

Деформация кристаллов NaCl в условиях совместного действия магнитного и электрического полей

© А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, Н.Н. Беккауер, А.Е. Смирнов

Институт кристаллографии Российской академии наук,
117333 Москва, Россия

E-mail: public@mechan.incr.msk.su

(Поступила в Редакцию 30 июня 1999 г.

В окончательной редакции 6 августа 1999 г.)

Обнаружено сильное макропластическое влияние слабых магнитных и электрических полей ($B \leq 0.4$ Т, $E \sim 1$ кВ/м) при их совместном действии на образцы NaCl в процессе активного деформирования последних с постоянной скоростью $\dot{\epsilon} = \text{const}$. В отсутствие магнитного поля наблюдение электрических эффектов в макропластичности тех же кристаллов требует приложения полей $E \geq 10^3$ кВ/м. Измерены количественные зависимости макропластичности от магнитного и электрического полей и от скорости деформации. Наблюдаемым эффектам предложена физическая интерпретация.

Как известно [1–3], краевые дислокации в ЩГК при их скольжении способны консервативно переносить нескомпенсированный электрический заряд, знак и величина которого определяются примесным составом кристаллов и соответствующим пересыщением анионных или катионных вакансий. Именно это обстоятельство лежит в основе так называемого эффекта Степанова [4], проявляющегося в макрополяризации ЩГК при их деформировании. Естественно, что по той же причине приложение электрического поля также оказывает влияние на поведение кристаллов при механических испытаниях. Замечено снижение напряжения пластического течения [5,6], ускорение деформации при ползучести [7], увеличение скорости деформационного упрочнения при активном нагружении [8], возрастание внутреннего трения [3,9]. Установлено, что электрическое воздействие способствует активизации дополнительных систем скольжения [8] и источников дислокаций в границах блоков [9], приводя к увеличению общей плотности дислокаций [3]. Следует, однако, иметь в виду, что для наблюдения всех этих эффектов требуются очень высокие электрические поля напряженностью порядка 10^5 – 10^6 В/м.

Обнаружение магнитопластического эффекта (МПЭ) [10], заключающегося в облегченном откреплении дислокаций от точечных дефектов в немагнитных кристаллах (в том числе в ЩГК), помещенных в постоянное магнитное поле $B \sim (0.1-1)$ Т, обеспечивает новые возможности увеличения пластической чувствительности к внешним воздействиям на кристалл. МПЭ проявляется как в увеличении подвижности индивидуальных дислокаций [11,12], так и на макроскопическом уровне, приводя к резкому понижению предела текучести [13,14], уменьшению микротвердости [15] и изменению фундаментальных характеристик внутреннего трения [16].

Особенно ярко сказывается МПЭ на увеличении чувствительности пробегов индивидуальных дислокаций в ЩГК к внешнему электрическому полю. Согласно [11,17,18], включение даже небольшого магнитно-

го поля в несколько десятых тесла повышает указанную чувствительность на 2–3 порядка. Иными словами, во внешнем магнитном поле индивидуальные дислокации резко реагируют уже на электрические поля $E \sim 10^2$ – 10^3 В/м.

Представляет интерес исследовать макропластическую реакцию ЩГК на электрические воздействия в условиях МПЭ. С этой целью в настоящей работе исследовано влияние совместного действия магнитного и электрического полей на макроскопическую деформацию кристаллов NaCl при сжатии с постоянной скоростью.

1. Методика эксперимента

Эксперименты проводились на тех же объектах и той же установке, что были использованы в [13]. Постоянное магнитное поле прикладывали перпендикулярно оси нагружения, а электрическое — вдоль этого направления. Латунные электроды приклеивались к щекам корундовых пуансонов и находились в контакте с торцами образцов. Магнитная индукция варьировалась от 0 до 0.4 Т, а напряженность электрического поля — от 0 до 20 кВ/м. Деформацию производили при комнатной температуре со скоростями от $5 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ с $^{-1}$.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 1 представлены кривые деформации, полученные при сжатии NaCl с двумя разными скоростями в отсутствие полей (кривая 1), при действии только магнитного поля 0.4 Т (кривая 2) и при дополнительном действии электрического поля 9 кВ/м (кривая 3). Магнитное поле понизило уровень кривой, включая предел текучести, сократило протяженность всех стадий деформации и снизило коэффициент деформационного упрочнения Θ_{II} . Отличительными чертами кривой 3 являются

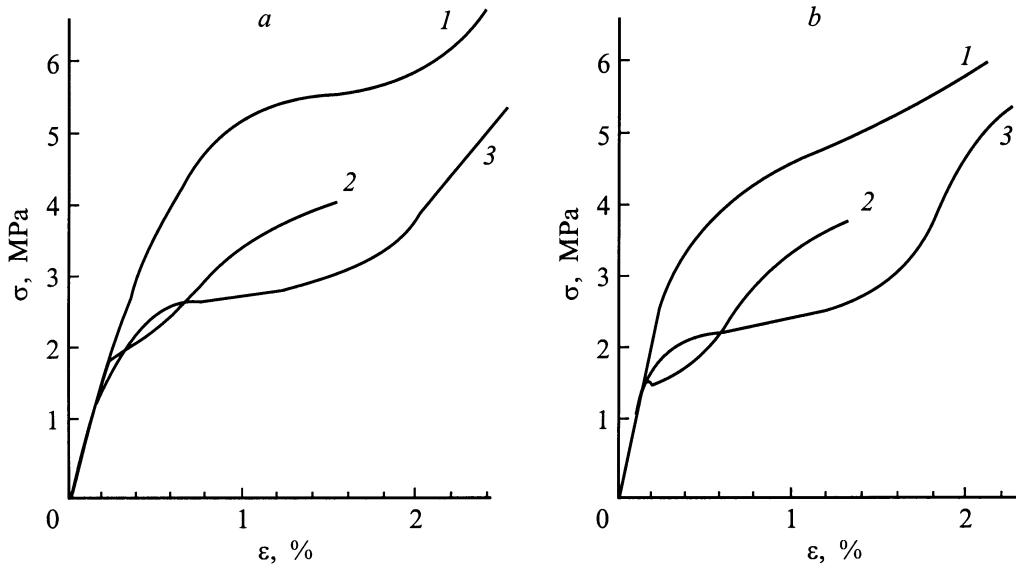


Рис. 1. Кривые деформации кристаллов NaCl, сжатых в отсутствие магнитных и электрических полей (1), при наложении магнитного поля $B = 0.4 \text{ Т}$ (2), а также суммарного магнитного (0.4 Т) и электрического (9 kV/m) полей (3): $a - \dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, $b - \dot{\epsilon} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

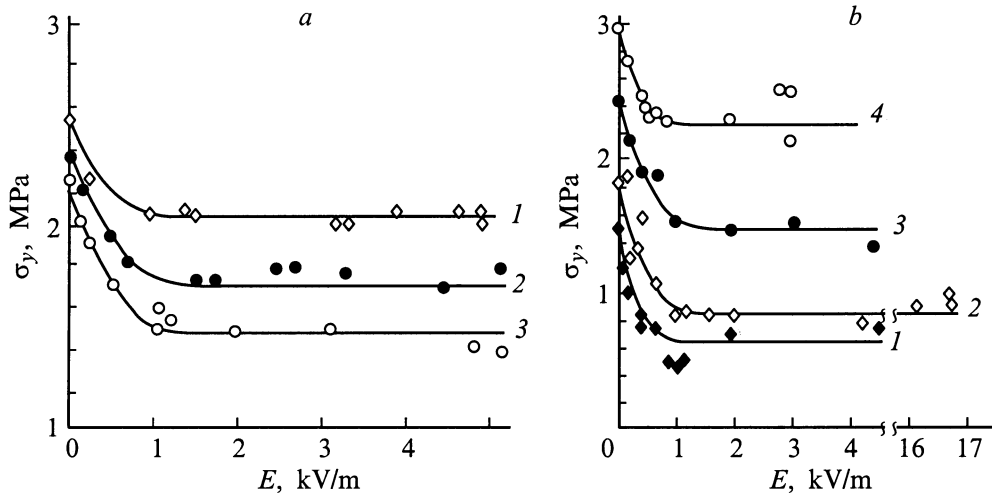


Рис. 2. Зависимость предела текучести от напряженности электрического поля: $a -$ для разных $B = 0.2$ (1), 0.3 (2) и 0.4 Т (3). $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, $b -$ для разных $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (1), $8 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (2), $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ (3) и $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (4), $B = 0.4 \text{ Т}$.

дополнительное снижение предела текучести, удлинение стадии легкого скольжения и снижение угла ее наклона Θ_I , а также увеличение коэффициента упрочнения сразу за пределом текучести и на второй стадии упрочнения Θ_{II} по сравнению с кривой 2. В отсутствие магнитного поля использованные электрические поля не влияли на кривые деформации NaCl. Изменения наступали лишь при полях порядка 10^3 kV/m [8].

Сокращение стадий деформации и снижение Θ_{II} под влиянием только магнитного поля объясняются стимулированием магнитным полем более частой смены активных систем скольжения [13,14]. Судя по удлинению первой стадии деформации и снижению Θ_I (кривая 3), электрическое поле, напротив, обеспечивает условия для

более длительного действия первичной системы скольжения на начальных этапах деформации. Возрастание при совместном действии магнитного и электрического полей коэффициентов Θ_{II} деформационного упрочнения следует трактовать как следствие стимулирования электрическим полем роста плотности дислокаций в соответствии с формулой [19]

$$\Theta_{II} \sim Gb\sqrt{\rho},$$

где G — модуль сдвига, b — вектор Бюргерса, ρ — плотность дислокаций.

На рис. 2, a показано изменение предела текучести σ_y с ростом напряженности электрического поля E для разных магнитных индукций B .

На экспериментальных кривых четко выражены две стадии найденных зависимостей — первоначальный спад и последующее насыщение при E выше 1–1.5 kV/m. Снижение σ_y тем больше и тем круче, чем выше B .

Аналогичные зависимости получены при фиксированном B и варьировании скорости деформации $\dot{\epsilon}$ (рис. 2, *b*). Значения E насыщения находятся в тех же пределах, что и на рис. 2, *a*. Скорость и глубина спада тем больше, чем ниже $\dot{\epsilon}$. На примере опытов при $\dot{\epsilon} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ было показано, что уровень насыщения сохраняется до $E \geq 20 \text{ kV/m}$.

Таким образом, и параметры макропластичности кристаллов NaCl во внешнем магнитном поле увеличивают свою чувствительность к электрическому полю на несколько порядков. Действительно, обнаруженные при совместном действии слабых магнитных и электрических полей ($B \leq 0.4 \text{ Т}$, $E \sim 1 \text{ kV/m}$) эффекты (снижение напряжения течения, увеличение скорости деформационного упрочнения и плотности дислокаций) в отсутствие магнитного поля обнаруживаются лишь при $E \geq 10^3 \text{ kV/m}$.

Причина этого представляется достаточно очевидной. В обоих случаях порог чувствительности к электрическому полю определяется из условия соразмерности электрической силы, действующей на дислокацию, с силой сопротивления ее движению. Таким образом, радикальное понижение этого порога при включенном магнитном поле, по-видимому, отражает соответствующее уменьшение торможения дислокации при "выключении" ее взаимодействия с основными примесными центрами в результате определенных спинзависящих переходов в системе дислокация–примесь во внешнем магнитном поле.

Насыщение наблюдаемого снижения предела текучести σ_y с ростом напряженности электрического поля, по-видимому, отражает "остаточную" роль винтовых компонент дислокационных петель в макропластичности. Напомним, что винтовые дислокации в основных системах скольжения в ЩГК являются незаряженными. Для их движения со скоростью, лимитируемой заданной скоростью деформации $\dot{\epsilon}$, необходимо приложение определенного механического напряжения, которое, возможно, и соответствует уровню σ_y при $E \rightarrow \infty$.

Заметим, что с ростом $\dot{\epsilon}$ максимальная глубина уменьшения напряжения течения σ_y под действием электрического поля уменьшается (рис. 2, *a*). Это коррелирует с обнаруженным ранее [20] уменьшением динамического заряда на краевых дислокациях с повышением скорости деформации $\dot{\epsilon}$.

Список литературы

- [1] А.А. Урусовская. УФН **96**, 1, 39 (1968).
- [2] R.W. Whitworth. Adv. Phys. **24**, 2, 203 (1975).
- [3] Н.А. Тяпунина, Э.П. Белозерова. УФН **156**, 4, 683 (1988).
- [4] A.W. Stepanow. Z. Phys. **81**, 7/8, 560 (1933).
- [5] А.Н. Куличенко, Б.И. Смирнов. ФТТ **23**, 4, 1029 (1981).

- [6] А.Н. Куличенко, Б.И. Смирнов. ФТТ **25**, 5, 1523 (1983).
- [7] Н.В. Загоруйко, Е.Д. Шукин. Кристаллография **13**, 5, 908 (1968).
- [8] А.А. Урусовская, А.Е. Смирнов. Н.Н. Беккауер. Изв. вузов. Чер. металлургия **8**, 15 (1993).
- [9] Э.П. Белозерова, А.А. Светашов, Н.А. Тяпунина. Кристаллография **28**, 6, 1176 (1983).
- [10] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Т.М. Перекалина, А.А. Урусовская. ФТТ **29**, 2, 567 (1987).
- [11] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, O.L. Kazakova, E.Yu. Mikhina, E.A. Petrzhik. Mater. Sci. Engng. **A234–236**, 617 (1997).
- [12] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. ЖЭТФ **115**, 2, 605 (1999).
- [13] А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккауер. Письма в ЖЭТФ **65**, 6, 470 (1997).
- [14] В.И. Альшиц, Н.Н. Беккауер, А.Е. Смирнов, А.А. Урусовская. ЖЭТФ **115**, 3, 951 (1999).
- [15] Yu.I. Golovin, R.B. Morgunov, D.V. Lopatin, A.A. Baskakov. Phys. Stat. Sol. (a) **160**, 1, R3 (1997).
- [16] Э.П. Белозерова, А.А. Светашов, В.Л. Красников. Изв. РАН. Сер. физ. **61**, 2, 291 (1997).
- [17] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.Ю. Михина, Е.А. Петржик, ФТТ **35**, 5, 1397 (1993).
- [18] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.Ю. Михина, Е.А. Петржик, ФТТ **38**, 8, 2426 (1996).
- [19] N.F. Mott. Phil. Mag. **43**, 7, 1151 (1952).
- [20] В.И. Альшиц, М.В. Галусташвили, И.М. Паперно. Кристаллография **20**, 6, 1113 (1975).