

07,05

Об особенностях магнитного последдействия в высокочистом диамагнитном бериллии

© Е.И. Курек, И.Г. Курек, А.В. Олейнич-Лысюк, Н.Д. Раранский

Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича,
Черновцы, Украина

E-mail: a_oliynich@ukr.net

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 3 марта 2014 г.)

Исследовано поведение эффективного модуля сдвига и низкочастотного внутреннего трения в магний-термическом бериллиевом конденсате до, во время и после обработки образцов в слабом постоянном магнитном поле. На основе полученных данных рассчитаны температурно-временные зависимости отношения скоростей движения дислокаций во время и после магнитного воздействия. Показано, что экспозиция образцов в магнитном поле, а также их старение после магнитного воздействия кардинально изменяет характер температурных зависимостей скоростей движения дислокаций. Получены эмпирические выражения, описывающие эти зависимости, и показано, что магнитное последдействие в диамагнитном бериллии имеет сложный характер, который свидетельствует о наличии нескольких механизмов магнитной памяти.

Работа выполнена при поддержке МОН Украины в рамках проекта № 0113u003250

1. Введение

Исторически сложилось так, что явления магнитного последдействия [1] были обнаружены до открытия профессором Альшицем В.И. магнитоэластического эффекта (МПЭ) в ионных кристаллах [2,3]. В работе [1] было обнаружено изменение декорирования поверхности кристаллов NaCl через 1–2 недели после их выдержки в магнитном поле, отражающее диффузионную перестройку распределения примесных скоплений, вызванную магнитным воздействием. В настоящее время это явление называют магнитной памятью или магнитным последствием (МПД).

Впоследствии эффекты, связанные с магнитным последствием, были обнаружены не только в ионных кристаллах [4,5]. Так, при исследовании полупроводниковых кристаллов, было показано, что МПД проявляется в изменении их физико-химических свойств. После экспозиции в слабом импульсном магнитном поле ($B \leq 1T$ (ИМП)) МПД проявляется в немонотонном изменении химической активности поверхности различных полупроводников [6–8], при этом процесс изменения сорбционных свойств кристаллов продолжался при комнатной температуре сотни часов (в кремнии, германии, арсениде галлия) [6].

Кроме того, было показано, что кратковременное воздействие ИМП инициирует долговременный низкотемпературный распад пересыщенного твердого раствора кислорода в кремнии, выращенного по методу Чохральского (Cz–Si) [9]. Этот процесс завершался образованием пространственно-упорядоченных кислородновакансионных кластеров и/или преципитацией оксидных фаз, в зависимости от исходной дефектности кристалла, а также инициировал кристаллизацию аморфизированного слоя (при его наличии на поверхности кристалла) [9]. Кратковременное воздействие ИМП на сегнетоэлектри-

ческие и диэлектрические характеристики номинально чистых кристаллов триглицинсульфата приводило к долговременному (сотни часов) изменению коэрцитивного поля, температурных зависимостей диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и времени релаксации диэлектрической проницаемости вблизи сегнетоэлектрического фазового перехода [10].

При анализе результатов воздействия постоянного магнитного поля на Cz–Si [11] было отмечено, что магнито-стимулированное изменение микротвердости, модуля Юнга, коэффициента пластичности кристаллов кремния коррелировало с изменением параметра кристаллической решетки и внутренних напряжений. Это объяснялось тем, что МП инициирует образование энергетически выгодных стабильных комплексов из неравновесных [11]. После длительной экспозиции образцов Cz–Si в постоянном МП также было обнаружено увеличение средней скорости движения индивидуальных 60° дислокаций. Предполагалось, что постоянное МП вызывает синглет-триплетные переходы в термически возбужденных состояниях комплексов кремний-кислород в дислокационном ядре, что стимулирует изменение атомной конфигурации кислорода, уже находящегося на дислокациях за счет уменьшения средней энергии связи кислорода с дислокацией [12].

Кроме МПД в постоянном и импульсном МП, магнитная память исследовалась также в процессе электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Обнаружено резонансное влияние постоянного и скрещенного с ним переменного сверхвысокочастотного МП на подвижность дислокаций в кристаллах Cz–Si, сопровождающееся упрочнением образцов [13]. Следует отметить, что МПД наблюдали и после ЭПР на ионных кристаллах, которое сопровождалось изменением скорости микропластической деформации и увеличением пробега краевых дис-

локаций в монокристаллах NaCl [14], в разупрочнении кристаллов NaCl и KCl, легированных Ca или Eu [15].

Зафиксировано изменение микротвердости кристаллов ZnO, триглицинсульфата и гидрофталата калия в условиях ЭПР после их экспозиции в МП Земли и переменном поле накачки [16].

В ряде работ исследовали МПД в металлах. Так, в работах [17–20] показано, что и слабое постоянное, и импульсное МП приводят к снижению величины микротвердости (релаксация к исходным значениям происходит за 30 часов по экспоненциальному закону) и роста скорости ползучести в алюминии. Исследование МПД в монокристаллах Zn [21] после действия слабого постоянного МП позволило зафиксировать увеличение скорости и уменьшение скачков деформации в Zn. Внутреннее трение в стареющих бронзах, а также МПД после их обработки слабыми постоянными и импульсными магнитными полями были изучены в работах [22–24].

Таким образом, эффекты магнитного последствия исследовались в материалах с различным типом химической связи, при этом изучался достаточно широкий круг физико-химических свойств. Практически все авторы склоняются к выводу, что причиной магнитной памяти в исследованных материалах являются спинзависимые реакции, протекающие в дефектных подсистемах после воздействия МП. Однако, могут ли наблюдаемые эффекты МПД быть результатом прямого воздействия спинзависимых реакций на свойства материалов или изменение спиновых состояний дефектов служит своеобразным катализатором для протекания в исследуемых материалах фазовых и/или структурных превращений, результат которых и наблюдают в виде МПД, на сегодняшний день в большинстве случаев неясно, поскольку на уровне микромеханизмов эти явления только начинают обсуждаться [25–27].

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния предварительной обработки бериллиевого конденсата слабым постоянным магнитным полем на кинетику его упругих и неупругих характеристик с целью выяснения природы магнитной памяти в этом диамагнитном металле.

2. Материалы и методика эксперимента

В работе использовались поликристаллы магнийтермического бериллиевого конденсата (МТК Ве) (99.95% Ве). Это материал получают из паровой фазы путем конденсации бериллия, восстановленного магнием, на подкладки с температурой 500–600°C. Для исследований образцы конденсата вырезали из пластин в форме параллелепипедов 1.1 × 1.1 × 100 mm с последующим растворением деформированного слоя. Средний размер зерна, который был определен металлографическим методом, приблизительно равен 50–70 μm. По данным химического анализа состав основных пара- и фер-

ромагнитных примесей составлял (в процентах от массы): O (0.006), C (0.004), Si (0.003), Al (0.003–0.015), Mg (0.003), Fe (0.009), Mn (0.003) и Ni (0.003–0.019). Стоит обратить внимание на то, что суммарная доля ферромагнитных примесей (0.015–0.031) практически совпадает с общим количеством парамагнитных примесей (0.019–0.031) и равна в общей сложности 0.034–0.062.

В данной работе мы анализировали изменение низкочастотного (~ 1 Hz) внутреннего трения (ВТ, Q^{-1}) и модуля сдвига (G_{ef}) МТК Ве во внешнем слабом постоянном магнитном поле (СПМП) с индукцией $B \sim 0.005–0.04$ Т [28,29]. Измерения Q^{-1} и G_{ef} проводили на полуавтоматическом релаксметре в вакууме 10^{-3} Ра в интервале температур 20–300°C и относительных деформаций кручения $\gamma \sim 1–3 \cdot 10^{-4}$. Постоянное МП создавали с помощью соленоида на токах насыщения. Чтобы избежать втягивания держателей-захватов в МП, они были изготовлены из немагнитных сортов стали. Во избежание фиксирования побочных эффектов (вихревых микро- и макротоков, электропластического эффекта и т.п.) в моменты включения и выключения МП исследования не проводились, измерения начинали через определенное время (5–10 min).

Образцы обрабатывались магнитным полем трижды в течение приблизительно одинаковых промежутков времени. Между экспозициями в магнитном поле и после третьей выдержки в СПМП проводились дополнительные исследования температурных зависимостей упругих и неупругих характеристик. Для оценки влияния МП на дефектную структуру Ве по методике, предложенной в [29], рассчитывали отношения скоростей движения дислокаций V_{MF}/V_0 , где V_0 — скорость движения дислокаций до воздействия МП на образец, V_{MF} — скорость движения дислокаций в МП *in situ*. Кроме того, изучали изменение с температурой отношения скоростей движения дислокаций в Ве в процессе старения (V_{afef}/V_0), где V_{afef} — скорость движения дислокаций после третьей магнитной обработки.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1, а представлена температурная зависимость $V(T)/V_0$ до обработки бериллия в СПМП. Следует заметить, что при повышении температуры отношение скоростей растет. Учитывая экспоненциальный характер этой зависимости [30]

$$V(T) = V_0 \exp\left(-\frac{E_D}{kT}\right), \quad (1)$$

где $V(T)$ — скорость движения дислокаций до магнитной обработки при температуре T , E_D — энергия активации движения дислокаций, k — постоянная Больцмана,

авторы оценили изменение энергии активации движения дислокаций при термоциклировании (рис. 1 *b*). Оказалось, что при нагревании и охлаждении вблизи 65°C происходит изменение механизма движения дислокаций в Ве, E_D при этом уменьшается от 0.96 eV до 0.27 eV (рис. 1, *b*, кривая 1) и продолжает уменьшаться при охлаждении (0.01 eV) (рис. 1, *b*, кривая 2). Отметим, что энергия активации движения дислокаций ~ 1 eV характерна для движения дислокаций в гексагональных кристаллах [31]. Однако причина ее уменьшения выше 65°C практически втрое в настоящее время неясна. Можно только предположить, что важную роль в облегчении движения дислокаций в Ве играют термические напряжения, связанные с анизотропией коэффициента термического расширения [32], которые усиливаются в процессе термоциклирования. Действительно, величина $V(T)/V_0$ при охлаждении во всем температурном интервале больше, а энергия активации движения дислокаций при этом меньше значений указанных величин при нагревании.

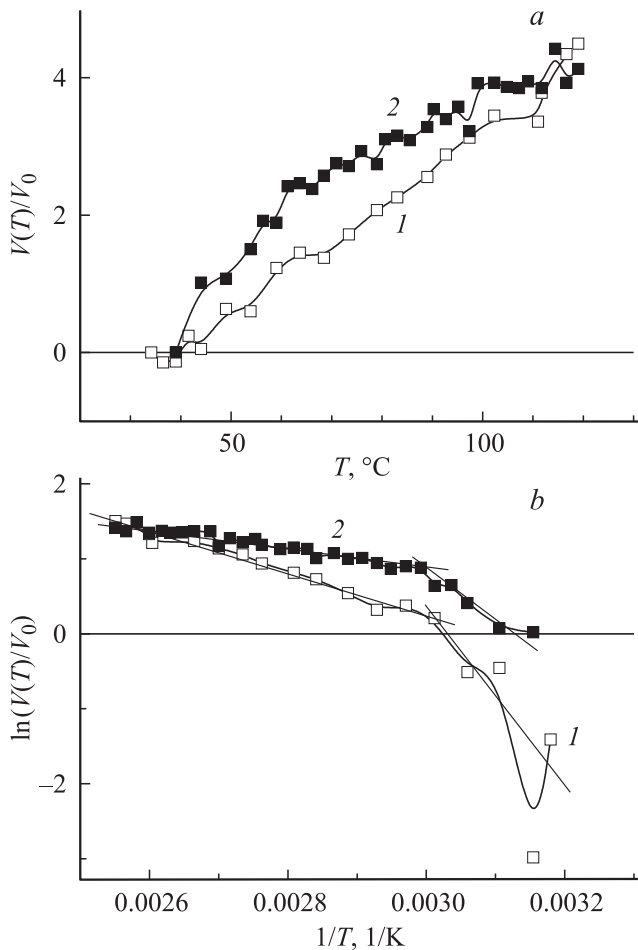


Рис. 1. Температурные зависимости отношения скоростей движения дислокаций в необработанном магнитном поле бериллии (*a*) и зависимости $\ln(V(T)/V_0) = f(1/T)$ (*b*), (*1* — нагревание, *2* — охлаждение).

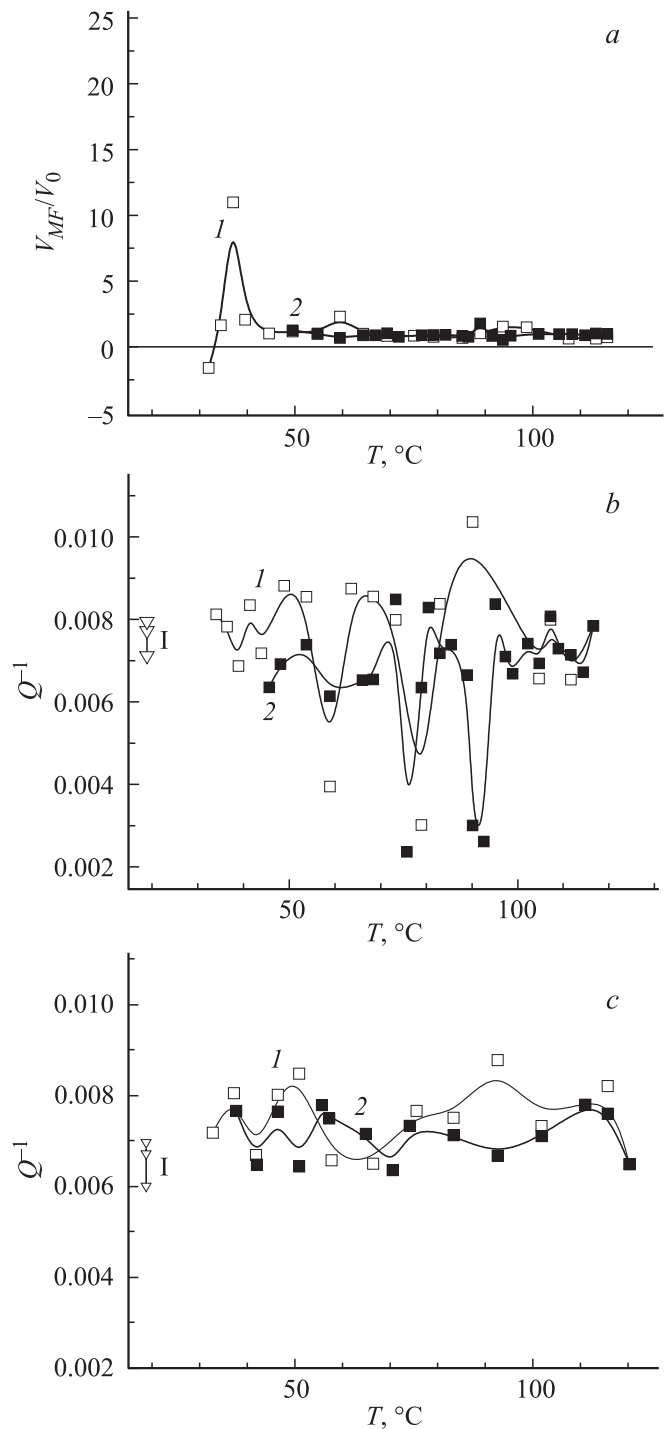


Рис. 2. Температурные зависимости отношения скоростей движения дислокаций V_{MF}/V_0 (*a*) и внутреннего трения (*b*, *c*) при первом магнитном воздействии (*b*), а также через 96 h после первой магнитной обработки (*c*), (*1* — нагревание, *2* — охлаждение). На рис. 2, *b* и 2, *c* *I* — разброс данных по ВТ.

Такое поведение кривых $V(T)/V_0$ удовлетворительно согласуется с поведением кривых температурной зависимости внутреннего трения $Q^{-1}(T)$ [29].

Ситуация значительно изменяется во время обработки МТК Ве в СПМП.

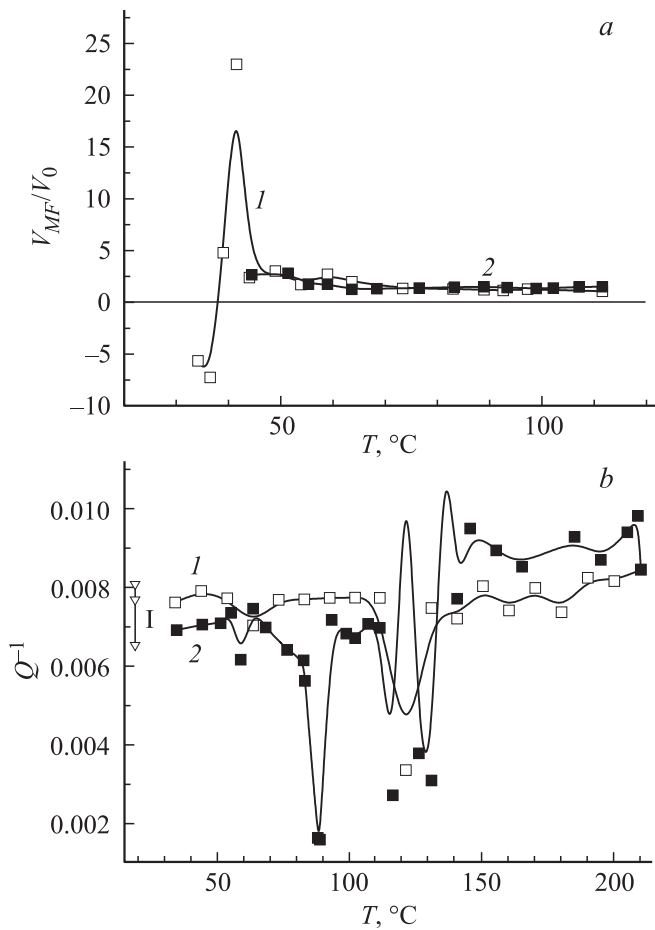


Рис. 3. Температурные зависимости отношения скоростей движения дислокаций V_{MF}/V_0 (a) и внутреннего трения (b) при втором магнитном воздействии, (1 — нагревание, 2 — охлаждение). На рис. 3, b I — разброс данных по ВТ.

На рис. 2, a изображены температурные зависимости отношения скоростей движения дислокаций V_{MF}/V_0 при нагревании и охлаждении в МП. На этих графиках практически отсутствует температурный гистерезис отношения скоростей. При нагревании наблюдается резкое возрастание V_{MF}/V_0 в области 45°C и незначительное увеличение скорости движения дислокаций выше этой температуры ($V_{MF}/V_0 \geq 1$). В то же время при охлаждении $V_{MF}/V_0 \leq 1$ практически во всем исследуемом температурном интервале.

Отметим, что магнитная обработка *in situ* модифицирует форму температурного гистерезиса упругих модулей и при этом сильно изменяет характер внутреннего трения (рис. 2, b). Однако изменения эти обратимы: выключение магнитного поля и повторные измерения упругих и неупругих свойств показали, что поведение эффективного модуля сдвига в зависимости от температуры $G_{ef}(T)$ и $Q^{-1}(T)$ практически восстанавливается, при этом на кривых температурных зависимостей внутреннего трения (ТЗВТ) обнаруживается слабый температурный гистерезис (рис. 2, c).

На рис. 3 изображены аналогичные зависимости V_{MF}/V_0 и внутреннего трения при втором магнитном воздействии на МТК Ве. Еще раз отметим полное отсутствие гистерезиса на температурной зависимости V_{MF}/V_0 при температурах выше 50°C как при нагревании, так и при охлаждении; резкое возрастание V_{MF}/V_0 в интервале 30–50°C при нагревании (почти в два раза, по сравнению с первой экспозицией). На всем остальном температурном интервале отношение V_{MF}/V_0 и при нагревании, и при охлаждении остается несколько большим единицы. При этом наблюдается возобновление сильной нестабильности в уровне поглощения упругой энергии (рис. 3, b).

Полученные результаты свидетельствуют об увеличении подвижности дислокаций в Ве в интервале 30–50°C при нагревании и незначительном росте скорости движения дислокаций в магнитном поле выше этих температур, как при нагревании, так и при охлаждении, что слабо коррелирует с поведением $Q^{-1}(T)$: существенная нестабильность уровня поглощения упругой энергии наблюдается только выше 50°C (рис. 3, b). Создается

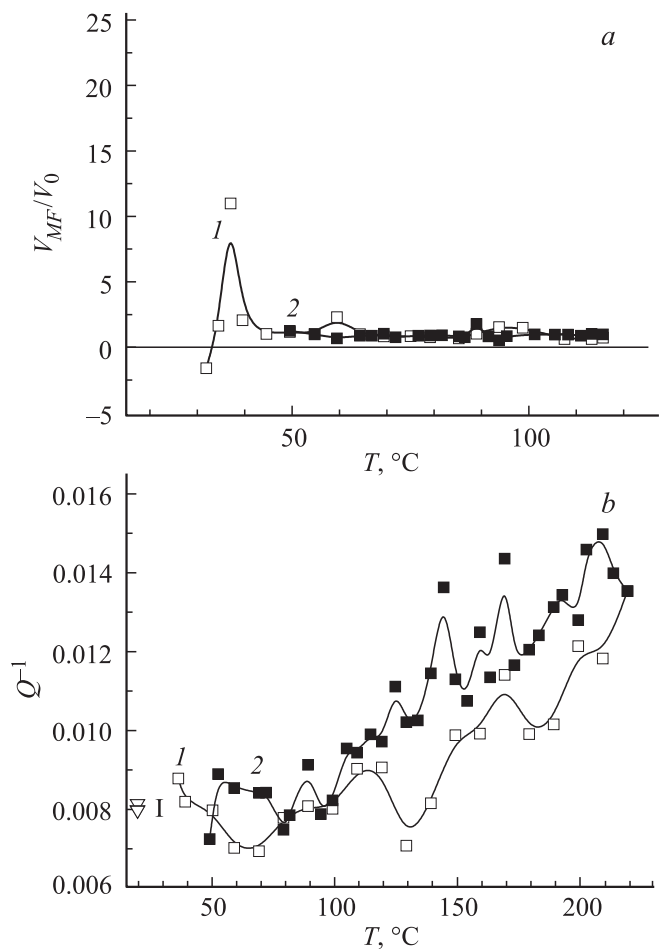


Рис. 4. Температурные зависимости отношения скоростей движения дислокаций V_{MF}/V_0 (a) и внутреннего трения (b), (1 — нагревание, 2 — охлаждение) при третьем магнитном воздействии. На рис. 4, b I — разброс данных по ВТ.

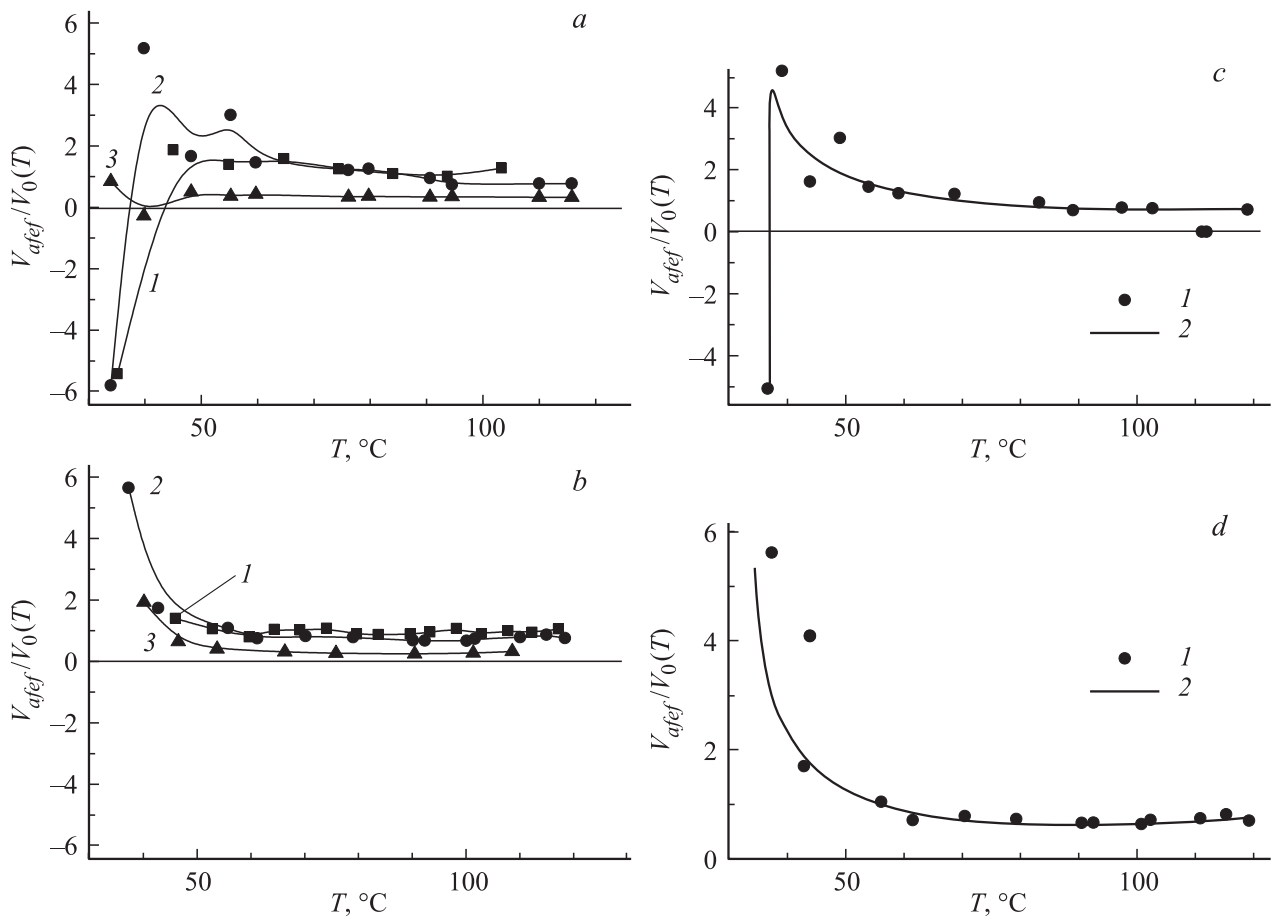


Рис. 5. Температурные зависимости отношения скоростей движения дислокаций $V_{afef}/V_0(T)$ при нагревании (a) и при охлаждении (b) через 120 (1); 1080 (2) и 2136 h (3) после третьего магнитного воздействия. 1 — на рис. 5, c, d — $V_{afef}/V_0(T)$, рассчитанные после второго магнитного воздействия при нагревании и охлаждении соответственно. 2 — аналитические кривые, построенные по эмпирическим формулам (2), (3).

впечатление, что процессы, происходящие в дефектной подсистеме и проявляющиеся в изменении упругих свойств, предшествуют процессам, вызывающим затем изменение в поглощении упругой энергии.

В то же время третья магнитная обработка *in situ* привела к уменьшению подвижности дислокаций в магнитном поле по сравнению со второй экспозицией во всем исследуемом интервале температур (рис. 4, a). При этом зависимости $Q^{-1}(T)$ стали значительно стабильнее, с заметным температурным гистерезисом свойств и значительным увеличением уровня поглощения упругой энергии по сравнению с уровнем домагнитной обработки (рис. 4, b).

После магнитной обработки отношения скоростей движения дислокаций V_{afef}/V_0 резко возрастают с повышением температуры, переходя из отрицательной в положительную область значений, и достигают максимума в интервале 40–50°C, после чего плавно убывают, оставаясь при этом все время больше единицы (рис. 5, a, кривые 1, 2). По истечении более 2000 h после третьего магнитного воздействия, отношение V_{afef}/V_0 (рис. 5, a

кривая 3) становится значительно меньше единицы во всем интервале температур, что может свидетельствовать о закреплении дислокаций на атмосферах точечных дефектов, причем больше, чем до воздействия МП.

Поведение температурных зависимостей V_{afef}/V_0 при охлаждении (рис. 5, b) аналогично поведению этих же зависимостей при нагревании: уменьшение температуры ниже 50°C приводит к резкому увеличению отношения скоростей движения дислокаций.

Из анализа температурно-временных зависимостей, представленных на рис. 6, a видно, что с течением времени отношение V_{afef}/V_0 в интервале 20–57°C сначала возрастает, а потом плавно убывает. При более высоких температурах оно только монотонно убывает. При этом V_{afef}/V_0 на временной базе до 500 h старения возрастает практически в 6 раз по сравнению с отношением скоростей движения дислокаций до магнитного воздействия (кривые 1 и 2 на рис. 6, a), что свидетельствует о дополнительном освобождении дислокаций от примесей через 20 суток после магнитной обработки. Дальнейшее старение постепенно замедляет скорость движения дис-

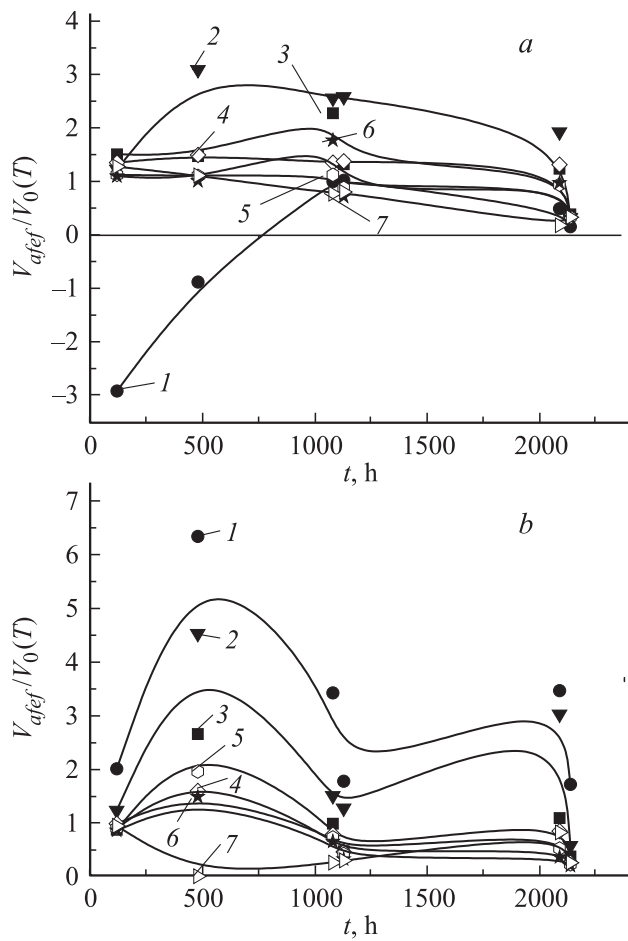


Рис. 6. Температурно-временные зависимости отношения скоростей движения дислокаций $V_{afef}/V_0(T)$ в процессе старения. *a* — нагревание, $T, ^\circ\text{C}$: 1 — 38, 2 — 47, 3 — 57, 4 — 69, 5 — 84, 6 — 96, 7 — 103; *b* — охлаждение, $T, ^\circ\text{C}$: 1 — 40, 2 — 48, 3 — 56, 4 — 67, 5 — 78, 6 — 90, 7 — 108.

локаций: с повышением температуры каждая следующая кривая лежит ниже предыдущей, что может свидетельствовать о постепенном закреплении дислокаций на стопорах.

При охлаждении (рис. 6, *b*) V_{afef}/V_0 также немонотонно изменяется со временем: наблюдаются два своеобразных максимума в областях 500–600 и 1900–2000 ч. Такое поведение отношения скоростей движения дислокаций коррелирует с периодическим изменением во времени площади петли гистерезиса на кривых $G_{ef}(T)$.

Наличие двух максимумов на рис. 6, *b* при охлаждении может указывать на то, что кроме магнитного последействия на скорость движения дислокаций оказывает влияние некий дополнительный фактор, ускоряющий дислокации уже после воздействия магнитного поля. Действительно, исходя из представлений о спин-зависимых механизмах МПЭ, после последней экспозиции в СПМП магнитные моменты пара- и ферромагнитных примесей под воздействием температуры, механических напряжений и т.п. с течением времени могут только

разориентироваться, а, следовательно, открепленные в СПМП дислокации — закрепляться. Исходя из этих представлений увеличение практически в 6 раз скорости движения дислокаций через 500 ч старения является аномальным и требует дополнительных исследований.

Экспериментальные кривые $V_{afef}/V_0(T)$ (рис. 5, *a* и *b*) удовлетворительно описываются эмпирическими зависимостями (2) и (3) (см. рис. 5, *c* и *d*)

$$\frac{V_{afef}}{V_0}(T) = C_1 \left(\frac{T}{36.8} - 1 \right)^{-\frac{1}{3.3}} \times \log_2 \left\{ C_2 \left(\frac{T}{36.9} - 1 \right)^{\frac{1}{3.3}} \log_6 \left[C_3 \left(\frac{T}{36.9} + 1 \right) \right] \right\} \times \exp \left(\frac{T}{450} \right) - C_4 \quad \text{— нагревание,} \quad (2)$$

$$\frac{V_{afef}}{V_0}(T) = C'_1 \left(\frac{T}{30.1} - 1 \right)^{-\frac{1}{6}} \times \log_2 \left\{ C'_2 \left(\frac{T}{34.1} - 1 \right)^{-\frac{1}{3}} \log_2 \left(\frac{T}{30.1} + C'_3 \right) \right\} \times \exp \left(\frac{T}{230} \right) - C'_4 \quad \text{— охлаждение,} \quad (3)$$

где C_i, C'_i ($i = 1, 2, 3, 4$) — подгоночные параметры.

Как видим, эти зависимости имеют сложный аналитический вид, что связано, вероятно, с одновременным действием нескольких механизмов движения дислокаций.

Мы предполагаем, что сложный характер аналитических зависимостей $V_{afef}/V_0(T)$ в МТК Ве как при нагревании, так и при охлаждении (см. (2, 3)) может быть обусловлен движением дислокаций, которое контролируется стопорами и действием внутренних напряжений.

Обозначим внутренние напряжения, возникающие в МТК Ве при изменении температуры, через σ_T . Учитывая анизотропию бериллиевого конденсата (гексагональный поликристалл), наличие у него значительных термических напряжений, обусловленных анизотропией коэффициентов линейного расширения (σ_α) [32], напряжения, связанные со структурными превращениями, происходящими в этой области температур при деформации (σ_{str}) и внутренние напряжения, возникающие в областях залегания дефектов, например, на стыках зерен (σ_{int}), запишем

$$\sigma_T = \sigma_{str} + \sigma_\alpha + \sigma_{int}. \quad (4)$$

Под действием σ_T дислокации в бериллии начинают двигаться, и в процессе старения возможно увеличение скорости их движения, если эти напряжения не успели релаксировать.

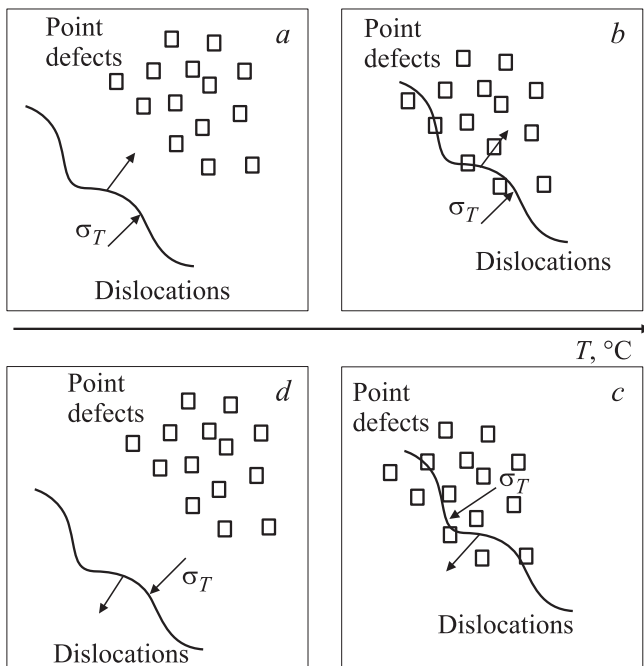


Рис. 7. Схематическое представление движения дислокаций в бериллии при нагревании (*a, b*) и охлаждении (*c, d*).

Схематически этот процесс изображен на рис. 7: освобожденные магнитным полем дислокации под действием термических напряжений при нагревании „догоняют“ атмосферы точечных дефектов и закрепляются на них (рис. 7, *a* и *b*). Это должно приводить к уменьшению V_{afef}/V_0 , что и наблюдается экспериментально для всех времен старения.

При понижении температуры (рис. 7, *c, d*), дислокации „освобождаются“ от атмосфер примесей под действием тех же термических напряжений, поменявших направление действия на противоположное. В результате, при температурах порядка комнатных, дислокации снова становятся свободными (V_{afef}/V_0 при охлаждении ниже 60°C возрастает). Однако в процессе старения прирост скоростей движения дислокаций при понижении температуры уменьшается (см. рис. 5, *b*, кривая 3). Предложенная схема объясняет сложный характер температурных зависимостей V_{afef}/V_0 , аппроксимированных соотношениями (2) и (3), но уточнение механизмов движения дислокаций в процессе старения Be требует дальнейших исследований.

4. Заключение

Таким образом, в работе показано, что

— в слабом постоянном магнитном поле *in situ* в области 60°C при нагревании МТК Be наблюдается резкое (в десятки раз) увеличение отношения скоростей движения дислокаций V_{MF}/V_0 ;

— магнитное последствие в бериллии имеет ярко выраженный немонотонный характер и сопровождается максимумами как на температурных, так и на временных зависимостях V_{afef}/V_0 ;

— эмпирически установлен сложный характер температурных зависимостей V_{afef}/V_0 в процессе старения МТК Be после экспозиции в магнитном поле, указывающий на наличие нескольких механизмов магнитной памяти.

Список литературы

- [1] Г.И. Дистлер, В.М. Каневский, В.В. Москвин, С.Н. Постников, Л.А. Рябинин, В.П. Сидоров, Г.Д. Шнырев. ДАН СССР **268**, 591 (1983).
- [2] Ю.И. Головин. ФТТ **46**, 769 (2004).
- [3] Р.Б. Моргунов. УФН **174**, 131 (2004).
- [4] А.Е. Смирнов, А.А. Урусовская. ФТТ **29**, 852 (1987).
- [5] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. Письма в ЖЭТФ **58**, 189 (1993).
- [6] М.Н. Левин, А.В. Татаринцев, О.А. Косцова, А.М. Косцов. ЖТФ **73**, 10, 85 (2003).
- [7] Г.В. Семенова, О.Н. Шумская, А.В. Татаринцев, Э.А. Долгополова, М.А. Дронов, М.Н. Левин. Конденсированные среды и межфазные границы **7**, 2, 150 (2005).
- [8] М.Н. Левин, В.Н. Семенов, А.В. Наумов. Письма в ЖТФ **27**, 7, 35 (2001).
- [9] М.Н. Левин, Б.А. Зон. ЖЭТФ **111**, 1373 (1997).
- [10] М.Н. Левин, В.В. Постников, М.Ю. Паладин А.М. Косцо. ФТТ **45**, 513 (2003).
- [11] О.В. Ковпак, А.И. Дмитриев, Р.Б. Моргунов. ФТТ **54**, 1350 (2012).
- [12] М.В. Бадылевич, Ю.Л. Иунин, В.В. Кведер. ЖЭТФ **124**, 664 (2003).
- [13] Ю.А. Осипьян, Р.Б. Моргунов, А.А. Баскаков, А.М. Орлов, А.А. Скворцов, Е.Н. Инкина, Й. Танимото. Письма в ЖЭТФ **79**, 158 (2004).
- [14] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, В.Е. Иванов, С.Е. Жуликов, А.А. Дмитриевский. Письма в ЖЭТФ **68**, 400 (1998).
- [15] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, В.Е. Иванов, А.А. Дмитриевский. ЖЭТФ **117**, 1080 (2000).
- [16] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, Е.А. Петрижик. ФТТ **54**, 305 (2012).
- [17] В.А. Петрунин, Д.В. Загуляв, С.В. Коновалов, В.Е. Громов. Фундаментальные проблемы современного материаловедения **6(2)**, 51 (2009).
- [18] В.А. Петрунин, Д.В. Загуляв, С.В. Коновалов, В.Е. Громов, В.Я. Целлермаер. Изв. Алтайского гос. ун-та (АГУ). Физика **1-2(73)**, 150 (2012).
- [19] Д.В. Загуляв, С.В. Коновалов, В.Е. Громов. Вестн. ЮУрГУ. Сер. Математика. Механика. Физика **9**, 53 (2010).
- [20] Д.В. Загуляв, С.В. Коновалов, В.Е. Громов. Вестн. Челябинского гос. ун-та. Физика **12(193)**, 21 (2010).
- [21] Н.Н. Песчанская, Б.И. Смирнов, В.В. Шпейзман. ФТТ **50**, 997 (2008).
- [22] О.И. Дацко, В.И. Алексеенко. ФТТ **39**, 1234 (1997).

- [23] Ю.В. Осинская, А.В. Покоев. Вестн. СамГУ. Естественно-научн. сер. **4(22)**, 136 (2001).
- [24] Ю.В. Осинская, С.С. Петров, А.В. Покоев, В.В. Рунов. ФТТ **52**, 486 (2010).
- [25] V.I. Belyavsky, M.N. Levin. Phys. Rev. B **70**, 104 101 (2004).
- [26] Р.Б. Моргунов, А.Л. Бучаченко. ЖЭТФ **68**, 400 (1998).
- [27] R.V. Morgunov, A.L. Vuchachenko. Phys. Rev. B **82**, 014 115 (2010).
- [28] Е.И. Курек, И.Г. Курек, А.В. Олейнич-Лысюк, Н.Д. Раранский. ФТТ **55**, 1897 (2013).
- [29] А.В. Олейнич-Лысюк, Н.Д. Раранский. ФТТ **54**, 417 (2012).
- [30] Б.В. Петухов. ФТТ **44**, 2149 (2002).
- [31] В.С. Урбанович. В сб.: Актуальные проблемы физики твердого тела. Ред. Н.М. Олехнович. Бел. наука, Минск (2003). С. 699.
- [32] Б.Г. Стронгин, В.Г. Ткаченко, А.В. Олейнич, Н.К. Лашук. ФММ **11**, 187 (1990).