

УДК 539.389.1:546.083

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН НА ОСНОВЕ CsI**

*Н. И. Крумликowa, Б. П. Невзорov, Ю. А. Фадеев*

**THE RESEARCH OF MECHANICAL PROPERTIES OF CsI-BASED SINGLE CRYSTAL FIBERS**

*N. I. Krumlikova, B. P. Nevzorov, Yu. A. Fadeev*

Приведено влияния предварительного знакопеременного изгиба на прочностные и пластические свойства волокон галогенидов тяжелых металлов. Показано, что смещение зуба текучести обусловлено переползанием краевой дислокации на расстоянии несколько периодов кристаллической решетки в секунду, а знакопеременные изгибы образцов могут приводить к дефектам упаковки и препятствию перемещения дислокаций.

The influence of preliminary alternating-sign curve on mechanical and plastic properties of heavy metals halogenides fibers is shown. It is evident that the sharp yield point displacement is caused by edge dislocation crawling over the distance of several lattice spacings per second, while the alternating-sign curves of samples can lead to the packing defects and obstacle dislocation displacement.

**Ключевые слова:** волокно, деформация, дислокация.

**Keywords:** fiber, strain, dislocation.

**Введение**

Известно, что присутствие дислокаций непосредственно влияют на механические, электрические, оптические и другие свойства кристаллов. Получение малодислокационных кристаллических материалов имеет большое практическое значение в материаловедении и, в частности, микроэлектронике и вычислительной технике. В этой связи актуальным является изучение процессов генерации и аннигиляции дислокаций в реальных кристаллических материалах.

**Постановка задачи**

Экспериментально механические свойства твердых тел наиболее полно могут быть изучены с помощью диаграмм деформации. Исследование механических свойств новых оптических материалов является одной из предпосылок к их успешному внедрению. В данной работе были изучены механические свойства монокристаллических волокон на основе CsI при комнатной температуре.

**Результаты и обработка данных наблюдений**

Анализ диаграмм растяжения, полученных при испытаниях большинства образцов волокна CsI, показал, что они являются типичными диаграммами, наблюдаемыми при деформации кристаллов (рис. 1) [1, с. 87 – 88].

Однако у 15 % исследованных образцов подвергнутых испытаниям на диаграммах после достижения предела текучести наблюдается небольшой спад напряжения и затем его рост (рис. 2)

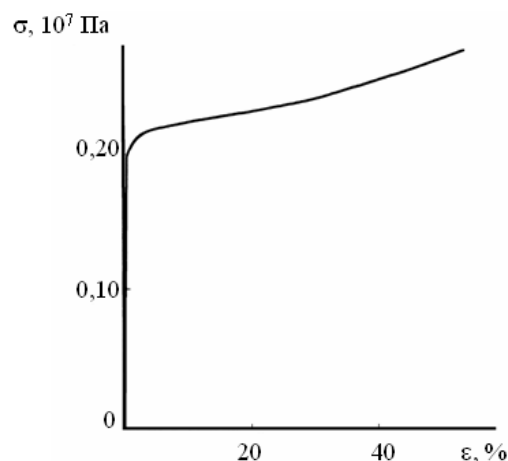


Рис. 1. Диаграмма растяжения волокна CsI

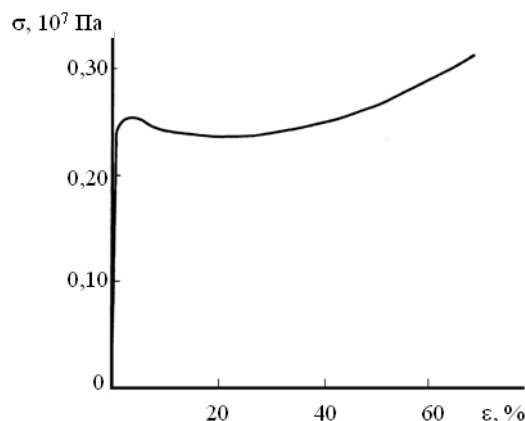


Рис. 2. Диаграмма растяжения волокна на основе CsI

Наблюдаемый пик получил название «зуба текучести». Хорошо известно, что зуб текучести обусловлен возникновением около дислокации атмосферы примесных атомов, которая удерживает дислокацию от дальнейшего продвижения. Если напряжения сдви-

га незначительны, то происходит медленное движение дислокаций вместе с примесной атмосферой – атмосферой Коттрелла. В случае достаточно больших напряжений возможен отрыв дислокаций от ее атмосферы. Это дает возможность к более активному движению дислокации до следующего барьера. Приложенное напряжение может приводить к возникновению новых структурных дефектов, с непрерывно возрастающей внутренней энергией, что приводит к искажению кристаллической решетки, увеличению плотности дислокации. Кроме того, согласно [2, с. 7 – 26] генерация деформационных дефектов возникает в зонах локально структурных или структурно-фазовых превращений. Изучение механических свойств материалов и, в частности, поведения пика деформирующего напряжения вызывает особый интерес, поскольку зуб текучести может способствовать наступлению хрупкого разрушения [3, с. 42 – 47]. По мере протекания пластической деформации плотности дислокации и точечных дефектов будут возрастать. Зависимость плотности дислокаций от времени будет задаваться выражением:

$$\rho = \rho_0 e^{A\tau t}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – внешнее напряжение,  $t$  – время,  $A$  – коэффициент пропорциональности, определяемый механизмом размножения дислокаций,  $\rho_0$  – начальная плотность дислокаций. Из (1) следует, что плотность дислокаций будет экспоненциально возрастать с увеличением напряжения. Возрастание плотности дислокаций может привести к увеличению внутреннего напряжения в кристалле с последующим разрушением кристалла и появлению микротрещин. Дислокации будут отталкиваться, если угол между векторами Бюргерса будет острым и сливаться, если соответствующий угол будет тупой [4]. Поэтому наряду с процессом размножения дислокаций возможен процесс

их исчезновения за счет аннигиляции. Выражение (1) в этом случае принимает вид:

$$\rho = \rho_0 e^{(A+B)\tau t}, \quad (2)$$

где  $B$  – коэффициент пропорциональности, определяемый механизмом слияния дислокаций.

Прочность монокристаллических волокон будет возрастать по мере увеличения плотности дислокаций и уменьшении их подвижности. Как следует из приведенных диаграмм, для упрочняющихся материалов площадки текучести на них практически отсутствуют. В этом случае говорят об условном пределе текучести, который можно приближенно определить, если на диаграмме выбрать прямолинейный горизонтальный участок, т. е. укороченную «площадку текучести». Перемещение дислокаций по плоскости скольжения происходит при сравнительно небольших внешних напряжениях. По мере возрастания плотности дислокаций постепенно нарастает напряжение. При встрече с препятствием, которое затрудняет продвижение дислокаций, происходит увеличение их плотности, а если энергии на преодоление этого препятствия не хватает, то дислокации могут переползти в направлении перпендикулярном плоскости скольжения и продолжать движение в параллельной плоскости скольжения. Пластическая деформация кристалла в этом случае происходит как за счет переползания, так и за счет скольжения дислокаций одновременно. Если при этом плотность дислокаций не изменяется, то и не изменяется скорость деформации образца. Перемещению дислокаций могут препятствовать дефекты упаковки [3].

В результате проведенных испытаний было установлено, что на некоторых диаграммах растяжения зуб текучести располагается на середине площадки текучести (рис. 3 и 4).

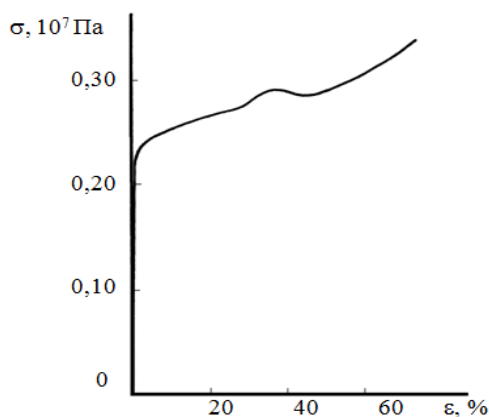


Рис. 3. Диаграмма растяжения волокна на основе CsI со смещенным зубом текучести

Нам представляется, что одной из причин смещения зуба текучести от предела текучести волокна обусловлено переползанием дислокаций. Перемещаясь по плоскости скольжения и встречая барьер, например, примесный атом, дислокация переползает на но-

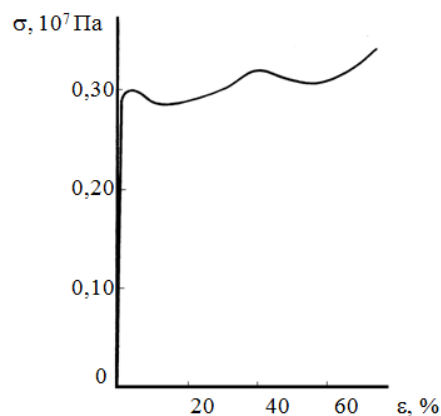


Рис. 4. Диаграмма растяжения волокна на основе CsI со смещенным и несмещенным зубом текучести

вую плоскость скольжения и после огибания барьера продолжает скольжения в первоначальной плоскости. Схематично этот процесс огибания дислокацией препятствия показан на рис. 5.

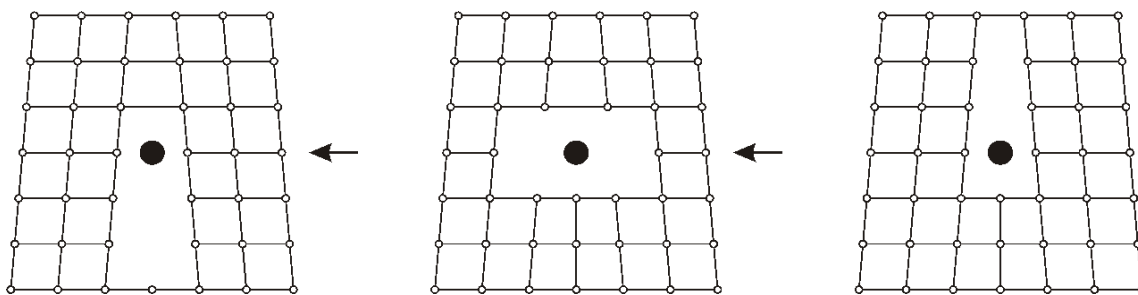


Рис. 5. Схема переползания краевой дислокации в кристалле

Кроме того, краевые дислокации можно рассматривать в качестве проводящих каналов, вдоль которых возможно перемещение примесных атомов. В этом случае процесс самодиффузии будет протекать значительно интенсивнее, чем при отсутствии пластической деформации материала.

На подвижность дислокаций влияют многие факторы, в том числе напряжение и температура кристалла. В работе [4] были приведены экспериментальные кривые зависимости подвижности дислокаций в галоидозамещенных кристаллах от температуры. Исходя из данных, приведенных на рис. 6, следует, что при температуре  $T = 300$  К и напряжении  $0,6$  кГ/мм<sup>2</sup> скорость краевой дислокации составляет  $\sim 1$  нм/с. Известно, что галоидозамещенные кристаллы имеют кубическую сингонию с линейными размерами элементарной ячейки от 40 до 60 нм и продвижение краевой дислокации в течение нескольких десятков секунд сопоставимо с линейными размерами элементарной ячейки кристаллического образца. Анализируя данные по механическим свойствам моно-

кристаллических волокон на основе CsI, необходимо отметить еще несколько факторов, влияющих на плотность дислокаций в образцах. Ранее в работе [5] отмечалось, что на предел текучести могут оказывать влияние размеры образцов с микро- и наноструктурой. Автором [5] в рамках дислокационно-кинетического подхода было установлено, что по мере уменьшения размера поперечного сечения образцов  $D$  происходит снижение их прочности. В кинетическое уравнение для плотности дислокаций входит два члена, один из которых определяет процесс эмиссии дислокаций из поверхностных и приповерхностных источников с плотностью  $n_s$ , а другой исход дислокаций с поверхности:

$$\frac{pdp}{d\gamma} = \frac{n_s}{bL_F} - \frac{m_e}{bD} \rho, \quad (3)$$

где  $m_e = \cos\varphi$ ,  $\varphi$  – угол между осью нагружения кристалла и нормалью к плоскости скольжения дислокаций.

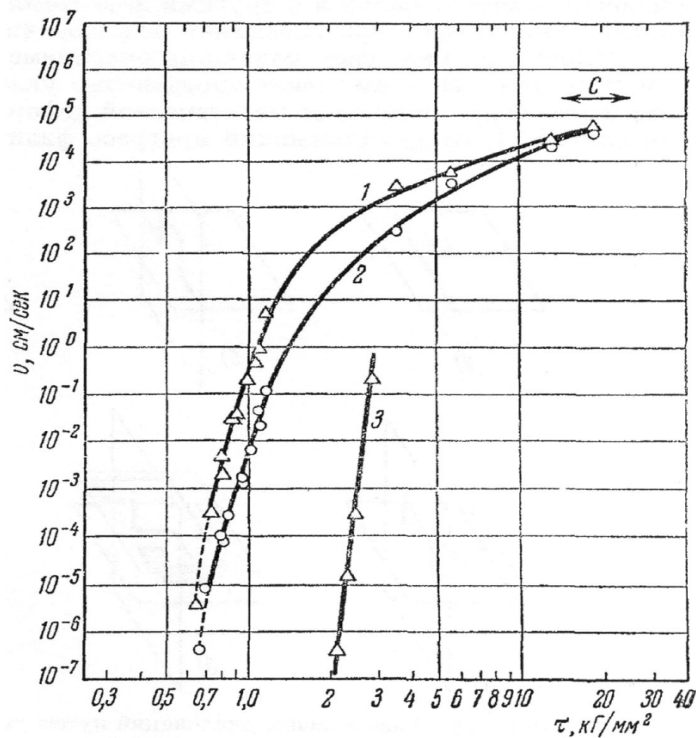


Рис. 6. Подвижность краевых (1) при температурах 300 К и винтовых дислокаций (2, 3) при 300 К и 77 К в кристаллах LiF

Вероятно, что по мере возрастания внешней нагрузки на образец при знакопеременном изгибе плотность дислокаций будет возрастать, что приведет к возрастанию прочностных характеристик монокристаллических волокон. Последнее подтверждается результатами работы [6]. Согласно исследованиям, выполненным в [6, с. 161 – 162], предварительные знакопеременные изгибы монокристаллических волокон галогенидов тяжелых металлов сказываются на прочностных характеристиках в разной степени. Наиболее значительные изменения предела текучести наблюдается в волокнах AgCl. Например, волокон AgCl после 40 циклов изгиба предел текучести возрастает в

3 раза. Аналогичным образом ведут себя монокристаллические волокна на основе CsI.

#### **Заключение**

Таким образом, выполненные исследования по изучению механических свойств монокристаллических волокон на основе CsI показали, что смещение зуба текучести обусловлено переползанием краевой дислокации на расстоянии несколько периодов кристаллической решетки в секунду. Знакопеременные изгибы образцов могут приводить к дефектам упаковки и препятствию перемещения дислокаций.

#### **Литература**

1. Фадеев Ю. А. Исследование механических свойств монокристаллических волокон на основе галогенидов тяжелых металлов / Ю. А. Фадеев, Н. И. Крумликова // Сб. тез. докл. «Иерархические организованные системы живой и неживой природы». – Томск: ИФПМ СО РАН, 2013.
2. Панин, В. Е. Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система / В. Е. Панин, В. Е. Егорушкин // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14.
3. Петухов, Б. В. Теория зуба текучести в малодислокационных кристаллах / Б. В. Петухов // ЖТФ. – 2001. – Т. 71. – Вып. 11.
4. Инденбом, В. Л. Физическая теория пластичности и прочности / В. Л. Индербом, А. Н. Орлов // УФН. – 1962. – Т. 84. – Вып. 3. – С. 557 – 591.
5. Малыгин, Г. А. Влияние поперечного размера образцов с микро- и нанозернистой структурой на предел текучести и напряжения течения / Г. А. Малыгин // ФТТ. – 2012. – Т. 54. – Вып. 3. – С. 523 – 530.
6. Крумликова, Н. И. Влияние знакопеременного изгиба на механические свойства монокристаллических волокон галогенидов тяжелых металлов / Н. И. Крумликова, Ю. А. Фадеев // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3.

#### **Информация об авторах:**

**Крумликowa Надежда Ивановна** – старший преподаватель кафедры физики КузГТУ, 8-(3842) 39-63-71.  
*Nadezhda I. Krumlikova* – Senior Lecturer at the Department of Physics, Kuzbass State Technical University.

**Невзорov Борис Павлович** – доктор педагогических наук, профессор кафедры современного естествознания КемГУ, 8 (384-2) 58-13-01, nevzorov@kemsu.ru.

**Boris P. Nevzorov** – Doctor of Pedagogics, Professor, Head of the Department of Modern Natural Science, Kemerovo State University.

**Фадеев Юрий Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики КузГТУ, 8 (384-2) 39-63-18, uaf49@yandex.ru.

**Yuriy A. Fadeev** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Mathematics, Kuzbass State Technical University.

*Статья поступила в редколлегию 20.01.2014 г.*