

## УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИЙ ИНВАРИАНТ ДЕФОРМАЦИИ ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

М.В. Надежкин

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. С.А. Баранникова  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634021  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050  
Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
Россия, г. Томск, пл. Соляная, 2, 634003  
E-mail: Nadjzhkin@ispms.tsc.ru

## ELASTOPLASTIC STRAIN INVARIANTS ALKALI-HALIDE CRYSTALS

M.V. Nadezhkin

Scientific Supervisor: Dr. Sci. S.A. Barannikova  
Institute of Strength Physics and Materials Science, Russia, Tomsk, Akademicheskaya str., 2/4, 634021  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
National Research Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050  
Tomsk State University of Architecture and Building, Russia, Tomsk, Solyanaya sq., 2, 634003  
E-mail: Nadjzhkin@ispms.tsc.ru

*Plastic strain localization patterns in compression-strained alkali halide (NaCl, KCl, and LiF) crystals have been studied using a double-exposure speckle photography technique. The main parameters of strain localization autowaves at the linear stages of deformation hardening in alkali halide crystals have been determined. A quantitative relationship between the macroscopic parameters of plastic flow localization and microscopic parameters of strained alkali halide crystals has been established.*

Многочисленные исследования поведения металлических материалов при пластическом деформировании позволили выявить неоднородность распределения пластического течения, которое имеет упорядоченный характер [1]. При этом установлено, что формы макро локализации не зависят от состава, механических свойств и кристаллической структуры металла или сплава [1], а определяются лишь стадийностью пластического течения. Согласно экспериментальным данным было установлено правило соответствия, заключающееся в том, что каждой стадии кривой нагружения пластического течения соответствует определенный тип картины локализации деформации. Установлено, что стадиям линейного деформационного упрочнения соответствует движение по образцу нескольких эквидистантно расположенных очагов локализации пластической деформации. Предложена автоволновая модель локализации пластической деформации на макроскопическом масштабном уровне [2]. В работе [1] было установлено существование инварианта упругой и пластической деформаций в ряде металлов. Однако для обобщения автоволновых представлений на весь спектр существующих материалов необходимо проводить исследования пластического течения и на неметаллических материалах.

В качестве материалов исследования были выбраны щелочно-галоидные кристаллы (NaCl, KCl, и LiF), выращенные методом Киропулоса [3], которые в свое время выступили модельными материалами для изучения механизмов пластического течения при построении теории пластичности. Механические испытания проводились при комнатной температуре (300 К) на универсальной испытательной машине - «Instron-1185» по схеме одноосного сжатия вдоль длинной оси образца. Картины локализации пластического течения наблюдались при использовании специально разработанной для этих целей методики двухэкспозиционной спекл-фотографии [1], которая позволяет определять поле векторов смещения  $r(x, y)$  в деформируемом образце и рассчитывать продольные  $\epsilon_{xx}$ , поперечные  $\epsilon_{yy}$ , сдвиговые  $\epsilon_{xy}$  и поворотные  $\omega_z$  компоненты тензора пластической дисторсии  $\beta_{ij} = \nabla r(x, y)$ .

Анализ зависимостей напряжение-деформация исследуемых щелочно-галоидных кристаллов выявил наличие нескольких линейных стадий деформационного упрочнения, что находится в согласии с литературными данными [4]. В данных исследованиях с использованием оригинальной методики удалось впервые установить зависимость поведения локализованного пластического течения на линейной стадии деформирования данных материалов. Обнаружено принципиальное отличие в поведении движущихся зон локализации деформации в ЩГК при сжатии на линейной стадии и в металлических кристаллах на стадии линейного деформационного упрочнения. В металлах эквидистантно расположенные очаги деформации многократно проходят по образцу, образуя фазовую автоволну, в ЩГК, возможно только однократное прохождение очага [5,6].

Анализ распределений локальных деформаций  $\epsilon_{xx}$  при сжатии образцов NaCl, KCl и LiF показал, что на линейных стадиях в ЩГК, так же как и в металлических материалах, возникают подвижные системы очагов пластического течения. В кристаллах NaCl было выявлено четыре зоны локализации деформации, движущихся со скоростью  $\sim 7.7 \cdot 10^{-5}$  м/с; в KCl две зоны двигались со скоростью  $\sim 6.0 \cdot 10^{-5}$  м/с; и в LiF две зоны перемещались со скоростью  $\sim 8.5 \cdot 10^{-5}$  м/с [5,6]. Полученные данные о скоростях очагов пластического течения в ЩГК удовлетворяют зависимости распространения волн локализованной деформации  $V_{aw}$  от приведенного коэффициента деформационного упрочнения  $G/\theta$  на линейной стадии пластического течения, с коэффициентом корреляции 0,9 (рис. 1).

Сравнение количественных характеристик автоволн локализованного пластического течения металлических материалов с упругими волнами позволило выявить существование упруго-пластичного

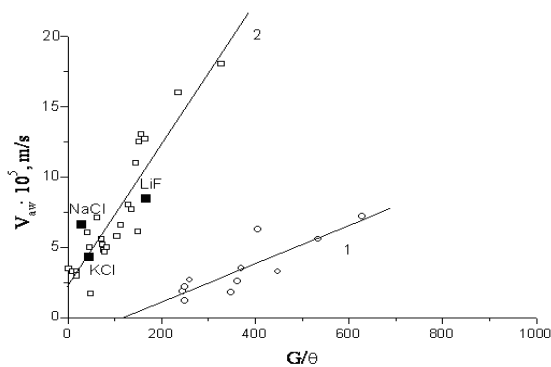


Рис. 1. Обобщенная зависимость скорости волн локализации пластической деформации  $V_{aw}$  от приведенного коэффициента деформационного упрочнения  $G/\theta$  стадии легкого скольжения (прямая 1) и стадии линейного упрочнения (прямая 2):  
 □ — данные для ГЦК-, ОЦК- и ГПУ-монокристаллов металлов[1]; ■ — данные для ЩГК

инварианта, связывающего макропараметры локализованного течения на линейной стадии пластичности ( $\lambda$  – длина автоволны и  $V_{aw}$  – скорость распространения автоволны) с характеристиками кристаллической решетки ( $d_{cp} \approx 10^{-10}$  м – расстояние между плотно упакованными плоскостями в кристаллической решетке

и  $V_t \approx 10^3$  м/с – скорость распространения упругих поперечных волн). Для ряда металлов и сплавов было установлено выполнение эмпирического равенства

$$2\lambda \cdot V_{aw} = d_{\text{н\ddot{o}}} \cdot V_t \quad (1)$$

причем корреляция для исследованных материалов составила  $R=0,9$ . Для ЦГК, как и для ранее исследованных металлов была показана справедливость данного соотношения. Величины  $d_{cp}$  и  $V_t$ , необходимые для проверки соотношения (1), взяты из [7]. Выполнение равенства (1) подтверждается экспериментальными данными, приведенными в таблице 1.

Таблица 1. Параметры локализации пластической деформации и кристаллической решетки на стадии линейного деформационного упрочнения [1]

Величина	Cu	Zn	Zr	Ti	V	$\alpha$ -Fe	$\gamma$ -Fe	Sn	NaCl	KCl	LiF
$2\lambda \cdot V_{aw}$	7,2	7,44	3,84	7,0	5,6	5,1	4,48	4,68	6,16	6,0	8,5
$d_{\text{н\ddot{o}}} \cdot V_t$	4,78	5,22	5,53	6,63	6,06	6,87	6,74	5,29	7,5	6,96	8,82

Выполнение соотношения (1) говорит о том, что существует связь между характеристиками упругих волн в кристаллах ( $d_{cp}$  и  $V_t$ ) с характеристиками автоволн локализации пластического течения ( $\lambda$  и  $V_{aw}$ ). А произведение  $d_{cp} \cdot V_t$  и  $\lambda \cdot V_{aw}$  можно рассматривать в качестве инвариантов упругих и пластических деформационных процессов в твердом теле, которые установлены для случаев деформации ГЦК-, ОЦК-, ГПУ-металлов [1] и ЦГК.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 14-08-31608.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. – Новосибирск: Наука, 2008. – 327 с.
2. Zuev L.B., Barannikova S.A. Evidence for the existence of localized plastic flow auto-waves generated in deforming metals // Natural Science. – 2010. – 2. – P. 476-483.
3. Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. – М.: Мир, 1974. – 540 с.
4. Бенгус В.З., Комник С.Н., Левченко В.А. О природе стадийности деформационного упрочнения щелочно-галоидных кристаллов // Физика конденсированного состояния. – 1969. – № 5. – С. 152–167.
5. Баранникова С.А., Надежкин М.В., Зуев Л.Б. О локализации пластического течения при сжатии кристаллов NaCl и KCl // ФТТ. – 2009. – Т. 51. – № 6. – С. 1081–1086.
6. Баранникова С.А., Надежкин М.В., Зуев Л.Б. О локализации пластической деформации при сжатии кристаллов LiF // ФТТ. – 2010. – Т. 52 – № 7. – С. 1291–1294.
7. Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. – М.: ГИФМЛ, 1961. – 863 с.