

© 1991

ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

А. А. Урусовская, Н. Н. Беккауер, А. Е. Смирнов

Если в процессе деформации щелочно-галогидных кристаллов к ним прикладывать электрическое поле, то можно наблюдать как спады напряжения течения (электропластический эффект), так и изменение скорости деформационного упрочнения. Последнее явление, названное авторами электромеханическим эффектом, изучено в настоящей работе на примере сжатия кристаллов хлористого натрия.

Обнаружено, что при включении электрического поля от 0.5 до $5 \text{ МэВ} \cdot \text{м}^{-1}$ наблюдается увеличение наклона кривых деформации. Изменение наклона тем больше, чем выше напряженность электрического поля и ниже скорость деформации. Показано, что эффект не зависит от расположения электродов относительно оси нагружения и не связан с электрострикцией, движением заряженных дислокаций или перестройкой имеющихся до деформации локальных препятствий для дислокаций. Механизм электромеханического эффекта остается предметом дальнейшего исследования.

Рассматривая вопрос об электропластическом (ЭПЭ) или электромеханическом эффекте (ЭМЭ) в кристаллах-диэлектриках, следует иметь в виду два его возможных проявления — в микро- и макромасштабе. Микроэффект — это стимулирование движения дислокаций полем, а также их ускорение или замедление под действием поля, изменение формы дислокационных розеток [1-5]. Макроэффект заключается в характерных спадах напряжения течения на кривой сжатия в период приложения к кристаллу электрического поля при деформации [6-12]. В работах [6-12] изучено влияние на спады напряжения течения исследуемого кристалла, присутствия примесей, условий испытания. Однако на приводимых в статьях кривых деформации помимо спадов напряжения четко видно изменение под влиянием поля наклона кривых деформации, но ни в одной из работ этому обстоятельству не уделено должного внимания. В настоящей работе выполнено исследование именно этого проявления электромеханического эффекта.

1. Методика эксперимента

В качестве объекта исследования были выбраны технически чистые промышленные кристаллы NaCl , «чистые» и с примесью никеля, который добавлялся в количестве от 0.01 до 0.2 вес. % в шихту. Присутствие никеля в образцах не контролировалось. Из кристаллов выкалывали по спайности образцы размером приблизительно $4 \times 3 \times 10$ мм. Образцы подвергали сжатию на релаксметре Регеля—Дубова со скоростью от 10^{-3} до 10^{-5} с^{-1} при комнатной температуре. Электрическое поле прикладывали как вдоль направления нагружения, тогда электроды соприкасались с образцом ($E \parallel P$), так и в поперечном направлении ($E \perp P$), в этом случае между электродом и образцом был зазор $1-2$ мм. На рис. 1 дана схема эксперимента по деформации кристалла в электрическом поле. Напряженность электрического поля варьировалась в пределах $0.5-5 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1}$. Во избежание электропробоя образец и электроды помещали в ванночку с силиконовым маслом. Опыты проводили как в естественно состаренных, так и отожженных образцах.

Для наблюдения изменения наклона кривых деформации при включении электрического поля последнее следует прикладывать к стороне об-

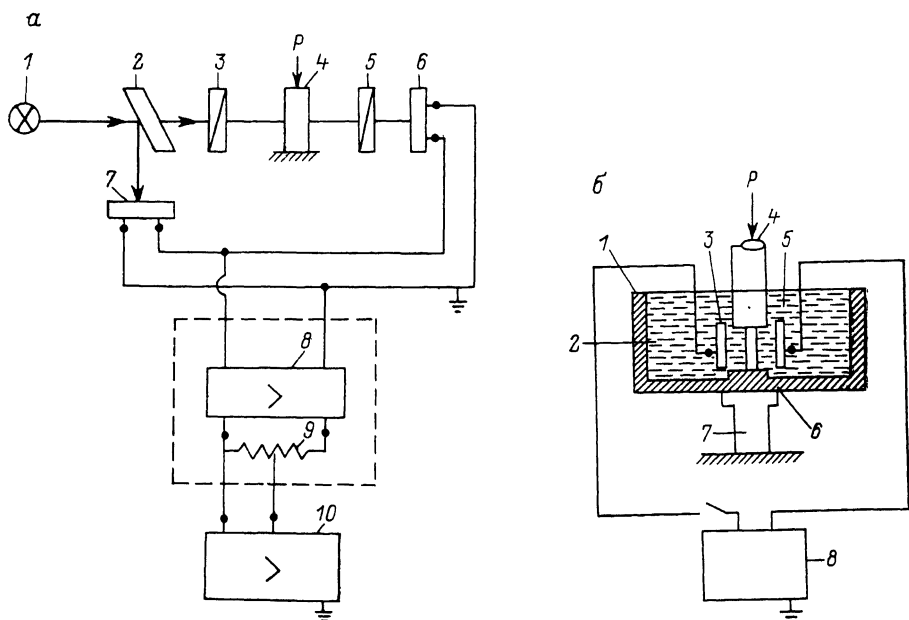


Рис. 1. Схема установки для изучения электромеханического эффекта.

а: электрическая и оптическая схемы. 1 — лампа накаливания, 2 — полупрозрачное зеркало, 3 и 5 — поляриды, 4 — оптический динамометр, 6 и 7 — полупроводниковые фотоэлементы, 8 — усилитель постоянного тока У5-10, 9 — делитель напряжения, 10 — самописец КСП-4; б: ячейка с образцом. 1 — ванночка, 2 — силиконовое масло, 3 и 5 — медные электроды, 4 — верхний подвижный пуансон, 6 — кристалл, 7 — неподвижный пуансон, 8 — источник постоянного тока АФ-3. Электрическое поле приложено перпендикулярно оси нагружения ($E \perp P$).

разца с выходами краевых дислокаций [7, 10, 11]. Если же специально не позаботиться об обеспечении скольжения по одной или двум ортогональ-

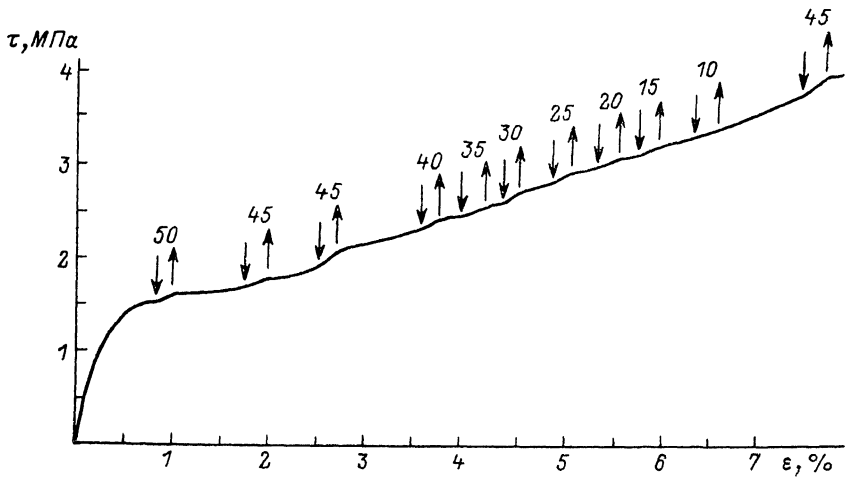


Рис. 2. Кривые деформации NaCl, в процессе которой периодически включали (↓) и выключали (↑) электрическое поле разпой величины. Цифры указывают разность потенциалов в кВ. Скорость деформации $3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

ным системам скольжения, когда на одну из сторон выходят только винтовые дислокации, а на другую — только краевые, то спады напряжения течения не происходят, а изменение наклона кривых можно получать при

любом расположении электродов.¹ В наших опытах образцы имели почти квадратное сечение, что исключало отбор определенных систем скольжения. Это давало нам возможность наблюдать изменение наклона кривых при любом расположении электродов.

На рис. 2 представлены полученные нами кривые деформации кристаллов NaCl с периодическим включением (\downarrow) и выключением (\uparrow) электрического поля напряженностью $3 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1}$. Видно, что включение поля вызывает увеличение коэффициента деформационного упрочнения. Чем выше напряженность поля, тем сильнее отклонение угла наклона кривой деформации от наклона при деформации в отсутствие электрического воз-

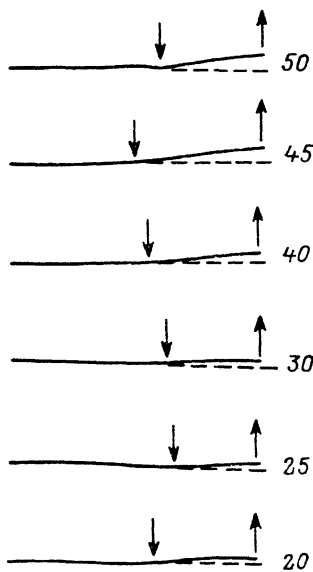


Рис. 3. Изменение наклона кривых сжатия при включении поля разной напряженности.

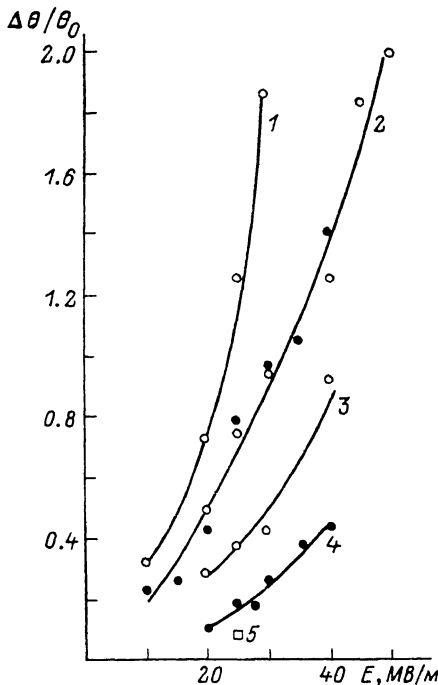


Рис. 4. Зависимость относительного изменения наклона кривой деформации $\Delta\theta/\theta_0$ от напряженности приложенного электрического поля при разных скоростях механического нагружения.

1 — $1.2 \cdot 10^{-5}$, 2 — $3 \cdot 10^{-5}$ (светлые кружки — $E \parallel P$, черные — $E \perp P$), 3 — $5 \cdot 10^{-5}$, 4 — $7.5 \cdot 10^{-5}$, 5 — $1.3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

действия. Это демонстрирует рис. 3, на котором изображены участки кривой сжатия до и после включения поля разной напряженности. Замечено, что изменение наклона происходит в течение не всего времени действия поля, а лишь части времени, тем меньшей, чем ниже величина E .

Очень важным условием наблюдения этого эффекта является использование малых скоростей деформации. Изменение наклона кривых при включении поля мы видели только при скоростях ниже $1 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, и это изменение тем больше, чем ниже скорость деформации. На рис. 4 приведена зависимость относительного изменения наклона $\Delta\theta/\theta_0$ от напряженности поля для разных скоростей деформации, а рис. 5 иллюстрирует спад эффекта с ростом скорости деформации. Введение примеси никеля

¹ Заметим, что необходимо исключить влияние наводок в системе регистрации, которые также вызывают спады на кривых деформации при включении поля. Однако в отличие от спадов, обусловленных электропластическим эффектом, спады от наводок растут с ростом напряженности поля не по квадратичному, а по линейному закону и с ростом приложенного механического напряжения только увеличиваются, в то время как при ЭПЭ спады за пределом текучести уменьшаются [11].

также оказывает существенное влияние на величину эффекта, подавляя его (рис. 6).

Существенно заметить, что результат совершенно не зависит от расположения электродов и наличия или отсутствия зазора между электродом и образцом. На рис. 4 (кривая 3) и 5 представлены данные измерений при разном расположении электродов относительно направления нагружения, отмеченные черными ($E \perp P$) или светлыми ($E \parallel P$) кружками.

Обнаруженный разными авторами факт изменения коэффициента деформационного упрочнения при наложении поля в процессе деформации, а также выявленные в настоящей работе закономерности не оставляют оснований для сомнений в существовании еще одного проявления электропластического эффекта, причем связанного не с разупрочнением,

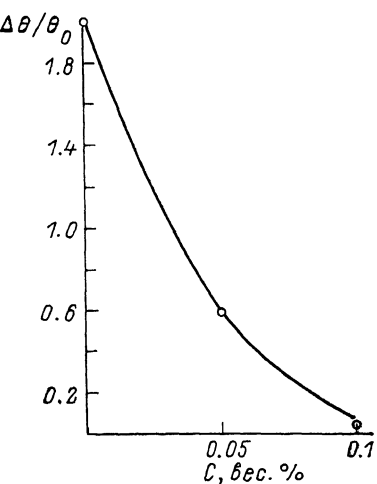
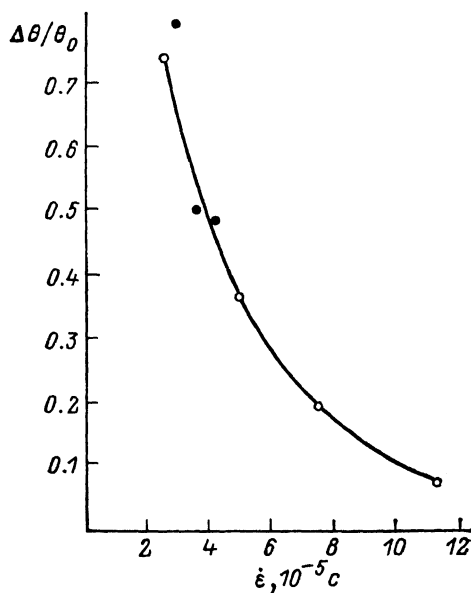


Рис. 5. Зависимость $\Delta\theta/\theta_0$ от скорости деформации ($E=3 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1}$).

Рис. 6. Зависимость $\Delta\theta/\theta_0$ от концентрации никеля ($E=2 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1}$).

Черные кружки — $E \perp P$, светлые — $E \parallel P$.

а с упрочнением. Разное проявление двух эффектов означает, что они имеют разную физическую природу. Мы предлагаем ввести два термина для обозначения разных эффектов: электропластический эффект (ЭПЭ) для разупрочнения и электромеханический эффект (ЭМЭ) для упрочнения.

3. Изучение природы ЭМЭ

В данной статье описаны результаты первых попыток выяснить причину увеличения скорости деформационного упрочнения. Были рассмотрены следующие возможные причины: 1) влияние электрострикции, 2) движение заряженных дислокаций, 3) перестройка центров торможения дислокаций, 4) влияние адсорбированной на поверхности пленки воды.

Если предположить, что эффект обусловлен электрострикцией, то он должен зависеть от ориентации оси нагружения по отношению к вектору напряженности электрического поля, т. е. расположения электродов. Эффект должен наблюдаться, когда направления P и E совпадают, и должен отсутствовать или быть обращенным, когда P и E взаимно перпендикулярны. Эксперимент показал, что одно и то же изменение угла наклона кривой имеет место при любом взаимном расположении P и E , т. е. наш эффект (ЭМЭ—П) не связан с электрострикцией.

Отсутствие проявления стрикции в условиях, когда электрическое поле накладывается не в статике, а при активном нагружении, можно объяс-

нить тем, что стрикционная деформация (сотые доли процента) ничтожно мала по сравнению с протекающей в наших опытах пластической деформацией (проценты).

При объяснении спадов напряжения течения важная роль отводится воздействию поля на движение заряженных дислокаций — поле стимулирует их движение. Однако в нашем случае — упрочнения — дислокации тормозятся при действии поля, следовательно, перемещение заряженных дислокаций под влиянием поля не может обусловить электромеханический эффект.

Затруднение движения дислокаций в электрическом поле может быть вызвано увеличением количества имеющихся в кристалле центров торможения или их усилением. Это предположение можно проверить опытами на γ -облученных кристаллах, в которых присутствует коллоидальный натрий, вызывающий полосу поглощения около 600 нм [13]. Мы продеформировали γ -облученный NaCl в поле и без него до одинаковой степени де-

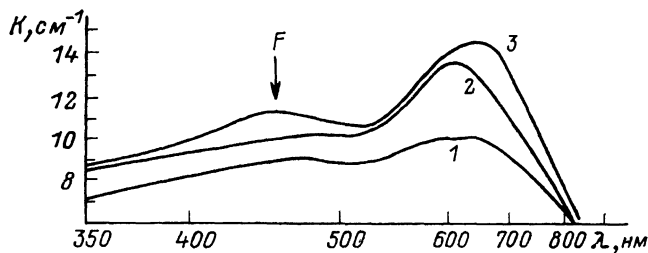


Рис. 7. Спектр поглощения γ -облученного NaCl.

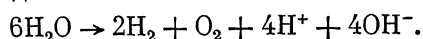
1 — исходный кристалл, 2 — деформирован в поле $E=3 \text{ МВ}\cdot\text{м}^{-1}$, 3 — деформирован без поля. Скорость деформации $1\cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, степень сжатия 18 %.

формации 18 % и сняли спектры поглощения, сопоставив их со спектром недеформированного образца (рис. 8). Деформация в отсутствие поля значительно увеличила интенсивность полосы и сдвинула ее максимум в сторону больших длин волн. Таким образом, деформация увеличивает не только количество электронных центров окраски [14], но и коллоидальных выделений. Деформация в электрическом поле также увеличила высоту полосы, но в меньшей степени, а максимум полосы сместился в сторону меньших длин волн. Согласно [13], смещение пика поглощения обусловлено изменением размера коллоидальных частиц Na: сдвиг в сторону больших длин волн соответствует укрупнению коллоидов, а сдвиг в сторону меньших длин волн — измельчению частиц. Из экспериментальных данных и сведений, приведенных в [13], следует, что в недеформированном образце средний размер частиц Na составляет 50 мкм, после деформации без поля — 75 мкм, а после испытаний в поле $E=2 \text{ МВ}\cdot\text{м}^{-1}$ средний размер натриевых коллоидов уменьшается до 40 мкм. Таким образом, деформация γ -облученных кристаллов NaCl в электрическом поле приводит к измельчению частиц, а судя по меньшей высоте пика поглощения по сравнению со случаем деформации без поля, и к уменьшению их количества.

Измельчение и снижение концентрации коллоидов натрия означает, что электрическое поле должно снижать и количество электронных центров окраски. Действительно, если при деформации без поля наряду с ростом количества коллоидов появляются одиночные электронные центры окраски (F -центры), то при деформации в поле F -полосы не наблюдаются (рис. 7). Таким образом, предположение о том, что ЭМЭ обусловлен укрупнением и увеличением концентрации существовавших до деформации центров торможения также оказывается несостоятельным.

Стоит обратить внимание на поверхностную пленку воды, образующуюся на образцах после их выкалывания. В случае ее важной роли ЭМЭ не должен наблюдаться в отсутствие пленки. Несколько образцов было выколото в силиконовом масле, предохранявшем свежесколотую поверхность от попадания влаги из воздуха. При деформации этих образцов

усиления деформационного упрочнения под влиянием поля не наблюдалось независимо от расположения электродов относительно оси сжатия. Это означает, что воздействие поля на систему кристалл—пленка воды играет определенную роль. В связи с тем что ЭМЭ наблюдается в NaCl только при наличии на поверхности водяного слоя, следует написать возможную химическую реакцию при воздействии поля на кристалл с пленкой воды. При этом возбуждается электролиз и на электродах протекают химические реакции разложения молекул воды, которые в конечном счете можно представить в виде [15].



катод анод анод катод

Можно было бы предположить, что продукты электролиза по механизму дислокационно-динамической диффузии [16] могут захватываться рождающимися от приповерхностных источников и движущимися дислокациями. Однако диффундирующие вдоль дислокаций компоненты электролиза должны тормозить движение дислокаций и повышать не скорость деформационного упрочнения, а уровень кривых деформаций, т. е. механизм влияния электролиза водяной пленкой остается непонятным, как и причина снижения ЭМЭ под влиянием легирования никелем. Не исключено сильное влияние никеля на состояние приповерхностного двойного электрического слоя. Это, однако, требует дополнительных исследований. Итак:

1. Подтверждено существование еще одного эффекта в кристаллах NaCl, возникающего при воздействии электрического поля на деформируемый кристалл и заключающегося в увеличении скорости деформационного упрочнения при деформации кристаллов в электрическом поле. Авторы предлагают назвать его электромеханическим эффектом (ЭМЭ) в отличие от электропластического (ЭПЭ), проявляемого в спадах напряжений течения.

2. Показано, что этот эффект не связан с электрострикцией, движением заряженных дислокаций и перестройкой имеющих до деформации локальных препятствий для дислокаций.

3. Выдвинуто предположение, что ЭМЭ в какой-то мере связан с электролизом молекул воды на поверхности NaCl. Однако конкретный механизм ЭМЭ пока не установлен.

Авторы выражают глубокую признательность В. И. Альшицу и Б. И. Смирнову за обсуждение работы и ценные замечания.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Загоруйко Н. В. // Кристаллография. 1965. Т. 10. № 1. С. 81—86.
- [2] Блистанов А. А., Сойфер Я. М., Шаскольская М. П. // Кристаллография. 1966. Т. 11. № 5. С. 827—830.
- [3] Зуев Л. Б., Сергеев В. П., Рибченко Н. Н. // Изв. вузов, физика. 1979. № 3. С. 71—74.
- [4] Dalman M. R., Pass A., Gorri J. B. // Phys. Stat. Sol. (a). 1986. V. 86. N 2. P. 533—540.
- [5] Загоруйко Н. В., Савенко В. И., Беккауер Н. Н. // ФТТ. 1972. Т. 14. № 8. С. 2450—2452.
- [6] Machlin E. S. // J. Appl. Phys. 1959. V. 3. N 7. P. 1109—1110.
- [7] Kataoka T., Sakamoto M., Yamada T. // J. Appl. Phys. 1975. V. 14. N 10. P. 1609—1611.
- [8] Whitworth R. W. // Semiconductors and Insulators. 1978. V. 3. N 1. P. 403—421.
- [9] Brissenden S., Gardner J. W., Illingworth J., Kovčević I., Whitworth R. W. // Phys. Stat. Sol. (a). 1979. V. 51. N 2. P. 521—526.
- [10] Куличенко А. Н., Смирнов Б. И. // ФТТ. 1981. Т. 23. № 4. С. 1029—1033.
- [11] Куличенко А. Н., Смирнов Б. И. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 5. С. 1523—1525.
- [12] Зуев Д. Б., Токмашев М. Г. // Изв. вузов, физика. 1984. № 4. С. 133—134.
- [13] Воробьев А. А. Центры окраски в щелочно-галлоидных кристаллах. Томск, 1968.
- [14] Орлова Т. С., Смирнов Б. И. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 5. С. 1533—1534.
- [15] Полинг Л. Общая химия: Пер. с англ. М.: Мир, 1974.
- [16] Клявин О. В. Физика пластичности кристаллов при гелиевых температурах. М.: Наука, 1987. 252 с.