

УДК 539.37  
© 1990УПРОЧНЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ KCl  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

С. В. Криштопов, А. Н. Куличенко, Б. И. Смирнов

Изучалось изменение дислокационной структуры и механических свойств чистых и примесных кристаллов KCl в результате предварительного воздействия постоянным электрическим полем в диапазоне 2—15 МВ/м. Установлено, что приложение поля выше некоторого порогового значения приводит к повышению предела текучести кристаллов и не влияет на коэффициент упрочнения. Увеличение предела текучести пропорционально корню из плотности дислокаций, возникающих в кристаллах при обработке полем. Наблюдаемый эффект хорошо коррелирует с упрочнением от деформационных дислокаций леса.

Ранее в [1, 2] было показано, что в щелочно-галогидных кристаллах с поверхностными источниками дислокаций во внешнем электрическом поле развивается объемная дислокационная структура, основными составляющими которой являются краевые дислокационные диполи. Поскольку указанные диполи в отличие от индивидуальных дислокаций не могут перемещаться под действием механических напряжений, их наличие должно приводить к существенному упрочнению кристаллов. Эффект такого упрочнения на кристаллах хлористого калия и исследовался в настоящей работе.

## 1. Экспериментальная методика

Кристаллы KCl выращивались методом Киропулоса на воздухе. Легирующая примесь вводилась в расплав в виде соли BaCl<sub>2</sub>. Исследовались два типа кристаллов: номинально чистый KCl с исходным пределом текучести  $\tau_{y0} = 0.6$  МПа и KCl с добавкой  $7 \cdot 10^{-4}$  ат. % бария и  $\tau_{y0} = 1.7$  МПа. Концентрация примеси в твердом состоянии определялась по ее содержанию в исходном расплаве и по известному коэффициенту распределения примеси между расплавом и кристаллом [3]. Плотность ростовых дислокаций в кристаллах составляла  $\sim 10^4$  см<sup>-2</sup>.

Образцы выкалывались по плоскостям спайности и имели размеры  $2 \times 4 \times 7$  мм соответственно в направлениях [100], [010] и [001] (рис. 1). Далее образец устанавливался в высоковольтную камеру между электродами так, чтобы электрическое поле прикладывалось вдоль направления [100]. Для предотвращения возможных пробоев применялись электроды Роговского [4] (электроды цилиндрической формы с закругленными краями) и полиметилсилоксановая жидкость. Плоская часть электродов имела диаметр 10 мм, так что образец полностью находился в однородном электрическом поле, напряженность которого  $E$  варьировалась в пределах 2—15 МВ/м, а время воздействия составляло несколько секунд. В качестве источника высокого напряжения использовался блок питания рентгеновской установки УРС-60. Для удаления с поверхности кристалла жидкости образец промывался в ацетоне и этиловом спирте. Деформирова-

ние образцов проводилось сжатием вдоль  $[001]$  с постоянной скоростью  $2.2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

Дислокационная структура кристаллов после воздействия электрического поля выявлялась методом избирательного травления на плоскостях  $(010)$  и  $(001)$ . Пример такой структуры приведен на рис. 2. Как уже отмечалось выше, основными ее составляющими являются дислокационные диполи с векторами Бюргера  $[101]$  и  $[10\bar{1}]$  или  $[110]$  и  $[1\bar{1}0]$ .

## 2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Характерные диаграммы нагружения чистых и примесных кристаллов, полученные до и после обработки электрическим полем, представлены на рис. 3. Видно, что во всех исследованных кристаллах наблюдается повышение макроскопического предела текучести после обработки кристалла полем и отсутствует влияние электрического поля на коэффициент упрочнения. Эффект является стабильным и не зависит от времени между обра-

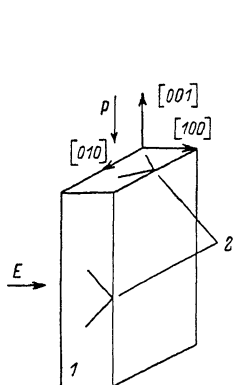


Рис. 1. Схема испытания образцов.

1 — образец; 2 — системы скольжения, в которых происходило движение дислокаций в электрическом поле  $E$ .

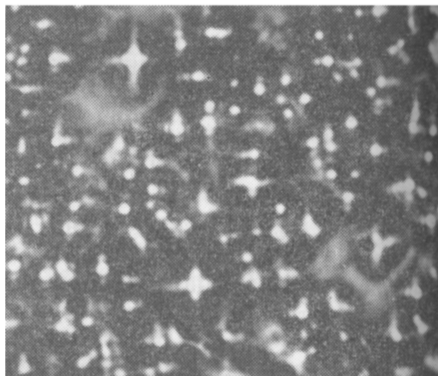


Рис. 2. Картина избирательного травления участка поверхности  $(010)$  чистого  $KCl$  после воздействия электрического поля  $13 \text{ МВ/м}$  ( $\times 1500$ ).

боткой электрическим полем и проведением механических испытаний. Количественно эффект можно характеризовать величиной  $\Delta\tau_y = \tau_{yE} - \tau_{y0}$ , где  $\tau_{yE}$  — предел текучести кристалла после воздействия электрическим полем.

Зависимости  $\Delta\tau_y$  от напряженности электрического поля  $E$  представлены на рис. 4. Видно, что эффект начинает проявляться при достижении некоторой пороговой напряженности электрического поля  $E_c$ , равной  $2.5$  и  $8.0 \text{ МВ/м}$  соответственно для чистых и примесных кристаллов. Для чистых кристаллов в области  $E > E_c$  происходит резкое нарастание эффекта с последующим незначительным увеличением его с ростом  $E$ . Для примесных кристаллов при заданных напряженностях  $E$  удается наблюдать только начальный участок. Максимальный наблюдаемый эффект  $\Delta\tau_y$  как в чистых, так и в легированных барнем кристаллах в исследованном диапазоне электрических полей составлял величину порядка  $1 \text{ МПа}$ ; при этом пределы текучести соответственно возросли по сравнению с исходными значениями более чем в  $2.5$  и  $1.5$  раза. Существенно отметить также то обстоятельство, что значения  $E_c$  совпадают с величинами напряженностей электрического поля, при которых в исследованных кристаллах начинается движение дислокационных диполей от поверхностных источников [6]. Краевые дислокационные диполи в силу своей специфической структуры обладают большей подвижностью в электрическом поле, чем

индивидуальные краевые дислокации [2], поэтому они могут вводиться в объем кристалла при меньших электрических полях, чем отдельные дислокации.

При рассмотрении физической природы наблюдаемого упрочнения естественно предполагать, что оно скорее всего связано с дефектами, воз-

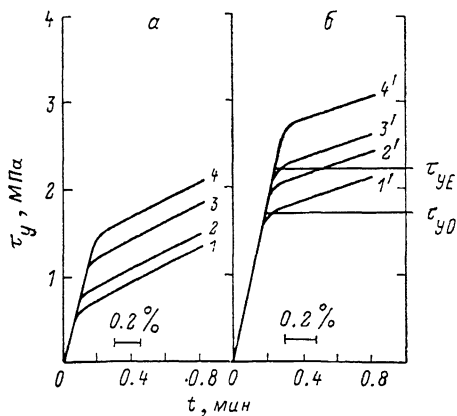


Рис. 3. Диаграммы деформирования чистых (а) и примесных (б) кристаллов после обработки их электрическим полем.

$E$ , МВ/м: 1, 1' — 0 (исходный кристалл); 2 — 2.5; 3 — 4.0; 4 — 14.0; 2' — 8.0; 3' — 13.0; 4' — 15.0.

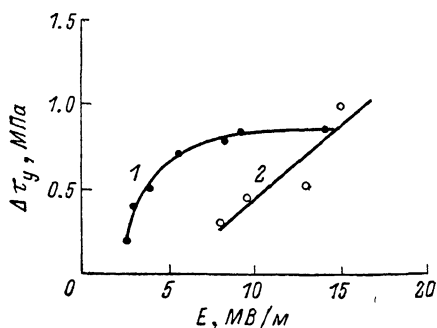


Рис. 4. Зависимость величины эффекта упрочнения от напряженности электрического поля для чистых (1) и примесных (2) кристаллов КСl.

никающими в кристаллах под действием внешнего электрического поля. В данном случае основными дефектами являются краевые дислокационные диполи, которые неподвижны в механическом поле и оказывают сопротивление движению индивидуальных дислокаций при пластическом деформировании.

Как видно из рис. 1, движение краевых компонент дислокаций в электрическом поле может происходить в плоскостях скольжения (110), ( $\bar{1}\bar{1}0$ ), (101) и ( $10\bar{1}$ ). При последующем механическом нагружении вдоль [001] пласти-

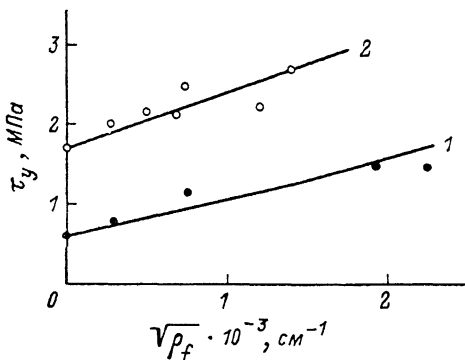


Рис. 5. Зависимость предела текучести чистых (1) и примесных (2) кристаллов КСl от плотности дислокаций наклонного леса.

ческая деформация уже проходила только по плоскостям (101) и ( $10\bar{1}$ ). При такой геометрии скольжения диполи в плоскостях (110) и ( $\bar{1}\bar{1}0$ ) представляют собой для подвижных дислокаций наклонный дислокационный лес [6]. Что касается диполей в плоскостях (101) и ( $10\bar{1}$ ), то одни из них являются ортогональным лесом для деформационных дислокаций, а другие расположены в плоскостях скольжения. В результате оказывается, что большинство введенных электрическим полем дислокаций (диполей) должно давать эффект упрочнения по типу дислокационного леса. В последнем случае, как известно [6], эффект упрочнения  $\Delta\tau_f$  связан с плотностью дислокаций леса  $\rho_f$  соотношением

$$\Delta\tau_f = \alpha_f G b \sqrt{\rho_f}, \quad (1)$$

где  $G$  — модуль сдвига,  $b$  — величина вектора Бюргера,  $\alpha_f$  — константа, причем для наклонного леса  $\alpha_f$  больше, чем для ортогонального.

Для определения плотности лесовых дислокаций  $\rho_f$  была произведена оценка плотностей ямок травления  $N$  на плоскостях (010) и (001) после воздействия на кристалл электрическим полем разной напряженности. Величина общей плотности  $N$  включает в себя плотности ямок травления на винтовых  $N_s$  и краевых  $N_e$  компонентах дислокаций, причем  $N_e \gg N_s$ . Поскольку основной вклад в эффект упрочнения следует ожидать от дислокаций наклонного леса, в расчет принималась плотность именно этих дислокаций. Тогда величину  $\rho_f$  можно определить по известным значениям  $N_e$  и  $N_s$  из соотношения [6]  $\rho_f = (N_e + N_s) / \sqrt{2} = N_i \sqrt{2}$ .

Зависимости пределов текучести чистых и примесных кристаллов КС1 от плотности дислокаций наклонного леса, возникающих в результате воздействия электрического поля, представлены на рис. 5 в координатах  $\tau_f - \sqrt{\rho_f}$ . Видно, что в исследованном диапазоне электрических полей эти зависимости носят линейный характер, т. е.  $\tau_{fE} = \tau_{f0} + C\sqrt{\rho_f}$ , где  $C$  — константа. Иначе говоря, эффект упрочнения от электрического поля может быть описан соотношением (1), справедливым для деформационного упрочнения. Оценка величины  $\alpha_{fE}$ , произведенная на основании экспериментальных зависимостей  $\tau_f$  ( $\sqrt{\rho_f}$ ) по формуле (1), дает для чистых и примесных кристаллов КС1 значения 0.6 и 0.9 соответственно. Для деформационного наклонного леса в щелочно-галогидных кристаллах при аналогичном представлении экспериментальных данных величина  $\alpha_{fd} = 0.7$  [7]. Учитывая некоторую неопределенность в величине  $\rho_f$  из-за неучета ортогонального леса и значительной неоднородности образующейся в электрическом поле дислокационной структуры [1, 2], можно считать, что полученные значения  $\alpha_{fE}$  и  $\alpha_{fd}$  находятся в хорошем согласии. Следует также отметить аналогию в поведении коэффициента упрочнения, который не изменяется как после обработки полем, так и после введения деформационных дислокаций леса [7].

Таким образом, введение в кристаллы КС1 электрическим полем линейных дефектов приводит к эффекту упрочнения, аналогичному упрочнению от деформационных дислокаций леса и описываемому выражением типа (1). В то же время электрическое упрочнение обладает и некоторым преимуществом, так как при этом отсутствует макроскопическая деформация кристалла и не происходит образования локальных упругих полей одного знака [1, 2]. Эти обстоятельства позволяют упрочнять кристаллы в электрическом поле без изменения их формы и без ухудшения макроскопических оптических свойств.

#### Список литературы

- [1] Kataoka T., Colombo L., Li J. C. M. // Phil. Mag. A. 1984. V. 49. N 3. P. 395—407.
- [2] Куличенко А. Н., Смирнов Б. И. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 9. С. 2796—2801.
- [3] Андреев Г. А., Бурейко С. Ф. // ФТТ. 1967. Т. 9. № 1. С. 79—82.
- [4] Сканави Г. И. Физика диэлектриков. М., 1958. 907 с.
- [5] Куличенко А. Н., Криштопов С. В., Смирнов Б. И. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 6. С. 1826—1831.
- [6] Смирнов Б. И. Дислокационная структура и упрочнение кристаллов. Л., 1981. 235 с.
- [7] Зимкин И. Н., Самойлова Т. В., Смирнов Б. И. // Проб. прочности. 1974. № 1. С. 85—90.