

Термодинамические и кинетические аспекты разупрочнения ионных кристаллов импульсным магнитным полем

© Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, В.Е. Иванов

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, 392622 Тамбов, Россия

(Поступила в Редакцию 12 мая 1997 г.)

Исследовано влияние короткого (10^{-2} s) импульса магнитного поля ($B = 7$ Т) на пластическое течение ионных кристаллов. Выделены стадии переходного процесса, стимулированного полем в системе структурных дефектов решетки. Полученные результаты обсуждаются с позиций термодинамики и кинетики процессов в неравновесных системах.

В [1] было обнаружено увеличение скорости макропластического течения ионных кристаллов в постоянном магнитном поле (МП) с индукцией $B < 1$ Т. Установлено, что в постоянном МП коэффициент упрочнения кристаллов оставался уменьшенным по сравнению с его значением до включения поля в течение всего времени экспозиции кристалла в поле. Можно предполагать, что такой отклик кристалла на внешнее воздействие является индикатором нового, установившегося после включения поля, динамического равновесия в системе дилокаций и стопоров. Низкая индукция МП в [1] могла вызывать заметные изменения пластического течения только при включении поля на длительный (в масштабе продолжительности деформирования кристаллов) промежуток времени. Это не позволило исследовать кинетику стимулированного полем перехода от одного режима квазистационарного пластического течения к другому.

Цель настоящей работы заключалась в создании экспериментальной ситуации, позволяющей выделить фазы магнитостимулированного разупрочнения кристалла и исследовать их по отдельности в зависимости от достигнутой пластической деформации и ее скорости, а также в обсуждении взаимосвязи термодинамических и кинетических аспектов пластического течения в условиях действия МП.

В работе исследовались монокристаллы KCl и NaCl, содержавшие иновалентные примеси в суммарном количестве около 10^{-4} ат.%. Образцы размером $3 \times 3 \times 10$ мм помещались в соленоид и подвергались одноосному сжатию вдоль [100] в нагружающем устройстве с кварцевыми штоками, позволяющими исключить возможность их втягивания в МП. Оно имело абсолютно мягкую силовую характеристику и задавало в образце механическое напряжение σ , линейно зависящее от времени ($\sigma = kt$). Величина k варьировалась в таких пределах, что относительная деформация ϵ достигала 1% за время от 5 до 25 мин. Разрешение по смещению в канале регистрации деформации образца составляло $0.25 \mu\text{m}$. Импульсы МП, направленного вдоль оси сжатия, создавались тиристорным генератором импульсов тока на разных участках кривой деформирования $\epsilon(\sigma)$. Они имели форму полупериода синусоиды длительностью 10 ms и амплитудой 7 Т.

Типичная диаграмма $\epsilon(\sigma)$ приведена на рис. 1. Включения МП вызвали изменения кривой деформирования в кристаллах NaCl и KCl только после достижения предела текучести $\sigma_y \cong 0.5 \cdot 10^5$ Па. Импульс вызывал сначала скачкообразный прирост деформации $\Delta\epsilon$, затем наблюдался участок заторможенного течения, на котором в течение времени τ скорость изменения размеров образца была в 2–3 раза меньше, чем до включения поля (см. врезку на рис. 1). В дальнейшем скорость пластического течения $d\epsilon/dt$ восстанавливалась до значения, наблюдавшегося до включения МП. Таким образом, изменения пластического течения кристаллов, вызванные МП, могли быть охарактеризованы глубиной скачка деформации $\Delta\epsilon$ и продолжительностью стадии заторможенного пластического течения τ .

Величины скачков $\Delta\epsilon$, вызываемых импульсами МП, следовавшими через каждые 15–30 s, зависели от достигнутого уровня внешних напряжений (и, таким образом, от деформации кристаллов) (рис. 1). Сразу после предела текучести наблюдался резкий рост $\Delta\epsilon$, а после достижения деформации $\epsilon \cong 1.5\%$ величина $\Delta\epsilon$ слабо уменьшалась. Такой же характер зависимости эффекта

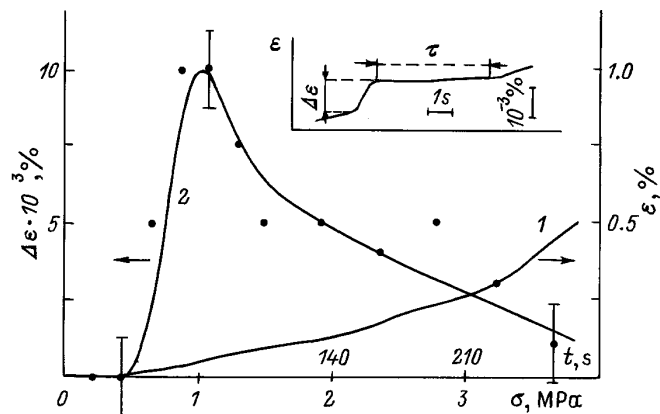


Рис. 1. Зависимости относительной деформации ϵ (1) и величины ее скачка $\Delta\epsilon$ (2), вызванного импульсом магнитного поля, от линейно нарастающей со временем механической нагрузки σ и времени нагружения t для кристаллов KCl. На врезке — фрагмент зависимости ϵ от t после включения импульса магнитного поля при $\epsilon \sim 0.1\%$.

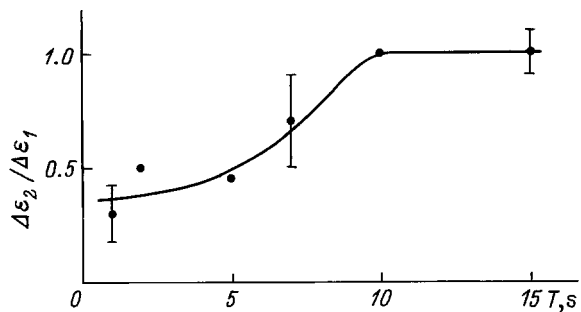


Рис. 2. Зависимость величины скачка относительной деформации кристаллов KCl при втором импульсе магнитного поля $\Delta\varepsilon_2$, нормированного на величину скачка, вызванного первым импульсом магнитного поля $\Delta\varepsilon_1$, от времени T между импульсами.

разупрочнения кристаллов от ε наблюдался и в [1] при включениях постоянного МП длительностью более 20 с.

Варьирование паузы между двумя последующими импульсами поля T позволило установить, что величина скачка во втором импульсе (скорректированная на величину изменения эффекта разупрочнения с деформацией) $\Delta\varepsilon_2$ зависит от t (рис. 2). Величина $\Delta\varepsilon_2$ была равна $\Delta\varepsilon_1$ — скачку, вызываемому первым импульсом поля, если $T > \tau$. При $T < \tau$ выполнялось неравенство $\Delta\varepsilon_2 < \Delta\varepsilon_1$, т.е. чувствительность пластического течения кристалла к МП на стадии заторможенного течения, возникающей после скачка деформации $\Delta\varepsilon$, была пониженной. С уменьшением средней скорости деформирования $\langle d\varepsilon/dt \rangle$ продолжительность перехода между этими двумя режимами деформирования увеличивалась. Таким образом, кристалл “запоминал” факт воздействия импульса МП, а по мере его дальнейшего деформирования эта “память” стиралась в течение времени T , зависевшего от скорости деформирования.

Обсудим сначала полученные результаты с общих термодинамических позиций, без детализации механизма действия МП. Эффективное влияние МП с $B = 1-10$ Т на физические процессы в кристаллах в условиях, когда энергия, сообщаемая полем кристаллу в расчете на одну частицу, обладающую магнитным моментом порядка магнетона Бора, на 2–3 порядка ниже средней тепловой энергии, может быть реализовано только в термодинамически неравновесных системах. В процессе макропластического деформирования в отсутствие поля протекают два конкурирующих процесса. С одной стороны, зарождение новых дислокаций вызывает рост степени неравновесности, а с другой — их перемещение в процессе релаксации внутренних напряжений понижает ее. В образце, деформируемом с постоянной скоростью, поддерживается динамическое равновесие между этими процессами, и, таким образом, система пребывает в квазистационарном состоянии. Поскольку слабое МП практически не изменяет энергию кристалла, оно может способствовать только понижению степени

неравновесности за счет увеличения скорости релаксации. При длительностях импульса МП τ^* , превышающих постоянную времени τ релаксации системы при данной скорости деформирования, имеются условия для создания нового стационарного состояния в течение всего периода пребывания кристалла в МП. Такой чисто термодинамический подход помогает понять, почему в постоянном МП скорость деформирования кристалла могла остаться увеличенной и одинаковой при $\tau^* > 20$ с в [1].

Уменьшение τ^* до 10^{-2} с в настоящей работе приводит к выполнению условия $\tau^* < \tau$. Об этом свидетельствует зависимость отношения величин двух последовательных скачков деформации, вызванных одинаковыми импульсами МП, от паузы T между ними (рис. 2). При $T > \tau = 5$ с кристалла “забывал” о том, что он был подвергнут действию МП, т.е. за это время неравновесное состояние дефектов восстанавливалось под действием механических напряжений. Таким образом, МП понижало термодинамический потенциал системы, стимулируя ее выход из более высокого локального минимума в более низкий. Для эффективного действия последующих импульсов МП необходимо возвращение системы в возбужденное состояние, которое происходит за время τ . Увеличение скорости нагружения кристалла в рамках этой общей схемы должно приводить к ускоренному восстановлению стационарного состояния кристалла, что согласуется с полученными в работе результатами.

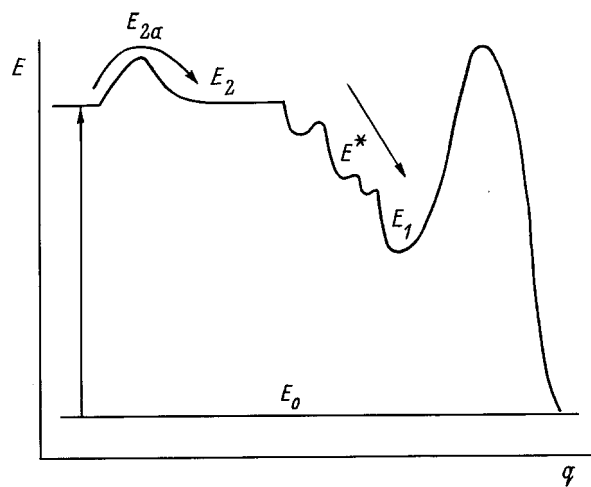


Рис. 3. Схема энергетических уровней кристалла с дислокациями. E_0 — энергия бездефектного кристалла, E_1 — энергия кристалла с дислокациями, закрепленными на труднопреодолимых препятствиях, E_2 — энергия кристалла со свежезарожденными дислокациями, $E_{2\alpha}$ — энергия образования новой дислокации при смещении свежевведенных, E^* — локальные минимумы энергии, возникающие при упругом и обменном взаимодействии дислокаций с точечными дефектами, q — конфигурационная координата. Стрелками показано направление, в котором дислокации проходят через ряд состояний в нагружаемом кристалле.

Обсуждаемая экспериментальная ситуация подобна той, которая возникает в процессе работы лазера (рис. 3). В наших условиях основным может считаться состояние с энергией кристалла E_1 , в котором все дислокации закреплены на труднопреодолимых препятствиях и нечувствительны к МП. Ниже его располагается только состояние бездефектного кристалла с энергией E_0 . Самый высокий уровень, на который происходит "механическая накачка", характеризуется энергией E_2 . Он соответствует состоянию кристалла со свежезарожденными дислокациями, не начавшими еще своего движения. В процессе их движения по профилю, создаваемому локальными стопорами, которые еще могут преодолеваться за время нагружения, энергия системы проходит через ряд локальных минимумов E^* . Очевидно, влияние МП на скорость пластического течения на этой стадии возможно как за счет облегченного зарождения дислокаций (понижения активационного барьера E_{2a}), так и за счет выхода из локальных минимумов E^* .

В этой схеме МП играет роль фотона, вызывающего более или менее скоррелированный переход системы в состояние с наименьшей энергией E_1 . Мощность "излучаемого импульса" может быть охарактеризована дополнительным числом подвижных дислокаций, движущихся в данный промежуток времени.

В настоящее время вопрос о микромеханизмах влияния поля не решен окончательно, однако установлено, что магнитоэластический эффект чувствителен к свету оптического диапазона [2,3] и наличию в кристалле парамагнитных дефектов [4]. Это свидетельствует о необходимости электронного, а не атомного уровня его рассмотрения. Как было впервые отмечено в [5,6], механизм влияния МП на состояние электронной подсистемы может быть аналогичным разработанному в теории магниточувствительных химических реакций [7]. В [7] показано, что в системах с неравновесной заселенностью частиц по спиновым состояниям возможно изменение скорости образования и конечного количества устойчивых молекул, связанных силами обменного взаимодействия. Это изменение возникает в связи со снятием в МП спиновых запретов на переходы между синглетным и триплетным состояниями в парах частиц. Такие пары в процессе пластической деформации ионных кристаллов могут образовываться при установлении ковалентных связей между парамагнитными центрами на дислокации, между дислокацией и точечными дефектами, а также между двумя одинаковыми или различными точечными дефектами. В равновесном состоянии в подсистеме дефектов существует определенное соотношение между неспаренными и связанными дефектами. Деформирование кристалла способствует смещению этого равновесия, отклоняя статистику заселения энергетических состояний от бальцовановской. Глубокие локальные уровни E_i сдерживают релаксацию возбужденной таким образом системы парамагнитных дефектов. Отметим, что слабое в энергетическом масштабе МП не влияет на активационные энергии барьеров E_i , а изменяет лишь

статистические веса реакций их преодоления g_i , что и приводит к изменению скорости релаксации системы $d\varepsilon/dt = (d\varepsilon/dt)_0 \sum g_i \exp(-E_i/kT)$ (где i — нумерует разные типы каналов релаксации).

Таким образом, созданные экспериментальные условия позволяют исследовать временные характеристики магнитоэластических процессов, протекающих в системе парамагнитных структурных дефектов при пластическом деформировании. Показано, что деформирование кристаллов способствует восстановлению их чувствительности к МП. Это происходит путем создания неравновесной заселенности электронных состояний в подсистеме структурных дефектов кристалла. Неравновесность такого типа является необходимым фактором для проявления магнитоэластического эффекта.

Отметим, что и в не нагружаемых внешними силами кристаллах в течение длительного времени может сохраняться неравновесная заселенность дефектов по энергиям, так как практически всегда в них имеются внутренние механические напряжения. Об этом свидетельствует возможность влияния поля на состояние дефектов в таких кристаллах, обнаруженная в [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Госкомитета РФ по высшему образованию (проект № 95-0-7.1-58), а также Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 97-02-16074).

Список литературы

- [1] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. Письма в ЖЭТФ **61**, 7, 583 (1995).
- [2] В.И. Доценко, А.И. Ландау, В.В. Пустовалов. Современные проблемы низкотемпературной пластичности материалов. Наук. думка. Киев (1987). 162 с.
- [3] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, С.Е. Жуликов, А.А. Дмитриевский. Вестн. ТГУ **1**, 1, 324 (1997).
- [4] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, О.Л. Казакова. Письма в ЖЭТФ **62**, 4, 352 (1995).
- [5] М.И. Молоцкий. ФТТ **33**, 10, 3112 (1991).
- [6] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петрижик. ФТТ **33**, 10, 3001 (1991).
- [7] А.Л. Бучаченко, Р.З. Сагдеев, К.З. Салихов. Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях. Наука, Новосибирск (1978). 350 с.
- [8] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. Письма в ЖЭТФ **58**, 3, 189 (1993).