim 10$  мм) может служить тот факт, что границами этих очагов являются хорошо видимые полосы сбросов (рис. 7), которые ранее наблюдались при сжатии каменной соли [4]. Доказательством существования полос сбросов также является характерное поведение компонент тензора дисторсии на границах зон локализации.

Если рассмотреть распределения локальных сжатий, сдвигов и локальных поворотов подобно тому, как это сделано на рис. 8, a для стадии II ( $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.045$ ), то можно отметить важные особенности.

1) Максимальным значениям локальных сжатий соответствуют максимумы сдвигов и поворотов в средней части образца ( $\sim 10$  мм).

2) На участке образца от 10 до 15 мм не происходит изменения знаков локальных сдвигов и поворотов на противоположные. В следующий момент, соответствующий началу стадии III ( $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.045$ ), картина распределений локальных сжатий, сдвигов и локальных поворотов становится иной (рис. 8, b). Во-первых, максимальным значениям локальных сжатий соответствуют нулевые значения сдвигов и поворотов в средней части образца ( $\sim 10$  мм). Во-вторых, в целом здесь происходит постепенное изменение сдвига от отрицательных значений к положительным, а поворота, наоборот, от





**Рис. 8.** Распределения компонент  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{xy}$  и  $\omega_z$  тензора дисторсии в средней части образца NaCl на широкой грани (010) в конце стадии II ( $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.045$ ) (a) и в начале стадии III ( $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.045$ ) (b).

положительных значений к отрицательным, т.е. сдвиги и повороты разных знаков здесь компенсированы. Этот момент времени соответствует остановке подвижных очагов локализации посередине образца (рис. 4). Аналогичная картина в поведении компонент тензора дисторсии возникает далее на стадии III ( $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.061$ ) в части образца ( $\sim 15$  mm), в которой формируется одна из неподвижных зон локализованной деформации (рис. 4).

Таким образом, на границах областей с максимальным накоплением деформации (10 и 15 mm) локальные сдвиги и повороты имеют разные знаки (рис. 8, b), как и следует ожидать для полос сброса (рис. 7), которые в свою очередь представляют собой границы переориентировки областей кристалла при сжатии [5]. Материал в промежутках между названными очагами локализации, согласно моделям сбросообразования, деформироваться не должен, что и наблюдается на стадии III, где с течением времени сформировалась система стационарных зон локализации (рис. 4). Сравнивая полученные результаты, следует отметить, что в [16] особенности эволюции картин макролокализации пластической деформации в ГПУ-монокристаллах Zn были обусловлены возникновением сбросов на переходе от упругости к развитой пластичности. В результате образец оказывается разделенным на области с очень большой скоростью

накопления деформации и области, в которых она на порядок меньше.

В исследованиях локализации деформации в монокристаллах Fe–13 wt% Mn (сталь Гадфильда) [17] установлено, что с ростом общей деформации в очаге локализации, который соответствует полосе Людерса, происходит взаимосогласованное развитие локальных удлинений  $\varepsilon_{xx}$ , сдвигов  $\varepsilon_{xy}$  и поворотов  $\omega_z$ . В результате анализа распределений локальных деформаций показано, что смена знака локальных сдвигов  $\varepsilon_{xy}$  и поворотов  $\omega_z$  с положительного на отрицательный свидетельствует о повороте материала в пределах очага локализации, что является характерным для механизма пластической деформации двойникованием. Таким образом, механизмы пластического течения, реализующиеся в активных очагах деформации как при растяжении, так и при сжатии, вносят вклад во все компоненты тензора пластической дисторсии — локальные удлинения, сдвиги и повороты.

## 5. Заключение

Таким образом, исследование пластической деформации сжатия кристаллов NaCl и KCl подтвердило справедливость утверждений авторов [1–3] об обнаружении

нового типа волн, связанных с процессами самоорганизации в деформируемых средах [18,19] и возникающих при квазистатической деформации. Ранее такие волны уже наблюдались в металлических поликристаллах и монокристаллах [1–3], и с учетом новых данных волновой характер пластической деформации приобретает универсальный для процессов пластического течения всех материалов смысл. Волновой подход позволяет обнаружить существенные различия в характере деформации разных материалов. Так, например, имеются различные особенности характера локализации (волновой картины) пластической деформации на стадии III в кристаллах NaCl, для которых остальные параметры процесса на стадиях I и II почти совпадают.

Результаты исследований локализации пластической деформации показывают, что реальная картина распределения деформаций в монокристаллах противоречит априори принимаемому предположению о равномерном распределении дислокационных сдвигов в объеме деформируемого кристалла [10]. Пластическая деформация ЩГК осуществляется на всех этапах процесса за счет кристаллографически определенного скольжения по плоскостям с высокими факторами Шмида, и в этом отношении результаты не противоречат имеющимся в литературе представлениям о дислокационных механизмах пластического течения. Однако плотность распределения таких сдвигов по образцу макроскопически неоднородна в пространстве и закономерным образом эволюционирует во времени. Благодаря такой неоднородности пластическое течение локализовано в активных зонах образца, закономерно распределенных по его длине. В зонах между очагами деформация практически не развивается, а активные зоны, по крайней мере на стадиях линейного упрочнения, движутся вдоль оси образца. При таком движении отдельные части образца вовлекаются в пластическое течение не одновременно, а последовательно, одна за другой, причем такие циклы вовлечения могут повторяться несколько раз на протяжении одной стадии процесса.

## Список литературы

- [1] L.V. Zuev. *Ann. Phys.* **10**, 965 (2001).
- [2] L.V. Zuev. *Ann. Phys.* **16**, 286 (2007).
- [3] Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, Б.С. Семухин. *Успехи физ. мет.* **3**, 237 (2002).
- [4] И.В. Обреимов. *Избранные труды. Молекулярная физика. Оптические методы.* Наука, М. (1997). 316 с.
- [5] А.А. Урусовская. В сб.: *Некоторые вопросы физики пластичности кристаллов.* Изд-во АН СССР, М. (1960). С. 75.
- [6] Б.И. Смирнов. *Дислокационная структура и упрочнение кристаллов.* Наука, М. (1981). 236 с.
- [7] Л.Б. Зуев. *Физика электропластичности щелочно-галогидных кристаллов.* Наука, Новосибирск (1990). 120 с.
- [8] Н.М. Меланхолин. *Методы исследования оптических свойств кристаллов.* Наука, М. (1970). 156 с.
- [9] Х. Бюргер. В сб.: *Экспериментальная механика.* Мир, М. (1990). Кн. 1. С. 195.
- [10] Дж.Д. Гилман. *УФН* **80**, 455 (1963).
- [11] L.V. Zuev, V.V. Gorbatenko, S.N. Polyakov. *Proc. SPIE.* **4900**, 2, 1197 (2002).
- [12] В.З. Бенгус, С.Н. Комник, В.А. Левченко. В сб.: *Физика конденсированного состояния.* ФТИНТ АН УССР, Харьков (1969). В. 5. С. 152.
- [13] V.Z. Bengus, T.P. Kovalenko. *Physica Status Solidi A* **56**, 473 (1979).
- [14] В.И. Данилов, С.А. Баранникова, Л.Б. Зуев. *ЖТФ* **73**, 69 (2003).
- [15] В.И. Данилов, С.А. Баранникова, К.В. Гончиков, Л.Б. Зуев. *Кристаллография* **47**, 730 (2002).
- [16] В.И. Данилов, К.В. Гончиков, Л.Б. Зуев. *Кристаллография* **50**, 676 (2005).
- [17] С.А. Баранникова, Л.Б. Зуев. *Письма в ЖТФ* **34**, 24 (2008).
- [18] В.А. Васильев, Ю.М. Романовский, В.Г. Яхно. *Автоволновые процессы.* Наука, М. (1987). 240 с.
- [19] Г. Хакен. *Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам.* Мир, М. (1991). 240 с.