

01,07

Особенности магнитоэластического эффекта в бериллиевом конденсате

© А.В. Олейнич-Лысюк, Н.Д. Раранский

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

E-mail: a-oliynich@ukr.net

(Поступила в Редакцию 6 апреля 2011 г.

В окончательной редакции 2 сентября 2011 г.)

Исследовалось влияние слабого постоянного магнитного поля на неупругие характеристики магнийтермического бериллиевого конденсата (99.95 wt.% Be). Показано, что магнитное поле по-разному влияет на дефектную подсистему бериллия и в зависимости от обработки образцов приводит либо к ее упрочнению, либо к разупрочнению. На основе анализа амплитудных зависимостей внутреннего трения и модулей упругости проведены оценки скорости движения дислокаций после воздействия магнитного поля. Показано, что магнитное последствие в Be значительно эффективнее воздействия *in situ*.

Работа выполнена при поддержке МОН Украины в рамках проекта № 0110U000185.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования влияния слабых магнитных полей (МП) на физические свойства немагнитных материалов привели в конечном итоге к созданию в физике прочности нового направления — спиновой микромеханики [1,2]. Начиная с открытия В.И. Альшицем с сотрудниками магнитоэластического эффекта [3] (МПЭ) в 1987 г. и до настоящего времени подавляющее большинство работ было выполнено на ионных кристаллах как наиболее простых модельных материалах, в которых эффект изменения пластичности под действием слабых МП можно наблюдать практически в чистом виде [2]. Согласно современным представлениям, увеличение пластичности немагнитных ионных кристаллов на 50–100% в слабом ($B < 0.1$ Т) магнитном поле связано с „переключением“ спинов дефектов, принимающих участие в пластической деформации, что приводит к освобождению дислокаций от закрепляющих их стопоров [2]. Изменение пластичности твердых тел под действием МП наблюдается не только в ионных кристаллах, но и в материалах с другими типами химической связи (ковалентных, ионно-ковалентных, молекулярных, металлических и даже в аморфных [4]). Однако наименее изучен МПЭ, по-видимому, в диамагнитных металлах, как наиболее сложных объектах для подобных исследований [5,6]. В металлах МПЭ зачастую маскируется и значительно искажается сопутствующими эффектами, такими как вихревые электрические поля и токи, электропластический эффект и др. Тем не менее перспектива управления пластичностью металлов при комнатных температурах при помощи МП должна, как нам кажется, стимулировать такие работы.

В настоящем исследовании представлены результаты изучения влияния слабого постоянного МП на упругие и неупругие характеристики магнийтермического конденсата бериллия (МТК Be) в области температур структурно-фазовых превращений с целью выяснения возмож-

ности управления с помощью слабого постоянного МП пластическими свойствами этого металла. При выборе объекта и методик исследований мы руководствовались следующими соображениями. Во-первых, Be — металл с диамагнитными свойствами. Во-вторых, бериллий — известный конструкционный материал, обладающий при температурах, близких к комнатной, повышенной хрупкостью [7]. Возможность решения проблемы хрупкости бериллия при помощи МП показалась нам весьма перспективной. Тем более что в интервале температур $-50-400^\circ\text{C}$ в МТК Be имеет место ряд необычных структурных превращений, инициирующих существенную перестройку дефектной подсистемы, которая сопровождается 20% размягчением эффективного модуля сдвига (G_{ef}) вблизи 260°C [8–10]. Как известно, нелинейное поведение G_{ef} с температурой свидетельствует о значительной нестабильности именно дислокационно-примесной системы, что позволит нам выполнять основное условие существования МПЭ (возобновляемая нестабильность дефектной подсистемы [1]) при помощи простого термоциклирования в указанном интервале температур. И наконец, поскольку в структурных превращениях в Be преобладают сдвиговые процессы [10], в качестве основного метода исследования был выбран метод низкочастотного ($\sim 1\text{ s}^{-1}$) внутреннего трения (ВТ) с синхронным измерением G_{ef} .

Изучался материал, содержащий 99.95 wt.% Be, до, после и во время экспозиции в слабом ($B = 0.03$ Т) МП. Образцы поликристаллического бериллиевого конденсата со средним размером зерен $\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ были изготовлены в виде параллелепипедов размером $1.1 \times 1.1 \times 100\text{ mm}$. Измерения проводились на полуавтоматическом релаксметре типа обратного крутильного маятника в вакууме $\sim 10^{-3}$ Па по известным методикам [10]. Постоянное МП создавалось при помощи соленоида на постоянном токе. Во избежание вовлечения

зажимов образцов в МП верхняя и нижняя цанги с держателями, которые попадали в МП, были изготовлены из стали немагнитных сортов. Чтобы исключить влияние вихревых электрических полей в моменты включения и выключения МП, измерения упругих и неупругих свойств *in situ* начинались через 3–5 min после включения поля и заканчивались за 3–5 min до его выключения.

Измерялись амплитудные и температурные зависимости ВТ, а также квадрата частоты свободных затухающих крутильных колебаний f^2 , пропорционального эффективному модулю сдвига G_{ef} . Кривые амплитудных зависимостей ВТ и f^2 получали при увеличении и уменьшении степени относительной деформации γ в интервале от $5 \cdot 10^{-5}$ до $2.5 \cdot 10^{-4}$. Температурные зависимости ВТ и f^2 измерялись синхронно в динамическом режиме со средними скоростями нагревания-охлаждения $2-4^\circ\text{C}/\text{min}$ при постоянном МП или без него. Относительная погрешность в измерении ВТ не превышала 1%, а при измерении $f^2 \sim G_{ef}$ — 0.1%.

Проведенные исследования показали, что влияние МП на упругие и неупругие характеристики Ве-конденсата имеет место и при непосредственном воздействии поля, и после такого воздействия, но сильно зависит от температурного интервала, в котором проводилось термоциклирование образцов.

Так, на рис. 1 представлены кривые амплитудных зависимостей ВТ и f^2 , измеренные при комнатной температуре до воздействия МП (а) и в МП *in situ* (б).

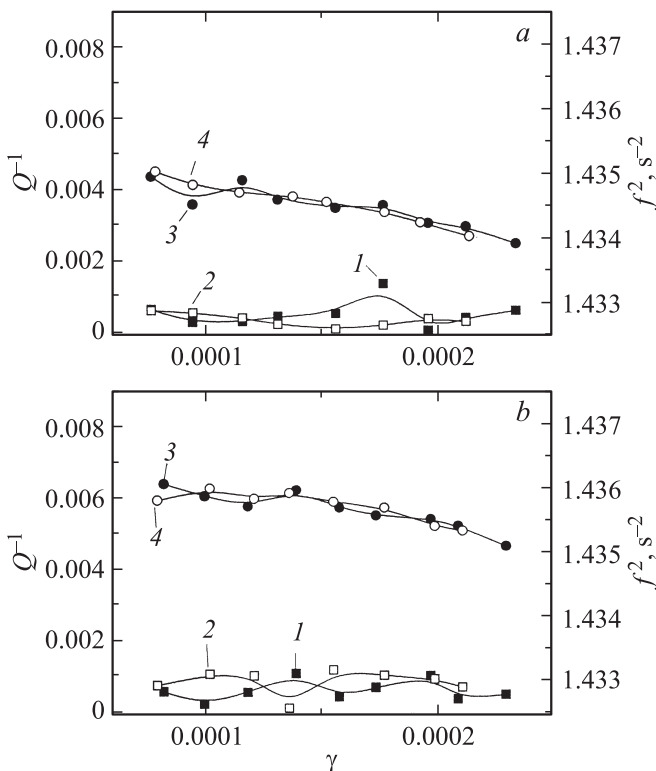


Рис. 1. Амплитудные зависимости ВТ (1, 2) и f^2 (3, 4) до воздействия МП (а) и во время действия МП (б). 1, 3 — при увеличении степени деформации γ ; 2, 4 — при уменьшении γ .

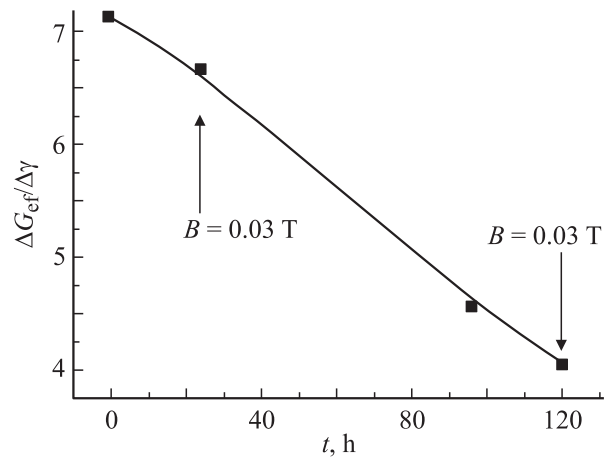


Рис. 2. Зависимость $\Delta G_{ef}/\Delta\gamma$ от времени последствия МП. Стрелками указаны значения $\Delta G_{ef}/\Delta\gamma$, измеренные во время 25 min экспозиции образца в МП величиной 0.03 Т.

Видно, что непосредственное воздействие МП в течение 25 min приводит к некоторому закреплению дислокаций в Ве: эффективный модуль сдвига и при увеличении, и при уменьшении γ несколько возрастает ($\sim 0.1\%$), при этом скорость уменьшения G_{ef} с ростом амплитуды деформации ($\Delta G_{ef}/\Delta\gamma$) остается практически неизменной, точно так же как и средний уровень ВТ.

Однако через 72 h после действия МП ситуация становится несколько иной. Абсолютное значение G_{ef} практически не изменяется, а показатель $\Delta G_{ef}/\Delta\gamma$, который может служить характеристикой подвижности дислокаций в приложенном периодическом механическом поле, уменьшается в среднем на 30% (рис. 2). ВТ образцов после обработки в МП сильно дестабилизируется, при этом уровень трения увеличивается в 2–4 раза (рис. 3, а), т.е. оно ведет себя аномально. Действительно, рост уровня поглощения упругой энергии свидетельствует об увеличении подвижности дефектов, в данном случае дислокаций, а более высокое по сравнению с исходным (до воздействия поля) значение G_{ef} при $\gamma_0 = 7.7 \cdot 10^{-5}$ подтверждает их закрепленное состояние. Создается впечатление, что в процессах поглощения упругой энергии в бериллии и в изменении G_{ef} принимают участие два различных типа дефектов, причем первые во время магнитного последствия становятся подвижнее, а подвижность вторых при этом не изменяется.

При повторном включении МП уровень поглощения упругой энергии понижается до первоначального уровня и стабилизируется. При этом величина эффективного модуля G_{ef} при $\gamma_0 = 7.7 \cdot 10^{-5}$ практически не изменяется, а $\Delta G_{ef}/\Delta\gamma$ продолжает падать. Такое поведение упругих и неупругих характеристик Ве является аномальным и труднообъяснимым с точки зрения поведения дислокационно-примесной системы в материалах, близких к состоянию термодинамического равновесия (рис. 3, б).

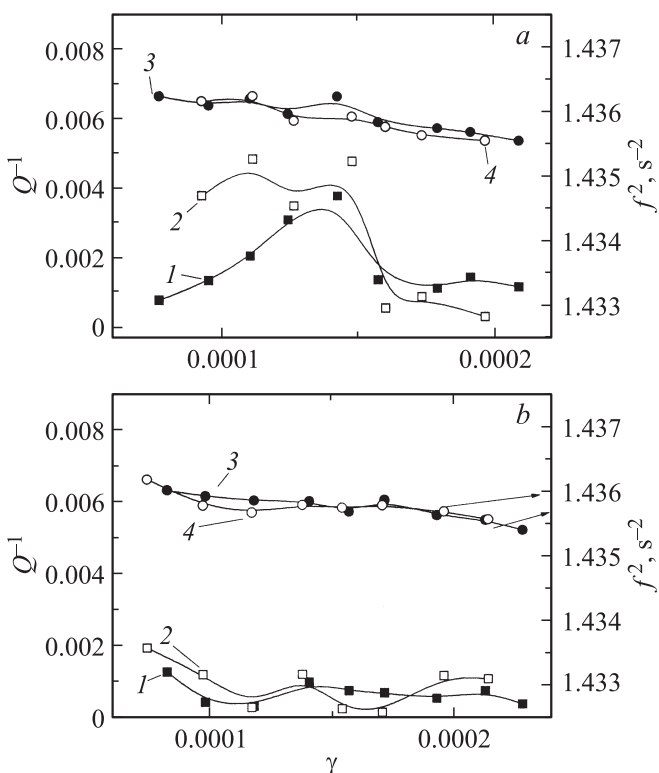


Рис. 3. Амплитудные зависимости ВТ (1, 2) и f^2 (3, 4) через 72 h после воздействия МП (a) и при последующем воздействии МП *in situ* (b). 1, 3 — при увеличении γ ; 2, 4 — при уменьшении γ .

Результаты, полученные при измерении амплитудных зависимостей ВТ, полностью подтверждаются при температурных исследованиях ВТ и f^2 . На рис. 4 представлены кривые температурных зависимостей ВТ и f^2 , измеренные до первого воздействия МП (a) и во время экспозиции в магнитном поле (b).

Как видно перед воздействием МП поведение кривых $Q^{-1}(T)$ при охлаждении существенно нестабильно: уровень поглощения упругой энергии при охлаждении увеличивается по сравнению с начальным на порядок. При этом наблюдается значительный температурный гистерезис кривых $Q^{-1}(T)$ и $f^2(T)$ (рис. 4, a). Воздействие МП эффективно блокирует поглощение упругой энергии при охлаждении, уменьшая температурный гистерезис ВТ, хотя гистерезис f^2 остается неизменным и даже несколько увеличивается (рис. 4, b). И снова поглощение упругой энергии и модули упругости ведут себя по-разному — так, как будто они являются результатом действия двух различных подсистем дефектов, которые по-разному реагируют на приложение МП.

Совершенно иным становится поведение упругих и неупругих характеристик МТК Ве через 144 h после последнего воздействия МП и после увеличения максимальной температуры термоциклирования до 110°C (рис. 5, a). Уровень трения увеличивается в 8–9 раз и стабилизируется; эффективный модуль сдвига при

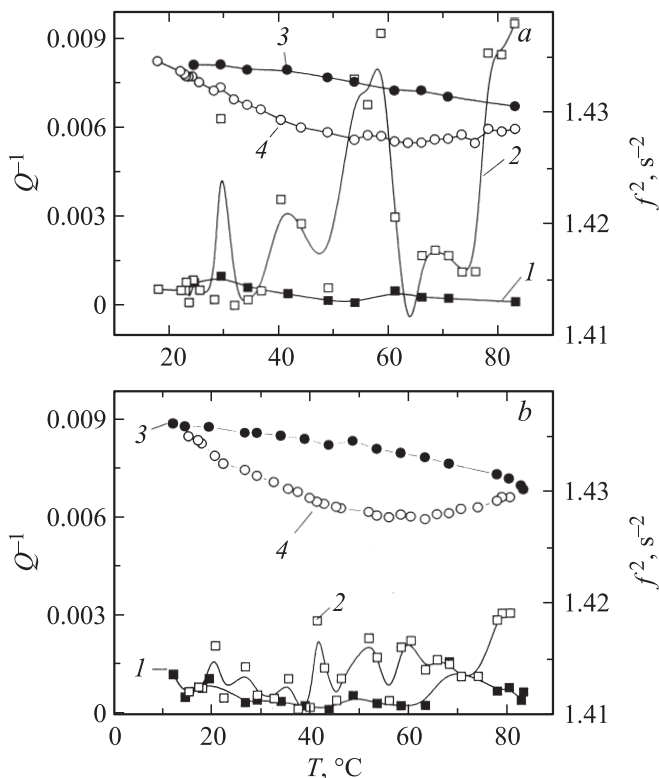


Рис. 4. Температурные зависимости ВТ (1, 2) и f^2 (3, 4) при нагревании (1, 3) и охлаждении (2, 4) до воздействия МП (a) и при экспозиции в МП *in situ* (b).

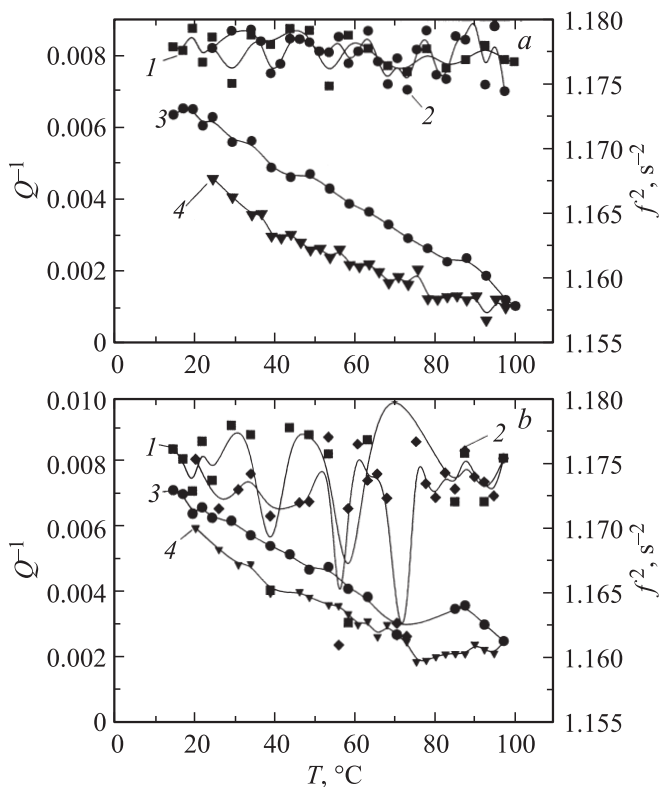


Рис. 5. Температурные зависимости ВТ (1, 2) и f^2 (3, 4) при нагревании (1, 3) и охлаждении (2, 4) через 144 h после приложения МП (a) и при воздействии МП *in situ* (b).

комнатной температуре уменьшается на $\sim 22\%$; величина $\Delta G_{ef}/\Delta\gamma$ возрастает в среднем на порядок (с 7.13 до 67.2); на кривых $f^2(T)$ по-прежнему наблюдается существенный температурный гистерезис (ср. рис. 5, а и 4, b). Однако помещение образца в таком состоянии в МП *in situ* приводит в отличие от наблюдавшегося ранее к существенной дестабилизации ВТ и сужению петли гистерезиса (рис. 5, b). После выключения МП упругие и неупругие характеристики образца практически полностью восстанавливаются. Однако через 96 h выдержки при комнатной температуре без МП величина $\Delta G_{ef}/\Delta\gamma$ увеличивается в 1.65 раза, что указывает на рост подвижности дислокаций в бериллии после экспозиции в МП на 65% именно в этом состоянии.

Из изложенного выше следует, что и при нагревании до 80°C , и при нагревании в интервале $20\text{--}110^\circ\text{C}$ влияние слабого МП на упругие и неупругие характеристики МТК Ве наиболее существенно проявляется впоследствии (через несколько суток после экспозиции в МП). Однако характер этого воздействия может существенно различаться и приводить либо к упрочнению материала, либо к его разупрочнению (ср. результаты, представленные на рис. 4 и 5).

Прежде чем приступить к обсуждению полученных результатов, напомним, что основной вклад в поглощение упругой энергии на частоте порядка 1 s^{-1} вносят движущиеся в поле переменных внешних напряжений дислокации, окруженные закрепляющими их атмосферами примеси. Поэтому анализ амплитудных зависимостей ВТ и G_{ef} в рамках современных моделей амплитудно-зависимого ВТ позволяет определить основные параметры дислокационных структур и взаимодействия дислокаций с примесями, такие как плотность дислокаций Λ , энергия взаимодействия дислокации с закрепляющими стопорами E_{bind} и многие другие. Однако при исследовании МПЭ наиболее интересной является все-таки оценка скорости движения дислокаций в поле приложенных знакопеременных напряжений. Для оценки действия МП на скорость движения дислокаций в Ве мы проанализировали известные модели амплитудно-зависимых ВТ и дефекта модуля (модели Давыденкова, Асано, Гранато-Люкке, Бейкера [11]) и пришли к выводу, что для количественного анализа влияния МП на упругие характеристики диамагнитного Ве следует воспользоваться моделью Бейкера. В этой модели предложен простой алгоритм определения средних скоростей движения дислокаций на основе данных по амплитудным зависимостям ВТ и фактически указано на связь амплитудно-зависимого декремента и дислокационной деформации. Бейкер использовал пропорциональность декремента δ_h и дефекта модуля упругости $(\Delta M/M)_h$

$$\delta_h = r(\Delta M/M)_h, \quad (1)$$

а также выражение для дислокационной деформации ε_{dm} :

$$\varepsilon_{dm} = \varepsilon_0 \delta_h / r, \quad (2)$$

где ε_0 — относительная деформация в амплитудно-независимой области [11].

При установившихся колебаниях скорость дислокационной деформации $\dot{\varepsilon}_d$ пропорциональна величине дислокационной деформации ε_{dm} :

$$\dot{\varepsilon}_d = 4f_0 \varepsilon_{dm}, \quad (3)$$

где f_0 — частота собственных крутильных колебаний. Тогда средняя скорость движения дислокаций V_{av} может быть получена с помощью известного соотношения Орована

$$\dot{\varepsilon}_d = \Lambda b V_{av}. \quad (4)$$

Эта модель связывает дислокационную деформацию с дефектом модуля упругости $\varepsilon_d = \varepsilon_0 \frac{\Delta M}{M}$, а скорость изменения дислокационной деформации

$$\dot{\varepsilon}_d = 4f_0 \varepsilon_d = 4f_0 \varepsilon_0 \frac{\Delta M}{M} = \Lambda b v_d \quad (5)$$

со скоростью движения дислокаций v_d под действием внешнего механического поля. Используя последнее выражение, можно получить формулу для оценки скорости движения дислокаций под действием магнитного поля (или в его отсутствие)

$$v_d = \frac{4f_0 \gamma_0 \Delta f^2 / f^2}{\Lambda b}, \quad (6)$$

где Λ — плотность дислокаций, \mathbf{b} — вектор Бюргерса.

Оценка v_d по соотношению (6) показала, что последействие МП приводит к увеличению средней скорости движения дислокаций в МТК Ве после термообработки до 110°C на 65% по сравнению со скоростью движения дислокаций до воздействия МП (или сразу после выключения МП).

Природу увеличения скорости движения дислокаций под действием МП в МТК Ве в общих чертах, как и в кристаллах NaCl, можно попытаться объяснить с позиций теории спин-зависимых реакций между неравновесными структурными дефектами. Согласно этой теории, отрыв дислокации от закрепляющих ее стопоров под действием слабых МП возможен только в сильно неравновесных структурах за счет конверсии спинов дислокации и дислокационного стопора (см. рис. 22 в обзоре [1]). После перехода системы дислокация-дислокационный стопор в возбужденное S^* -состояние воздействия даже очень слабого МП оказывается достаточно для конверсии спинов и перехода системы в T -состояние, в котором даже энергия тепловых колебаний ($\sim kT$) способна открепить дислокации и увеличить скорость их движения под действием прикладываемых механических полей.

Такой подход к объяснению поведения дефектов в Ве-конденсате кажется нам вполне приемлемым, поскольку МТК Ве отвечает всем условиям возникновения спин-зависимых реакций в диамагнитных материалах [2].

1. В процессе термоциклирования и после него дислокационно-примесная система конденсата находится в сильно неравновесном состоянии [8], поскольку в

исследуемых интервалах температур бериллиевый конденсат, как известно, испытывает структурно-фазовые превращения мартенситного типа [10]. Согласно современным представлениям, такие превращения можно рассматривать как особый случай пластической деформации, осуществляемый движением по кристаллу дислокаций превращения [12], которые оставляют за собой материал в метастабильном состоянии [13].

2. В Ве имеется несколько путей развития реакции между структурными дефектами, что подтверждается различным поведением его упругих, неупругих свойств и коэффициентов термического расширения в зависимости от условий термоциклирования („инверсное“, „промежуточное“ и „исходное“ состояния [9,10]).

3. В процессе измерения низкочастотного ВТ система подвергается воздействию циклической деформации кручением в интервале $5 \cdot 10^{-5}$ – $2.5 \cdot 10^{-4}$, что способствует сдвиговым процессам, протекающим при превращении, и в известной мере позволяет считать ее открытой.

Следовательно, выдержка в МП бериллиевых образцов, выведенных термоциклированием в магниточувствительное состояние, приводит к изменению спинового состояния его парамагнитных стопоров и откреплению дислокаций от блокирующих их дислокационных атмосфер. При этом уровень трения увеличивается, а значение G_{ef} уменьшается, указывая на пластификацию материала, по крайней мере на микроуровне. Однако такое поведение исследуемых свойств мы наблюдали только после термоциклирования до 110°C . При термоциклировании до 80°C увеличение G_{ef} и уменьшение ВТ непосредственно в МП свидетельствуют об упрочнении материала и закреплении дислокаций. После действия МП в этом случае росло только ВТ (при определенных значениях γ), эффективный модуль практически не изменялся, а следовательно, мы можем говорить об увеличении подвижности только за счет дефектов, принимающих участие в поглощении упругой энергии. Механизм этого процесса нам пока не совсем ясен и требует дальнейших исследований.

Таким образом, в настоящей работе показано следующее.

1. МП с величиной магнитной индукции 0.03 Т влияет на упругие и неупругие характеристики бериллиевого конденсата как при непосредственном воздействии МП *in situ*, так и после действия поля.

2. Магнитное последствие проявляется значительно сильнее непосредственного воздействия МП и имеет двойной характер: может приводить либо к упрочнению дефектной структуры, либо к ее разупрочнению, что в значительной степени определяется интервалом термоциклирования образцов, а следовательно, и их структурным состоянием.

3. На основе данных по амплитудным зависимостям ВТ и f^2 проведена оценка изменения скорости движения дислокаций в бериллии под действием МП и показано, что на базе модели Бейкера можно создать методику

количественного анализа влияния МП на скорость движения дислокаций в немагнитных материалах.

Авторы признательны А.А. Боднару за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] Ю.И. Головин. ФТТ **46**, 769 (2004).
- [2] Р.Б. Моргунов. УФН **174**, 131 (2004).
- [3] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Т.М. Перекалина, А.А. Урусовская. ФТТ **29**, 467 (1987).
- [4] С.Д. Савранский. ФХС **13**, 659 (1987).
- [5] О.И. Дацко, В.С. Абрамов, В.Ю. Дмитриенко, В.В. Чишко. Изв. РАН. Сер.физ. **70**, 1092 (2006).
- [6] А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей. ФТТ **43**, 1416 (2001).
- [7] И.И. Папиров, Е.С. Карпов, Г.Ф. Тихинский, А.В. Вертков, И.Г. Иванцов. ФММ **57**, 1211 (1984).
- [8] А.В. Олейнич, Б.Г. Стронгин, В.Г. Ткаченко. Изв. РАН. Сер. физ. **57**, 74 (1993).
- [9] А.В. Олейнич, Б.Г. Стронгин, Н.Д. Раранский. Металлофизика и новейшие технологии **18**, 57 (1996).
- [10] А.В. Олейнич-Лисюк, М.Д. Раранский. Металлофизика и новейшие технологии **28**, 1661 (2006).
- [11] А.Б. Лебедев. ФТТ **41**, 1214 (1999).
- [12] Б.И. Николин. Многослойные структуры и политипизм в металлических сплавах. Наук. думка, Киев (1984). 240 с.
- [13] В.В. Кулагина. Изв. вузов. Физика **2**, 30 (2001).