

## Обратимые и необратимые изменения пластических свойств кристаллов NaCl, вызванные действием магнитного поля

© Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, Д.В. Лопатин, А.А. Баскаков, Я.Е. Евгеньев

Тамбовский государственный университет,  
392622 Тамбов, Россия

(Поступила в Редакцию 27 января 1998 г.  
В окончательной редакции 27 апреля 1998 г.)

Установлено, что слабое магнитное поле с индукцией  $B \sim 1$  Т вызывает в кристаллах NaCl, не содержащих свежевведенных дислокаций, необратимые изменения, в то время как сильное магнитное поле с индукцией  $16 < B < 35$  Т вызывает преимущественно обратимые изменения. Предполагается существование двух различных каналов влияния магнитного поля на состояние точечных дефектов.

В [1] впервые сообщалось о движении дислокаций, стимулированном слабым постоянным магнитным полем (МП) с индукцией  $B \leq 1$  Т, в ненагруженных кристаллах с парамагнитными примесями. В таком поле энергия  $E$ , сообщаемая парамагнитному центру с магнитным моментом, равным магнетону Бора  $\mu$ , составляет  $E \approx \mu g B \ll kT$ , где  $T \sim 300$  К — температура, при которой производились опыты,  $g \approx 2$  — фактор Ланде,  $k$  — постоянная Больцмана. В дальнейшем было установлено, что одной из причин движения дислокаций в МП является влияние поля на электронные процессы в подсистеме структурных дефектов [2–4]. В настоящее время природа этого “слабополевого” эффекта в деталях неясна, однако имеются веские основания полагать, что МП стимулирует спин-зависимые интеркомбинационные переходы в комплексах парамагнитных дефектов [2–5]. Это способствует ускоренной релаксации комплексов из метастабильного состояния [6], откреплению дислокаций от стопоров и их последующему движению в дальнедействующем поле внутренних механических напряжений кристалла [3,7].

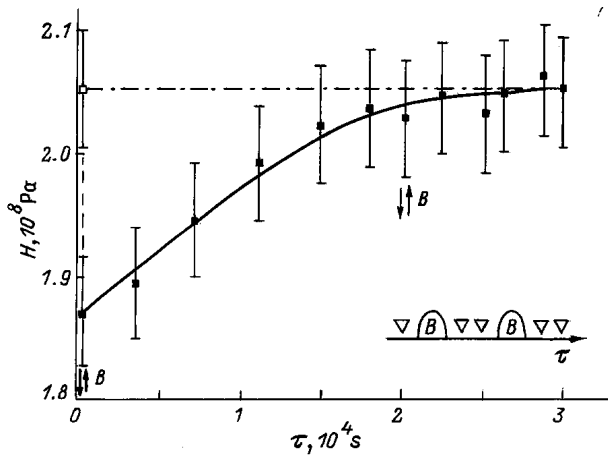
В МП, условно называемых в дальнейшем сильными, в которых  $E \approx \mu g B \sim kT$ , могут возникать дополнительные каналы влияния поля на состояние структурных дефектов и как следствие пластические свойства материалов. Цель настоящей работы заключалась в создании экспериментальных условий для обнаружения и исследования различий в воздействии слабых и сильных МП на пластичность кристаллов NaCl.

В качестве отклика на воздействие МП были выбраны две характеристики пластических свойств: микротвердость и пробеги индивидуальных дислокаций, вызванные МП. В опытах использовались закаленные на воздухе от 700 К монокристаллы NaCl размером  $3 \times 3 \times 5$  мм с концентрацией примесных ионов Са на уровне 0.01 at.%. Микротвердость кристаллов измерялась с помощью микротвердомера ПМТ-3. Каждая точка на графиках является результатом усреднения 30–50 отдельных измерений микротвердости, произведенных в одинаковых условиях. В опытах по исследованию подвижности краевых дислокаций, вводимых стандартным методом нанесения царапин на поверхность образца,

измерялось их смещение  $L$ , вызванное действием МП, которое определялось путем усреднения 100–150 значений пробегов индивидуальных дислокаций, измеренных методом двойного химического травления. Процедура двойного травления в отсутствие внешних воздействий вызывала одинаковый во всех опытах фоновый пробег свежевведенных дислокаций  $L_0 = 10 \pm 1 \mu\text{m}$ , возникающий в результате вытравливания приповерхностных стопоров.

Прямоугольные импульсы слабого поля продолжительностью 20 с, имевшие длительность фронта 3 с и амплитуду  $B = 2$  Т, создавались при помощи электромагнита. Импульсы сильного МП, имевшие форму одного полупериода синусоиды длительностью 140  $\mu\text{s}$  и амплитудой до 35 Т, генерировались в соленоиде путем разряда батареи конденсаторов.

В первой серии экспериментов исследовалось влияние слабого МП на микротвердость кристаллов. Образцы NaCl, не содержавшие свежевведенных дислокаций, подвергались предварительному действию МП, затем, через 1 мин, производилось измерение микротвердости  $H$ . Полученное значение  $H$  было меньше, чем микротвердость кристаллов, не подвергавшихся действию МП,  $H_0$  (рис. 1). Как и в [8], значение  $H$ , уменьшенное в результате предварительной обработки кристаллов в МП, восстанавливалось к значению, близкому к исходному  $H_0$ , по мере увеличения длительности паузы  $\tau$  между импульсом поля и моментом измерения микротвердости (рис. 1). Однако один только этот факт не может быть однозначным свидетельством обратимости изменений, создаваемых полем в подсистеме структурных дефектов. Поэтому образцы NaCl, выдержанные в течение времени  $\tau = 2 \cdot 10^4$  с после первой экспозиции в МП, подвергались действию дополнительного импульса поля (амплитуда  $B = 2$  Т, длительность 20 с), производимого непосредственно перед измерением микротвердости. Установлено, что этот дополнительный импульс в пределах погрешности эксперимента не изменял положения уровня, на который выходила зависимость  $H(\tau)$  при  $\tau > 2 \cdot 10^4$  с (рис. 1), т.е., несмотря на восстановление  $H$ , кристалл уже не обладал чувствительностью к МП. Следовательно, со-



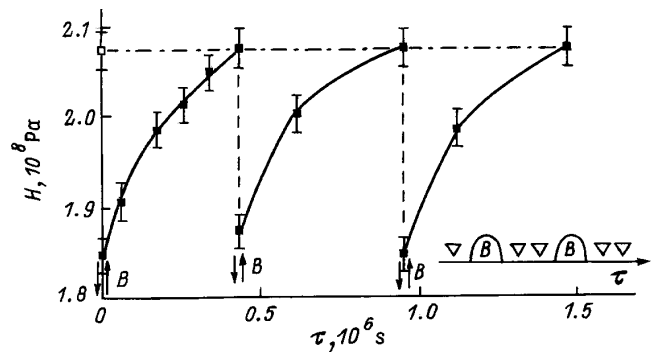
**Рис. 1.** Зависимость микротвердости  $H$  кристаллов от длительности паузы  $\tau$  между первым (произведенным до обработки кристаллов в МП и обозначенным светлым квадратом) и последующими измерениями микротвердости. Включение и выключение импульса МП (длительностью 20 с и амплитудой  $B = 2$  Т), производимое между последовательными измерениями микротвердости, показано стрелками. Штрихпунктирной линией показано значение микротвердости  $H_0$  в кристаллах, не подвергавшихся экспозиции в МП. На врезке изображена последовательность процедур:  $B$  — импульс МП, треугольники — моменты измерения микротвердости.

стояние кристаллов не восстанавливалось к исходному даже спустя длительное время после первого импульса МП, через которое микротвердость становилась близкой к  $H_0$ .

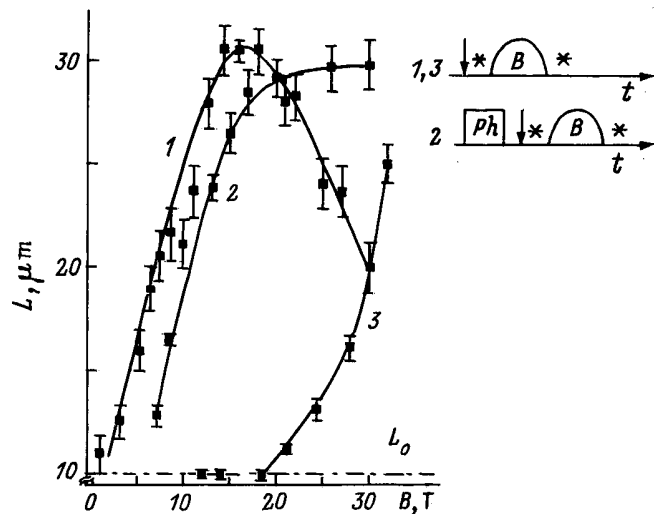
Эксперименты второй серии отличались от опытов первой только тем, что импульсы МП, действию которых подвергался кристалл перед индентированием, имели длительность  $140 \mu\text{m}$  и амплитуду 20 Т. Действие одного такого импульса приводило к такому же по глубине уменьшению микротвердости кристаллов, как и при экспозиции кристаллов в слабом МП (рис. 2). Наблюдалось также и восстановление  $H$  к значению  $H_0$  при увеличении паузы между обработкой в МП и индентированием. Однако это восстановление протекало приблизительно в 20 раз медленнее, чем в первой серии опытов (см. рис. 1 и 2). Кроме того, повторное включение МП снова приводило к уменьшению  $H$  до такого же значения, как и сразу после первого включения поля (рис. 2). Следовательно, сильное МП инициировало в кристаллах обратимые изменения.

Таким образом, в зависимости от режима экспозиции закаленных кристаллов в МП в них возникали качественно различающиеся изменения: в слабом поле — необратимые, а в сильном — обратимые. В дальнейшем будем называть кристаллы, в которых слабое МП влияло на микротвердость, NaCl-I. В кристаллах, выдержанных при 290 К в течение года после закаливания, слабое МП не вызывало изменений микротвердости (кристаллы NaCl-II).

Оба типа кристаллов были использованы в третьей серии экспериментов, в которой исследовалась зависимость пробега дислокаций  $L$  от амплитуды импульса МП длительностью  $140 \mu\text{m}$ . В [7] установлено, что практически весь пробег, инициируемый коротким импульсом МП, происходит после его окончания, а не во время действия поля, так что фактически пробеги дислокаций характеризуют последствие МП, как и при измерении микротвердости. В кристаллах NaCl-I зависимость  $L(B)$  имела немонотонный характер: она была возрастающей только до  $B = 16 \pm 2$  Т, а при  $B > 16$  Т становилась убывающей (рис. 3). В NaCl-II зависимость  $L(B)$  была монотонной, при этом МП вплоть до  $B = 17 \pm 1$  Т не вызывало увеличения смещений дислокаций над фоновым значением  $L_0$  в пределах точности экспериментов



**Рис. 2.** То же, что и на рис. 1, при амплитуде импульса МП  $B = 20$  Т и длительности  $140 \mu\text{m}$ .



**Рис. 3.** Зависимость среднего пробега дислокаций  $L$  от амплитуды  $B$  импульса МП. 1 — в NaCl-I, 2 — в NaCl-II, 3 — в NaCl-I, подвергнутых перед введением дислокаций фотоэкспозиции светом с длиной волны  $350 \text{ nm}$ . Штрихпунктирной линией показано значение пробега  $L_0$ , вызванного в кристаллах процедурой травления в отсутствие МП. На врезке показана последовательность процедур в экспериментах разного типа:  $B$  — импульс МП, стрелка — введение дислокаций, звездочка — травление,  $Ph$  — фотоэкспозиция.

(рис. 3). Поле с  $B > 1$  Т инициировало смещения дислокаций, которые монотонно увеличивались с ростом его индукции. Таким образом, величина  $B$ , при которой наблюдался максимум зависимости  $L(B)$  в NaCl-I, и пороговое значение поля, при котором начиналось ступенирование смещений дислокаций в NaCl-II, совпадают в пределах погрешности измерений.

В кристаллах NaCl-I также можно было наблюдать монотонную зависимость  $L(B)$ , если перед введением дислокаций и помещением образцов в МП подвергнуть их фотоэкспозиции продолжительностью 15 мин в монохроматическом свете с длиной волны 350 nm (рис. 3). В [4] установлено, что такая обработка кристаллов подавляет чувствительность точечных дефектов к слабому МП. Из рис. 3 следует, что подавление "слабополевого" магнитопластического эффекта приводит к тому, что "сильнополевая" часть зависимости  $L(B)$  (при  $B > 16$  Т) становится не убывающей, а возрастающей. Таким образом, фотоэкспозиция NaCl-I делает зависимость  $L(B)$  ближе к той, которая наблюдается в NaCl-II без фотоэкспозиции.

Переходя к обсуждению, отметим, что изменение состояния кристаллов в слабом МП в принципе могло бы объясняться откреплением ростовых дислокаций от стопоров и перераспределением внутренних механических напряжений в кристалле (подобно тому, которое описано в [3]) или влиянием МП на состояние комплексов точечных дефектов (например, на степень их ассоциированности). Очевидно, в первом случае следовало бы ожидать, что микротвердость также будет изменяться необратимо. Однако из рис. 1 следует, что ее значение восстанавливается после прекращения импульса МП. Вряд ли уменьшение  $H$  в МП и увеличение ее после отключения поля могут быть объяснены одной и той же причиной — релаксацией внутренних напряжений. Это позволяет полагать, что причиной изменения микротвердости в МП является его влияние на состояние точечных дефектов.

Состояние точечных дефектов изменяется в слабом МП необратимо, поскольку в противном случае включение дополнительного импульса поля должно было бы приводить точечные дефекты в такое же состояние, как и сразу после первого импульса МП, что в свою очередь снова приводило бы к уменьшению  $H$ . Потеря чувствительности кристалла к повторным импульсам слабого МП (рис. 1) позволяет предполагать, что поле с  $B < 16$  Т инициирует в подсистеме точечных дефектов многостадийный релаксационный процесс, протекание которого приводит к потере чувствительности кристаллов к последующим экспозициям в МП. Таким образом, кажущееся "восстановление" состояния точечных дефектов после отключения МП, по-видимому, является второй стадией релаксационного процесса, инициированного полем, а первая стадия протекает в МП.

Необратимый характер изменений, инициируемых в подсистеме точечных дефектов слабым МП, свидетельствует о метастабильности магниточувствительных со-

стояний точечных дефектов и означает, что роль МП сводится лишь к ускорению релаксационного процесса, медленно протекающего в кристалле и в отсутствие МП.

В сильном МП в кристаллах NaCl-I происходят в основном обратимые изменения состояний точечных дефектов (рис. 2). Это может быть связано с отличием микромеханизмов действия МП на точечные дефекты при  $B = 2$  и при 20 Т. О различии сильно- и слабополевого каналов влияния МП на состояние точечных дефектов свидетельствует также неодинаковость длительности паузы  $\tau$ , необходимой для восстановления  $H$  после воздействия сильного и слабого поля при одинаковом начальном значении  $\Delta H = H - H_0$  (рис. 1, 2). Обратимость изменений микротвердости после воздействия сильного МП свидетельствует о том, что в отличие от действия, производимого слабым полем, в сильном МП точечным дефектам передается энергия, переводящая их в возбужденные состояния. Таким образом, слабо- и сильнополевой магнитопластические эффекты противоположны в термодинамическом отношении.

Немонотонная зависимость пробегов дислокаций от амплитуды импульса МП, варьируемой от 0 до 30 Т, позволяет предполагать, что в кристаллах NaCl-I наблюдается наложение двух существенно различных способов влияния МП на состояние точечных дефектов. Один из них — слабополевой. Он вызывает в кристаллах NaCl-I необратимые изменения точечных дефектов. Другой — сильнополевой. Он становится эффективным при  $B > 16$  Т и характеризуется обратимостью изменений, вносимых полем в подсистему точечных дефектов. В кристаллах NaCl-II, по-видимому, реализуется только сильнополевой канал влияния МП на состояние точечных дефектов, поскольку в них наблюдается монотонная зависимость  $L(B)$ . Эта точка зрения подтверждается также и тем, что "выжигание" светом чувствительных к слабому МП точечных дефектов устраняет немонотонность зависимости  $L(B)$  (рис. 3).

Таким образом, слабое МП с индукцией  $B \sim 1$  Т способствует необратимому изменению метастабильных состояний точечных дефектов, инициируя многостадийный релаксационный процесс, сопровождающийся изменением микротвердости кристалла. Сильное МП с индукцией  $B > 16$  Т обратимо изменяет состояние точечных дефектов. Это свидетельствует о том, что в сильном МП точечным дефектам может передаваться энергия, сравнимая со средней энергией тепловых флуктуаций. Установление механизма перераспределения энергии, сообщаемой точечным дефектам в сильном МП, и типа этих магниточувствительных дефектов требует дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 97-02-16074).

## Список литературы

- [1] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Т.М. Перекалина, А.А. Урусовская. ФТТ **29**, 2, 467 (1987).
- [2] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, О.Л. Казакова. Письма в ЖЭТФ **62**, 4, 352 (1995).
- [3] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, О.Л. Казакова. ЖЭТФ **111**, 2, 615 (1997).
- [4] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, М.В. Бадылевич, С.З. Шмурак. ФТТ **39**, 8, 1389 (1997).
- [5] М.И. Молоцкий. ФТТ **33**, 10, 3111 (1991).
- [6] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, В.Е. Иванов. ФТТ **39**, 11, 2016 (1997).
- [7] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, С.Е. Жуликов. Изв. РАН. Сер. физ. **61**, 5, 965 (1997).
- [8] Yu.I. Golovin, R.B. Morgunov, D.V. Lopatin, A.A. Baskakov. Phys. Stat. Sol. (a) **160**, R3 (1997).