

## Магнитоэластический эффект при релаксации напряжения в кристаллах NaCl

М. В. Галусташвили, Д. Г. Дриаев<sup>1)</sup>, В. Г. Квачадзе

Тбилисский государственный университет им. И. Джавахишвили, 0179 Тбилиси, Грузия

Институт физики им. Э. Андриашвили, 0186 Тбилиси, Грузия

Поступила в редакцию 21 октября 2019 г.

После переработки 25 октября 2019 г.

Принята к публикации 8 ноября 2019 г.

Впервые экспериментально исследовано влияние слабого магнитного поля на релаксацию напряжения в кристаллах NaCl после прекращения активной деформации. Полученные результаты свидетельствуют, что при релаксации напряжения магнитоэластический эффект проявляется в увеличении глубины релаксации и существенном разупрочнении, чувствительном к скорости активной деформации; при сопряжении магнитного поля со слабым электрическим эти эффекты значительно усиливаются.

DOI: 10.1134/S0370274X19240044

Влияние слабого магнитного поля (МП) ( $B \sim 1$  Тл) на пластические свойства немагнитных кристаллов на сегодняшний день довольно хорошо изучено (см. обзоры [1–6]). Это явление, называемое магнитоэластическим эффектом (МПЭ), обусловлено спин-зависимой трансформацией в магнитном поле структуры парамагнитных примесных центров в кристаллах, что уменьшает пиннинг дислокаций и облегчает их движение [7]. МПЭ изучался как на уровне индивидуальных дислокаций, так и в макропластичности материалов: при их активном нагружении [8], активной деформации [9, 10], ползучести [11] и внутреннем трении [12, 13]. В частности, в МП существенно изменяется предел текучести и структура диаграмм деформирования щелочногалогидных кристаллов. Причем, при добавлении к магнитному полю слабого электрического поля (ЭП), эти изменения значительно возрастают [14, 15], что связывается с термоактивационным ростом плотности магнитоактивных центров на дислокациях [16, 17].

Вместе с тем, воздействие МП на такую информативную характеристику макропластичности, как релаксация напряжений, также связанную с движением и блокировкой дислокаций, до сих пор не изучалось. Цель настоящей работы – исследовать влияние магнитного и электрического полей на этот релаксационный процесс в кристаллах NaCl.

В экспериментах использовались кристаллы NaCl, содержащие в основном двухвалентную примесь  $\text{Ca}^{++}$ . Блок NaCl отжигался в течение шести

часов при  $700^\circ\text{C}$ , охлаждался до комнатной температуры, а затем по плоскостям спайности  $\{100\}$  выкалывались образцы с примерным размером  $2.5 \times 4 \times 8$  мм.

Испытания проводились одноосным сжатием вдоль направления  $[001]$  в интервале скоростей деформации  $\dot{\epsilon} = 10^{-5} - 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  в “жесткой” деформационной машине DY-22, все детали которой в области действия МП были изготовлены из немагнитных материалов. Диаграммы напряжение–деформация  $\sigma(\epsilon)$  записывались на двухкоординатном самописце. О работе той или иной пары систем скольжения можно было судить по картинкам травления на любой стадии деформации и по появлению на противоположных гранях кристалла ступенек скольжения, обусловленных выходом краевых дислокаций. Измерения кривых деформации  $\sigma(\epsilon)$  и релаксационных кривых дублировались не менее, чем на 3 образцах.

Постоянное МП с индукцией  $B = 0.9$  Тл создавалось набором пластин из  $\text{SmCo}_5$ . В зазор между полюсами магнита помещалась керамическая подставка, на которую ставился образец так, чтобы вектор  $\mathbf{B}$  был ортогонален оси сжатия и двум противоположным широким боковым граням кристалла. ЭП создавалось путем подключения напряжения к пластинам  $\text{SmCo}_5$ , которые одновременно играли роль электродов; поэтому вектор напряженности  $\mathbf{E}$  ( $E = 20$  кВ/м) был параллелен  $\mathbf{B}$ .

Исходная диаграмма  $\sigma(\epsilon)$  кристалла NaCl при  $B = 0$  представлена на рис. 1 (кривая 1). На кривой четко прослеживаются все три стадии деформацион-

<sup>1)</sup>e-mail: dria.dm@mail.ru

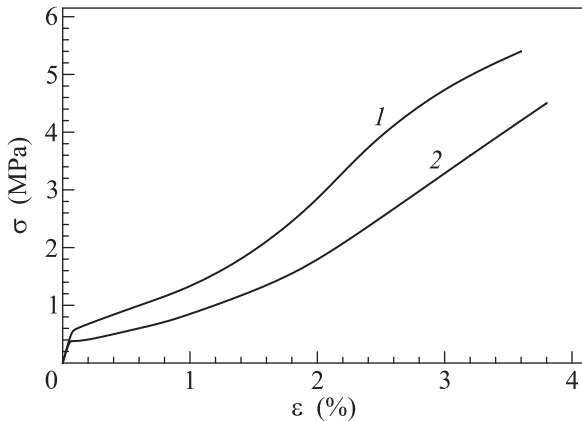


Рис. 1. Диаграммы  $\sigma(\varepsilon)$  кристаллов NaCl: 1 –  $B = 0$ ; 2 –  $B = 0.9$  Тл,  $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$

ного упрочнения. Первоначально действует одна пара ортогональных систем скольжения из двух равноправных  $(110)\{1\bar{1}0\}$ , причем, с равной вероятностью активируется любая из двух пар.

Иная картина возникает при деформировании образца в МП (рис. 1, кривая 2). Как правило, начинает “работать” та пара плоскостей скольжения, в которой краевая компонента дислокационных петель ортогональна вектору магнитной индукции  $\mathbf{B}$ . При этом воздействие МП значительно понижает предел текучести (в случае, приведенном на рис. 1, примерно с 6 до 4 МПа) и на начальной стадии деформирования уменьшает коэффициент деформационного упрочнения.

Для получения релаксационных кривых активная деформация образца прекращалась на разных стадиях на время  $t_r$ , за которое релаксация в основном заканчивается, а затем повторно включалась при той же скорости перемещения пуансона. Вид кривых, глубина релаксации и время  $t_r$  зависят от скорости  $\dot{\varepsilon}$  и степени предварительной деформации  $\varepsilon$ . Большая часть релаксационных кривых получена при  $\varepsilon < 2\%$ , когда пиннинг-центрами, в основном, являются точечные дефекты, определяющие МПЭ. При более высоких степенях деформации преобладающую роль в торможении дислокаций начинает играть лес дислокаций, малочувствительный к действию МП [8].

На рисунке 2 показана временная зависимость спада напряжения  $\Delta\sigma_t = \sigma_0 - \sigma_t$  при релаксации, где  $\sigma_0$  – напряжение, соответствующее началу релаксации,  $\sigma_t$  – напряжение спустя время  $t$ . На этом же рисунке приведены фрагменты диаграммы  $\sigma(\varepsilon)$  с записью кривых релаксации напряжения, по которым вычислялись значения  $\sigma_t$ . Видно, что глубина релаксации при понижении  $\dot{\varepsilon}$  уменьшается. Это

представляется естественным, поскольку по мере замедления деформации дислокационная структура во все большей мере успевает перестраиваться, приближаясь к равновесной конфигурации, при которой уровень внутренних напряжений оказывается минимальным [16].

Из кривых релаксации на рис. 2 видно, что при повторном нагружении кристалл упрочняется на

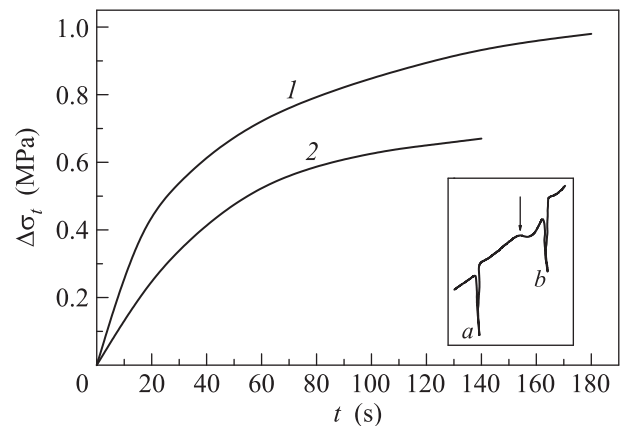


Рис. 2. Зависимость спада напряжения от времени релаксации (при  $B = 0$ ) для кристалла NaCl при скоростях  $2 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$  (кривая 1) и  $2 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  (кривая 2). На вставке – фрагменты диаграммы  $\sigma(\varepsilon)$  с записью кривых релаксации напряжения для скоростей  $2 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$  (a) и  $2 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  (b); стрелка указывает момент переключения скоростей

некоторую величину относительно начального уровня релаксации  $\sigma_0$ . Это указывает на быстрое старение дислокаций в процессе релаксации, благодаря диффузии точечных дефектов [17] с образованием облака Коттрелла. Для исключения влияния степени предварительной деформации на релаксационный процесс релаксационные кривые сняты в узком интервале деформаций ( $\Delta\varepsilon \approx 0.3\%$ ).

Зависимости  $\Delta\sigma_t(t)$  в присутствии МП представлены на рис. 3, на этом же рисунке – типичные релаксационные кривые на диаграммах  $\sigma(\varepsilon)$ . Анализ и сравнение зависимостей  $\Delta\sigma_t(t)$  и фрагментов диаграмм  $\sigma(\varepsilon)$  на рис. 2 и 3 позволяет заключить, что в МП растет глубина релаксации и время выхода на прежний режим деформации, а также повышается чувствительность процесса релаксации к скорости деформации. Особо следует отметить существенное разупрочнение кристалла (в отличие от упрочнения при  $B = 0$ ): при повторном нагружении выход на режим пластического течения начинается при напряжениях гораздо ниже уровня начала релаксации  $\sigma_0$ .

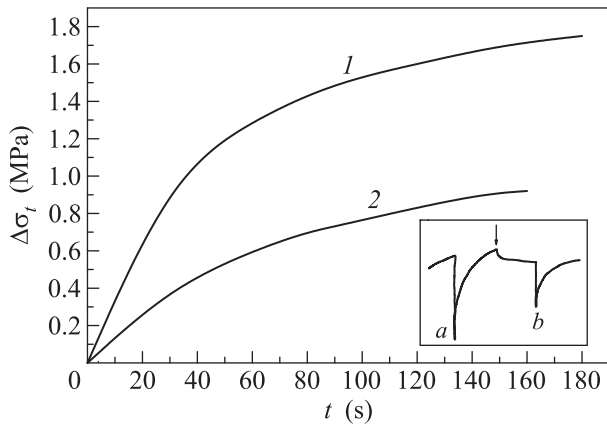


Рис. 3. Зависимость спада напряжения от времени релаксации для кристалла NaCl при  $B = 0.9$  Тл и скоростях  $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  (кривая 1) и  $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  (кривая 2). На вставке – фрагменты диаграммы  $\sigma(\varepsilon)$  с записью соответствующих кривых релаксации напряжения при скорости  $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  (a) и  $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  (b); стрелка указывает момент переключения скоростей

По-видимому, дислокации, движущиеся при пластической деформации, предваряющей релаксацию, преобразуют исходную примесную структуру, оставляя за собой магниточувствительные локальные стопоры. Представленные результаты свидетельствуют, что количество магнитоактивных примесных центров и время их жизни достаточно, чтобы в процессе релаксации в МП замедлить истощение (дефицит) подвижных дислокаций, что должно способствовать увеличению глубины релаксации и уменьшению напряжения старта при повторном нагружении кристалла.

В связи с явлением электростимуляции МПЭ [14, 15, 18, 19], были выполнены эксперименты при одновременном действии на образец магнитного и электрического полей; на рис. 4 представлена соответствующая диаграмма  $\sigma(\varepsilon)$ . Видно, что помимо дополнительного снижения предела текучести, значительно удлиняется стадия легкого скольжения с низким значением коэффициента деформационного упрочнения – кристалл “течет” почти до 2.5 % деформации.

На вставке рис. 4 представлены релаксационные кривые, полученные при деформировании в МП с подключением ЭП во время снятия кривой b. Сопоставление кривых релаксации a и b на рис. 4 иллюстрирует электростимуляцию процесса релаксации: наряду с двукратным увеличением глубины релаксации, имеет место еще большее разупрочнение и возрастание времени выхода на прежний режим пластического течения при повторном нагружении. Однако следует отметить, что при совместном действии маг-

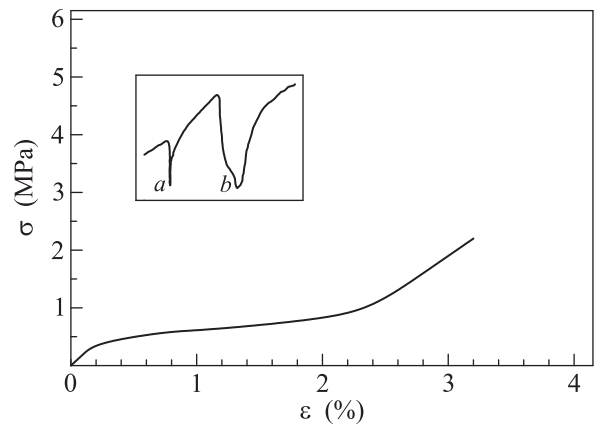


Рис. 4. Диаграмма напряжение – деформация кристалла NaCl при  $B(0.9 \text{ Тл}) + E(20 \text{ кВ/м})$ . На вставке – участки диаграммы  $\sigma(\varepsilon)$  с записью кривых релаксации напряжения: a – МП, b – МП + ЭП,  $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$

нитного и электрического полей воспроизводимость результатов носит нерегулярный характер.

Таким образом, полученные в работе экспериментальные результаты показывают, что МП повышает эффективность релаксации внутренних механических напряжений, возникающих в кристалле при его активной деформации, что проявляется в увеличении глубины релаксации и существенном разупрочнении, чувствительном к скорости активной деформации. Несомненно, это отражает магнитоиндуцированную пластификацию кристалла, благодаря повышению подвижности дислокаций.

Наблюдается существенная электростимуляция МПЭ при совокупном воздействии магнитного и довольно слабого ЭП. Это видно как из диаграмм  $\sigma(\varepsilon)$ , так и из кривых релаксации. По-видимому, столь яркое электрическое влияние на МПЭ действительно связано с термоактивационным (экспоненциальным) увеличением количества на дислокациях магнитоактивных примесных центров  $\text{Ca}^+$  в присутствии ЭП [18, 19].

Авторы выражают глубокую благодарность А. Иашвили и В. Тавхелидзе за техническую помощь.

1. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, М. В. Колдаева, Е. А. Петржик, Кристаллография **48**, 826 (2003).
2. А. А. Урусовская, В. И. Альшиц, А. Е. Смирнов, Н. Н. Беккауэр, Кристаллография **48**, 855 (2003).
3. Ю. И. Головин, ФТТ **46**, 769 (2004).
4. Р. Б. Моргунов, УФН **174**, 131 (2004).
5. V. I. Alshits, E. V. Darinskaya, M. V. Koldaeva, and E. A. Petrzhik, in *Dislocations in Solids*, ed. by J. P. Hirth, Elsevier, Amsterdam (2008), v. 14, p. 333.
6. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, М. В. Колдаева, Е. А. Петржик, Письма в ЖЭТФ **104**, 362 (2016).

7. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, М. В. Колдаева, Р. К. Котовский, Е. А. Петржик, П. Трончик, УФН **187**, 327 (2017).
8. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, Письма в ЖЭТФ **61**, 583 (1995).
9. А. А. Урусовская, В. И. Альшиц, А. Е. Смирнов, Н. Н. Беккауэр, Письма в ЖЭТФ **65**(6), 470 (1997).
10. М. В. Галусташвили, Ф. Х. Акопов, Д. Г. Дриаев, В. Г. Квачадзе, С. Д. Цакадзе, ФТТ **58**, 543 (2016).
11. Б. И. Смирнов, Н. Н. Песчанская, В. И. Николаева, ФТТ **43**, 2154 (2001).
12. Н. А. Тяпунина, В. Л. Красников, Э. П. Белозерова, ФТТ **41**, 1035 (1999).
13. D. Driaev, A. Iashvili, L. Kankadze, and S. Tsakadze, Rev. Sci. Instruments **88**, 054904 (2017).
14. А. А. Урусовская, В. И. Альшиц, Н. Н. Беккауэр, А. Е. Смирнов, ФТТ **42**, 267 (2000).
15. М. В. Галусташвили, Д. Г. Дриаев, Ф. Х. Акопов, С. Д. Цакадзе, ФТТ **55**, 1565 (2013).
16. А. А. Урусовская, А. М. Петченко, В. И. Мозговой, ФТТ **31**, 195 (1989).
17. С. В. Лубенец, ФТТ **44**, 72 (2002).
18. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, М. В. Колдаева, Е. А. Петржик, Письма в ЖЭТФ **88**, 500 (2008).
19. V. I. Alshits, E. V. Darinskaya, M. V. Koldaeva, and E. A. Petrzhik, J. Appl. Phys. **105**, 063520 (2009).