

01

О природе магнитоэластического эффекта в бериллиевом конденсате

© 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 2 апреля 2013 г.)

В бериллиевом конденсате изучено влияние постоянного слабого магнитного поля на температурные и амплитудные зависимости эффективного модуля сдвига, низкочастотного внутреннего трения и отношения скоростей движения дислокаций в магнитном поле и без него. Показано, что при одновременном воздействии постоянного магнитного поля, механических напряжений и переменной температуры в Ве наблюдается инверсия знака магнитоэластического эффекта. При этом имеют место инверсия знака отношения скоростей движения дислокаций и осцилляции на его температурной зависимости. На основе комплексного анализа амплитудных зависимостей исследуемых характеристик обсуждаются возможные механизмы проявления магнитоэластического эффекта в бериллии.

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

Перспектива управления пластическими свойствами немагнитных материалов при помощи магнитоэластического эффекта (МЭ) в слабых (< 1 Т) магнитных полях на протяжении нескольких последних десятилетий постоянно стимулирует исследования материаловедов. Во-первых, среди материалов, используемых человечеством, диамагнитных большинство. Во-вторых, создание магнитного поля такой величины процесс энергетически малозатратный, а изменение механических свойств материалов при МЭ может достигать 100%. Однако, несмотря на пристальное внимание ученых к этой проблеме и огромное количество экспериментального материала, механизмы этого нетривиального явления на сегодняшний день все еще не ясны [1,2].

Существуют, как минимум, четыре принципиально разных подхода, с помощью которых можно объяснить МЭ в диамагнетиках:

— механизм спин-зависимых реакций, основанный на предположении о том, что МЭ порождает эволюцию спинового состояния в системе дислокация — парамагнитный центр, приводящую к откреплению дислокаций от парамагнитного точечного дефекта [1,2];

— механизм влияния МЭ на пластические свойства материала посредством воздействия на фазовые превращения (ФП) [3–5];

— механизм силового взаимодействия „квасиферромагнитных“ областей — высокотемпературных магнитных упорядочений островного типа в исходных диамагнетиках — с движущимися в поле упругих напряжений дислокациями [6];

— механизм образования электронных вихрей под воздействием МЭ [7].

Однако в реальных кристаллах проявление МЭ значительно усложняется и приводит к тому, что даже в рамках одного подхода становится возможным существование нескольких механизмов протекания процесса.

Так, например, в рамках подхода, учитывающего спин-зависимый характер реакций, следует иметь в виду, что слабое МЭ может влиять как на характер движения дислокаций, так и преобразовывать стопоры, с которыми эти дислокации взаимодействуют. Следовательно, в реальных диамагнетиках можно наблюдать спин-зависимый МЭ двух типов:

— „динамический“, состоящий в изменении взаимодействия дислокаций со стопорами в процессе движения дислокаций. Если дислокаций нет, либо они неподвижны, то „динамический“ МЭ становится невозможным.

— „статический“, при котором превращаются сами дислокационные стопоры. При этом в момент наложения внешнего поля в материале не обязательны ни движение, ни даже наличие дислокаций. Магнитостимулированная перестройка кластеров примесей, контролируемая диффузионной активностью ионов примеси, происходит, как правило, до пластической деформации [8,9].

Пока нет четкого понимания, один или несколько механизмов определяют закономерности влияния МЭ на механические свойства того или иного диамагнитного материала, поэтому выяснение природы МЭ в каждом конкретном случае является довольно сложной задачей. В случае диамагнитного Ве она существенно усложняется как практическим отсутствием экспериментальных исследований [10,11], так и, по-видимому, одновременным проявлением нескольких механизмов. Кроме механизма спин-зависимых реакций, в Ве может проявляться механизм влияния МЭ на структурно-фазовые превращения, а существенные эффекты последствия могут быть результатом существования квазиферромагнитных областей.

Поэтому в настоящей работе (в продолжение ранее проведенных исследований [11]) предпринята попытка определить вклад каждого из перечисленных механизмов МЭ в Ве посредством изучения его упругих,

неупругих характеристик и отношения скоростей движения дислокаций в магнитном поле *in situ* и без него.

1. Образцы и методика эксперимента

В работе исследовались поликристаллы магнийтермического конденсата (МТК) Ве (99.95% Ве), полученные в результате конденсации из паровой фазы на подогреваемые до 700°C подложки. Образцы обрабатывались слабым постоянным магнитным полем ($B \sim 0.03$ Т) „*in situ*“. Химический состав образцов, а также методики их изготовления, измерения упругих и неупругих свойств и обработки магнитным полем детально описаны в работах [10,11]. Исследовались амплитудные и температурные зависимости эффективного модуля сдвига (G_{ef}), пропорционального квадрату частоты собственных крутильных колебаний образца f^2 , низкочастотного внутреннего трения (НЧВТ) и отношение скоростей движения дислокаций V_{MF}/V_0 в магнитном поле и без него.

Для расчета отношения скоростей движения дислокаций V_{MF}/V_0 была использована методика, предложенная в [11], согласно которой

$$\frac{V_{MF}}{V_0} = \frac{\left(\frac{f^2 - f_0^2}{f_0^2}\right)_{MF}}{\left(\frac{f^2 - f_0^2}{f_0^2}\right)_0}, \quad (1)$$

где V_{MF} — скорость движения дислокаций в кристалле в МП *in situ*, V_0 — скорость движения дислокаций в кристалле без МП, f и f_0 — текущая и начальная частота собственных крутильных колебаний образца соответственно.

Прирост энергии активации движения дислокаций в МП определялся из температурной зависимости V_{MF}/V_0 в предположении, что она имеет экспоненциальный характер [12,13]:

$$\frac{V_{MF}(T)}{V_0(T)} \propto \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (2)$$

где $V_{MF}(T)$ и $V_0(T)$ — скорости движения дислокаций при температуре T в МП и без него, соответственно, ΔE — изменение энергии активации движения дислокаций под воздействием МП.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1 представлены температурные зависимости G_{ef} , НЧВТ и V_{MF}/V_0 при нагревании. Отметим нелинейное изменение эффективного модуля упругости с температурой как в МП, так и без него, что является аномальным, поскольку температура Дебая для бериллия составляет $\sim 1000^\circ\text{C}$ [14] и явления, связанные с

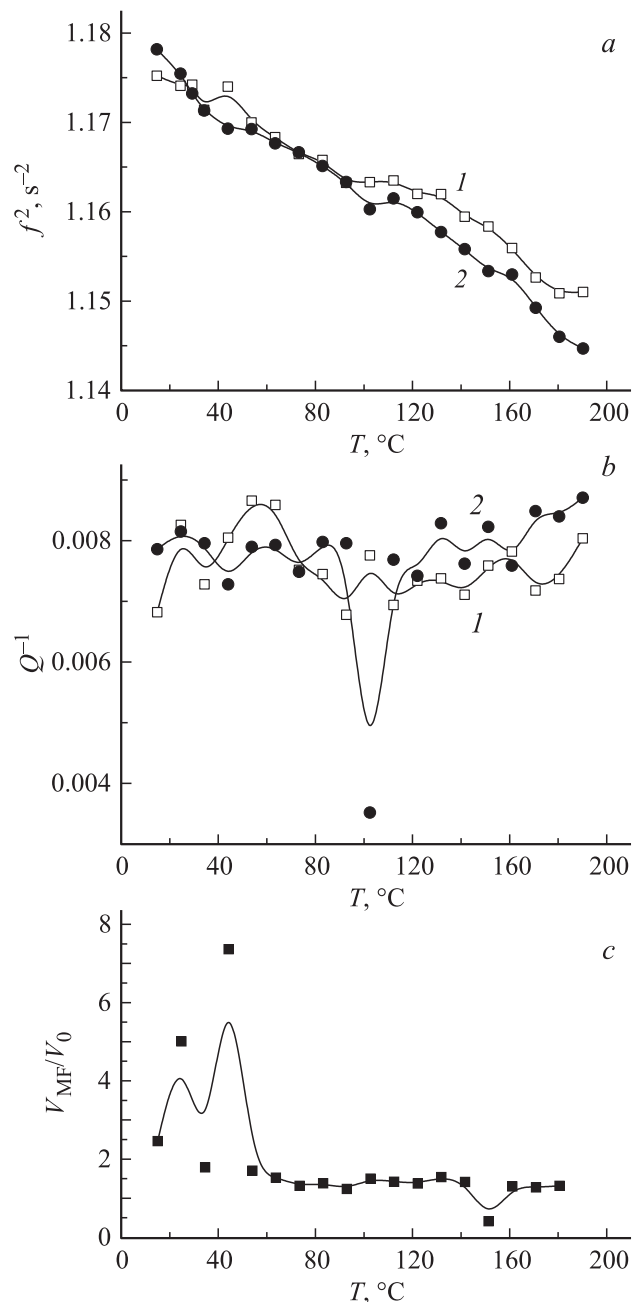


Рис. 1. Температурные зависимости f^2 (a), внутреннего трения Q^{-1} (b) и величины V_{MF}/V_0 (c) при нагревании в МТК Ве до действия МП (1) и во время действия МП *in situ* (2).

ангармонизмом в исследуемом нами интервале температур, маловероятны. Такое поведение $G_{ef}(T)$ может быть объяснено тем, что в исследуемом интервале температур в Ве имеет место ряд структурных превращений [15].

Как следует из рис. 1, а, влияние магнитного поля на эффективный модуль сдвига начинается не сразу, а выше определенной температуры ($\sim 90^\circ\text{C}$). Это может быть связано с изменением структурно-фазового состояния Ве, переходящего при достижении этой температуры в магниточувствительное состояние. При этом

наблюдается уменьшение эффективного модуля упругости на $\sim 0.2\%$, то есть прямой МПЭ. До температуры $\sim 90^\circ\text{C}$ зависимости $Q^{-1}(T)$ не реагируют на присутствие МП (графики практически совпадают), а выше 90°C поглощение упругой энергии в МП происходит интенсивнее, чем без МП, что также характерно для прямого МПЭ (рис. 1, *a, b*).

На рис. 1, *c* представлена температурная зависимость отношения скоростей движения дислокаций V_{MF}/V_0 при нагревании. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о различном влиянии МП на подвижность дислокаций в Ве в разных интервалах температур. Так, до температуры 60°C совместное действие постоянного МП и нарастающей температуры приводит к резкому изменению подвижности дислокаций в 5–7 раз (по сравнению с их подвижностью без МП). Выше 60°C отношение скоростей движения дислокаций стабилизируется на уровне ~ 1.4 . Такая зависимость V_{MF}/V_0 достаточно четко коррелирует с поведением неупругих характеристик и упругих свойств в указанном интервале температур и может свидетельствовать об изменении механизма движения дислокаций на вязкий [16].

Изменение энергии активации движения дислокаций ΔE в МП в Ве, согласно с (2), оказалось равным 0.039 eV , что по порядку величины соответствует полной энергии связи вакансий с краевыми дислокациями [17].

Изучая поведение температурных зависимостей всех исследуемых характеристик при охлаждении, мы зафиксировали инверсию знака МПЭ в магнийтермическом Ве в интервале $170\text{--}30^\circ\text{C}$ с „положительного“ на „отрицательный“. Действительно, кривая $f^2(T)$ в МП проходила выше аналогичной кривой без МП (обратный МПЭ) (рис. 2, *a*). Особо отметим тот факт, что инверсия знака МПЭ сопровождалась инверсией знака V_{MF}/V_0 при температуре $\sim 150^\circ\text{C}$, а также тремя четкими максимумами на кривой $V_{MF}/V_0(T)$ при температурах $\sim 140^\circ\text{C}$, $\sim 90^\circ\text{C}$ и $\sim 50^\circ\text{C}$ (рис. 2, *c*). Отметим также своеобразную корреляцию их температурного положения с поведением кривых $Q^{-1}(T)$ (рис. 2, *b*): при температурах максимумов V_{MF}/V_0 внутреннее трение стабилизировалось, а там, где относительная скорость движения дислокаций практически не изменялась, наблюдалась значительная дестабилизация внутреннего трения. Такое поведение исследуемых характеристик является аномальным и позволяет предполагать, что при одновременном воздействии постоянного МП и уменьшающейся температуры в бериллиевом конденсате на различных структурных уровнях протекают процессы самоорганизации дефектов [18].

Проанализируем подробнее поведение ВТ при охлаждении. До воздействия МП внутреннее трение было стабильно до температуры $\sim 60^\circ\text{C}$, ниже которой зафиксировано возрастание его уровня приблизительно в 1.6 раза, что свидетельствует об увеличении подвижности дефектов, отвечающих за поглощение упругой энергии. При воздействии МП in situ ВТ оставалось

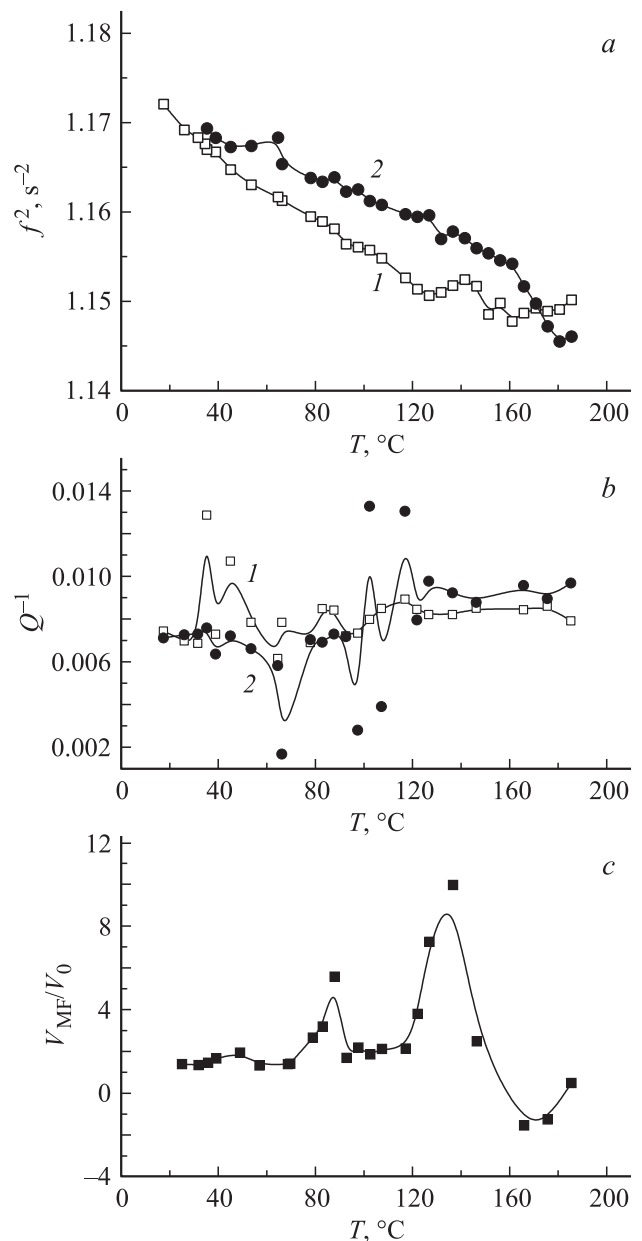


Рис. 2. Температурные зависимости f^2 (*a*) внутреннего трения Q^{-1} (*b*) и величины V_{MF}/V_0 (*c*) при охлаждении в МТК Ве до действия МП (1) и во время действия МП in situ (2).

стабильным на уровне 0.008 относительных единиц трения лишь в интервалах $180\text{--}120^\circ\text{C}$ и $50\text{--}20^\circ\text{C}$. Вне этих интервалов нестабильность уровня поглощения упругой энергии в МП достигала $\pm 65\%$. Следовательно, слабое МП при охлаждении стимулировало процессы дестабилизации структуры уже при 120°C , а не при $\sim 60^\circ\text{C}$, как это имело место до воздействия магнитного поля, т.е. ускоряло структурно-фазовые превращения при охлаждении.

Исходя из вышеизложенного, можно предположить, что при одновременном воздействии магнитного поля и

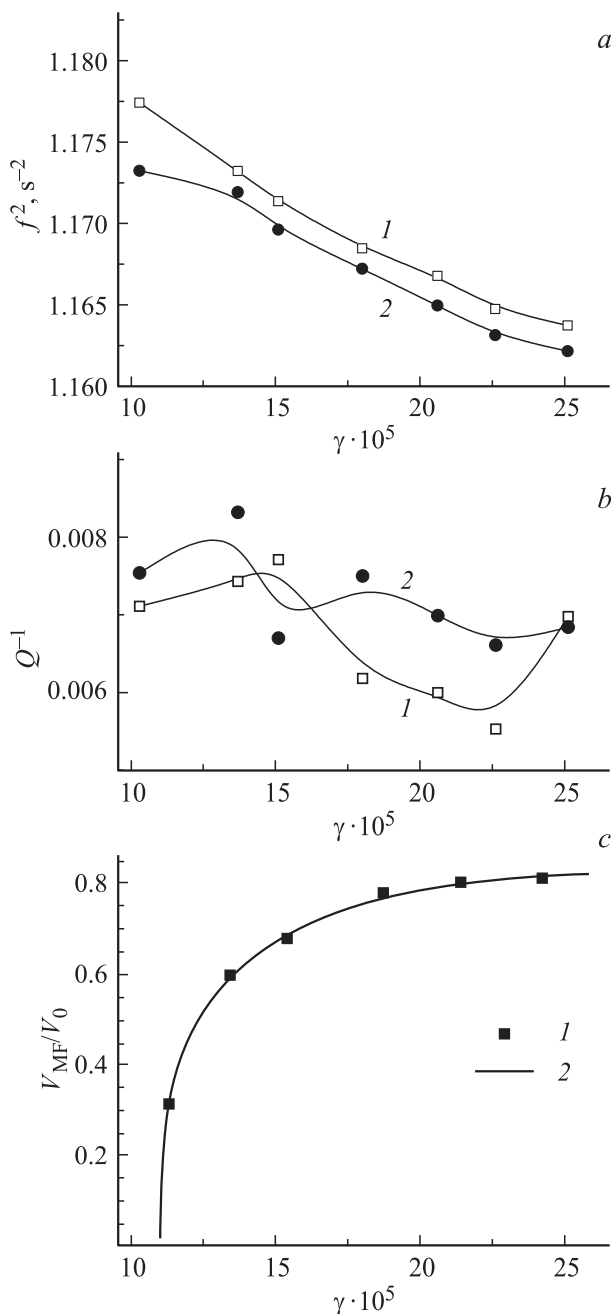


Рис. 3. Амплитудные зависимости f^2 (a), внутреннего трения Q^{-1} (b), отношения скоростей движения дислокаций V_{MF}/V_0 (c) при увеличении амплитуды относительной деформации γ в МТК Ве до действия МП (1) и во время действия МП in situ (2). На рис. 3, c: 1 — значения отношения скоростей, рассчитанные из экспериментальных данных по формуле (1), 2 — аналитическая кривая, построенная по формуле (3).

температуры в МТК Ве могут проявляться два механизма МПЭ: механизм спин-зависимых реакций и механизм воздействия МП на структурно-фазовые превращения, причем разделить эти вклады в Ве чрезвычайно сложно. Напомним, что в исследуемом интервале температур в бериллиевом конденсате наблюдаются структурно-

фазовые превращения мартенситного типа [15], протекающие путем перемещения по кристаллу дислокаций превращения [19]. Следовательно, облегчение движения одних дислокаций превращения под воздействием МП или затруднение движения других дислокаций превращения будет либо способствовать протеканию структурных ФП, либо блокировать их.

Общеизвестно, что инициировать движение дислокаций превращения можно не только при помощи температуры, но и полем механических напряжений. Поэтому были исследованы амплитудные зависимости упругих и неупругих свойств, а также отношения V_{MF}/V_0 .

Амплитудные зависимости f^2 , НЧВТ и отношения скоростей движения дислокаций в конденсате бериллия при комнатной температуре при увеличении амплитуды деформации γ приведены на рис. 3, а при ее уменьшении — на рис. 4. Как видим, постоянное магнитное поле in situ ведет к разупрочнению бериллия (G_{ef} уменьшается в среднем на 0.2%, а НЧВТ увеличивается на 16%), что является признаком прямого МПЭ [20] (рис. 3, a, b и 4, a, b). При этом вполне логично ожидать, что скорость движения дислокаций в МП будет больше, а, следовательно, и отношение скоростей V_{MF}/V_0 будет превышать единицу. Однако оценки показывают, что оно существенно меньше единицы и только при $\gamma > 1.5 \cdot 10^{-4}$ начинает приближаться к насыщению при $V_{MF}/V_0 = 0.8$ (рис. 3, c). В то же время, при уменьшении γ отношение $V_{MF}/V_0 \geq 1$ во всем исследованном интервале амплитуд деформаций (рис. 4, c).

Проанализируем полученные зависимости. Данные рис. 3, c свидетельствуют о том, что амплитудную зависимость $V_{MF}/V_0(\gamma)$ при увеличении γ с высокой точностью можно описать при помощи эмпирического соотношения

$$\frac{V_{MF}(\gamma)}{V_0(\gamma)} = 7.6 \cdot \gamma_0 \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^n \cdot \ln\left(\frac{\gamma}{\gamma_{max}}\right) \quad (3)$$

где $V_{MF}(\gamma)$, $V_0(\gamma)$ — скорости движения дислокаций в кристалле в МП и без него; γ — амплитуда относительной деформации; γ_{max} — амплитуда относительной деформации, при которой $\frac{V_{MF}(\gamma)}{V_0(\gamma)}$ стремится к насыщению; γ_0 — начальная амплитуда относительной деформации кручением, $n = 1/3$.

Попытаемся восстановить процессы, протекающие в Ве при комнатной температуре в постоянном магнитном и нарастающем поле механических напряжений, путем анализа вида зависимости $V_{MF}/V_0(\gamma)$. Для этого примем во внимание, что однотипные процессы, как правило, описываются сходными математическими выражениями. Например, законы переноса (Фика, Фурье и Ньютона), в которых присутствие градиента концентрации, температуры и скорости движения атомов свидетельствует об общности процессов переноса массы, энергии и импульса при их (атомов) хаотическом движении. Предположим, что сходные процессы движения дислокаций

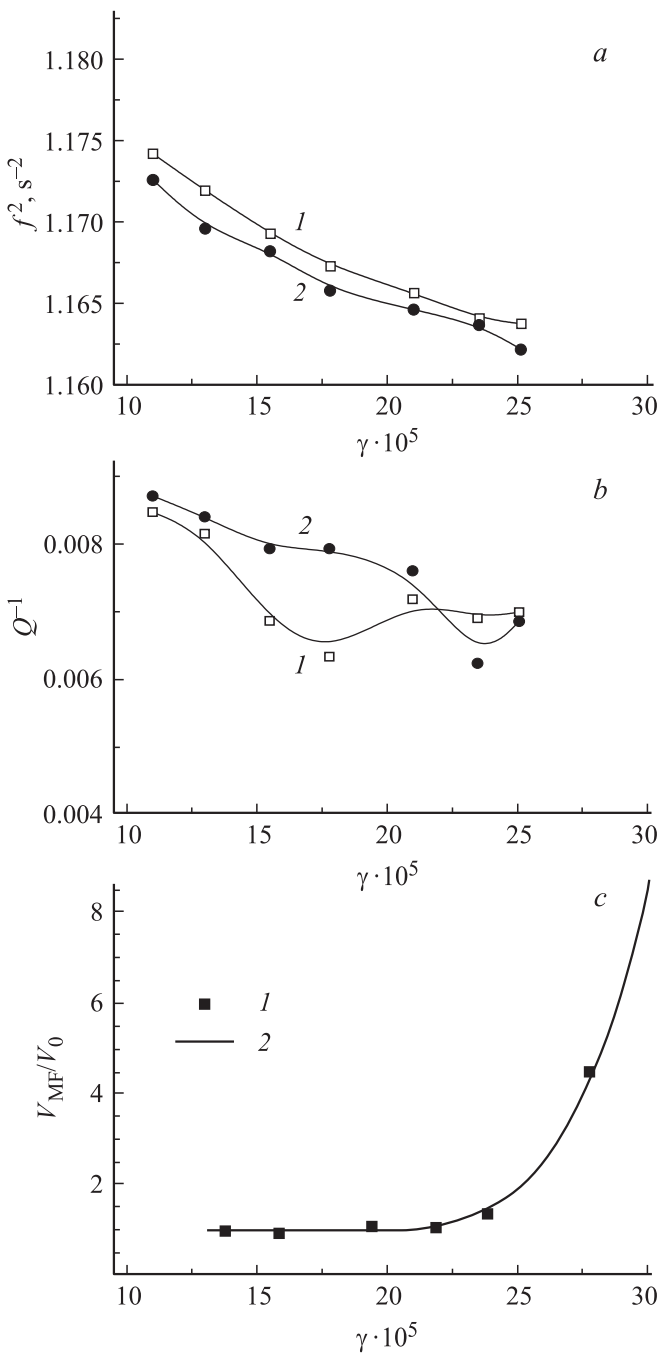


Рис. 4. Амплитудные зависимости f^2 (a), внутреннего трения Q^{-1} (b), отношения скоростей движения дислокаций V_{MF}/V_0 (c) при уменьшении амплитуды относительной деформации γ в МПК Ве до действия МП (1) и во время действия МП in situ (2). На рис. 4, c: 1 — значения отношения скоростей, рассчитанные из экспериментальных данных по формуле (1), 2 — аналитическая кривая, построенная по формуле (5).

также могут описываться подобными математическими выражениями, и попытаемся восстановить механизм движения дислокаций в Ве в МП, исходя из соотношения (3) и достижений современной теории динамики дислокаций.

Так, в [21] скорость неконсервативного движения дислокаций в кристалле, пересыщенном неравновесными точечными дефектами (вакансиями или межузельными атомами), описывается выражением вида

$$V \approx \frac{\pi V_0}{4} \left(1 - \frac{c}{c_0}\right)^n \ln\left(\frac{b}{R}\right), \quad (4)$$

где V , V_0 — скорость и начальная скорость движения дислокации; c , c_0 — неравновесная и равновесная концентрации вакансий (межузельных атомов), соответственно; R — расстояние между дислокациями, а $b \approx 10^{-4}R$ — вектор трансляции решетки, $n = 1$.

Как видим, формулы (3) и (4) имеют однотипный характер и с точностью до постоянного множителя и величины показателя степени совпадают между собой. (Возможно, это отличие связано с особенностями влияния магнитного поля на характер движения дислокаций в Ве.)

Попробуем, вслед за авторами [21], рассмотреть процесс возможного движения дислокаций в Ве. Переползание дислокаций, описанное в работе [21], происходит под действием так называемой осмотической силы, возникающей в результате пересыщения кристалла неравновесными дефектами. „Пересыщение или обеднение вакансиями или междоузлиями вызывает переползание дислокаций. ... Рассмотрим дислокацию, лежащую вдоль оси цилиндра (радиусом R , примечание авторов) и предположим, что в отсутствие внешних напряжений на поверхности цилиндра устанавливается концентрация вакансий $c \neq c_0$ “. „При $c > c_0$ на дислокацию начинает действовать сила, способствующая переползанию дислокаций“ [21, с. 418]. В нашем случае роль подобной силы может играть движущая сила превращения мартенситного типа [19]. Предположим, что под действием механического напряжения атомы Ве переходят из одного структурного состояния, стабильного при комнатной температуре без механического поля (назовем это состояние „низкотемпературной“ фазой), в другое состояние, стабильное при этой же температуре при наложении внешнего поля механических напряжений — „высокотемпературная“ фаза. Такое предположение кажется нам вполне правомерным, поскольку общеизвестно, что фазовые превращения мартенситного типа могут инициироваться не только температурой, но и механическим напряжением, приводящим в движение дислокации превращения [19].

Рассмотрим дислокацию, посредством движения которой атомы переходят из „низкотемпературной“ в „высокотемпературную“ фазу. Предположим, что она лежит вдоль оси цилиндра, радиусом $R \sim \gamma_{max}$. Предположим также, что при наложении внешних напряжений концентрации атомов „низкотемпературной“ фазы c_0 на поверхности цилиндра и „высокотемпературной“ c -фазы на его оси начинают различаться. При этом очевидно, что количество атомов в новой фазе будет пропорционально величине механического напряжения, а, следовательно, и деформации γ . Следует также отметить,

что в самом начале, когда движущая сила превращения максимальна, то и скорость движения дислокаций V_0 также максимальна. При увеличении γ на начальной стадии все дислокации превращения „поглощают“ атомы в исходном структурном состоянии и переводят их в новое состояние. При этом могут также генерироваться новые дислокации. В дальнейшем, по мере превращения, только часть дислокаций продолжает „поглощать“ нестабильные атомы. Скорость движения дислокаций постепенно стабилизируется, что и наблюдается в эксперименте. Следовательно, при наложении на образец Ве нарастающего внешнего поля механических напряжений в нем происходит переползание прямолинейных дислокаций превращения. При этом дополнительное действие постоянного МП, по-видимому, отражается на характере перераспределения „стабильных“ и „нестабильных“ атомов в окрестности дислокации превращения и изменения показателя степени с $n = 1$ на $n = 1/3$.

Амплитудная зависимость относительной скорости движения дислокаций при уменьшении амплитуды относительной деформации (см. рис. 4, *с*), может быть аппроксимирована эмпирической функцией вида

$$\frac{V_{MF}(\gamma)}{V_0(\gamma)} = 1 + \left(\frac{1.5 \cdot (\gamma - \gamma_0)}{\gamma_0} \right)^5 \times \exp \left[(\gamma - \gamma_0) \cdot \exp \left(-\frac{\gamma_0}{\gamma - \gamma_0} \right) \right] \quad (5)$$

которая, с точностью до показателя степени во втором слагаемом, напоминает формулу, предложенную Б.Я. Любовым [22] для описания числа мест, благоприятных для образования зародышей новой фазы при гетерогенном зарождении. Такое совпадение до некоторой степени подтверждает наше предположение о связи рассматриваемых нами процессов в Ве с движением дислокаций превращения. Если предположить, что с уменьшением внешнего механического напряжения объем новой фазы уменьшается пропорционально γ , то такое совпадение действительно будет неслучайным.

Все указанное выше позволяет нам предположить, что поведение упругих, неупругих характеристик и отношения скоростей движения дислокаций в МТК Ве можно объяснить тем, что магнитное поле стимулирует структурно-фазовые превращения как при постоянной, так и при изменяющейся температуре. Этот процесс может происходить как за счет открепления дислокаций от точечных препятствий под действием МП в результате спин-зависимых переходов в системе „дислокационный стопор — ядро дислокации“ с последующим движением дислокации в поле дальнедействующих внутренних напряжений в кристалле $V_{MF}/V_0 \geq 1$, так и за счет переползания дислокаций превращения при $V_{MF}/V_0 < 1$.

Однако конкретные микромеханизмы такого воздействия требуют дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

3. Выводы

— При одновременном действии постоянных магнитного и механического полей и переменной температуры в МТК Ве в интервале температур $18 \leq T \leq 190^\circ\text{C}$ наблюдается инверсия знака магнитоэластического эффекта с „положительного“ при нагревании на „отрицательный“ при охлаждении.

— Инверсия знака МПЭ сопровождается инверсией знака отношения скоростей движения дислокаций в магнитном поле и без него, а также осцилляциями на температурной зависимости $V_{MF}/V_0(T)$.

— Магнитоэластический эффект в МТК Ве обусловлен как спин-зависимыми реакциями, так и влиянием МП на характер движения дислокаций превращения (скольжение или переползание).

Список литературы

- [1] Ю.И. Головин. ФТТ **46**, 769 (2004).
- [2] Р.Б. Моргунов. УФН **174**, 131 (2004).
- [3] Б.И. Смирнов, В.В. Шпейзман, Н.Н. Песчанская, Р.К. Николаев. ФТТ **44**, 1915 (2002).
- [4] Ю.В. Осинская, С.С. Петров, А.В. Покоев, А.А. Раджабов, В.В. Рунов. ФТТ **54**, 531 (2012).
- [5] Ю.В. Осинская, С.С. Петров, А.В. Покоев, В.В. Рунов. ФТТ **52**, 486 (2010).
- [6] С.В. Адашкевич, Н.М. Лапчук, В.Ф. Стельмах, Г.Г. Федорук, Е.Н. Шумская. Письма в ЖЭТФ **84**, 642 (2006).
- [7] Г.В. Семенова, Т.П. Сушкова. Дефектные структуры и физические свойства кристаллов. ВГУ, Воронеж. (2007). С. 47.
- [8] Р.Б. Моргунов. ФТТ **53**, 733 (2011).
- [9] А.А. Скворцов, А.М. Орлов, А.А. Соловьев, Д.И. Белов. ФТТ **51**, 2304 (2009).
- [10] Е.И. Курек, А.В. Олейнич-Лысюк, Н.Д. Раранский. Письма в ЖТФ **37**, 24, 1 (2011).
- [11] А.В. Олейнич-Лысюк, Н.Д. Раранский. ФТТ **54**, 417 (2012).
- [12] В.А. Макара, Л.П. Стебленко, Н.Я. Горидько, В.М. Кравченко, А.Н. Коломиец. ФТТ **43**, 462 (2001).
- [13] В.В. Кведер, Ю.А. Осипьян, А.И. Шалыкин. ЖЭТФ **85**, 2 (8), 699 (1982).
- [14] И.И. Папилов, Г.Ф. Тихинский. Физическое металловедение бериллия. Атомиздат, М. (1968). 451 с.
- [15] А.В. Олейнич-Лысюк, М.Д. Раранский. Металлофизика и нов. технол. **28**, 1661 (2006).
- [16] В.И. Альшиц, В.Л. Инденбом. в сб.: Динамика дислокаций / Под ред. В.И. Старцева. Наук. думка, Киев (1975). С. 234.
- [17] И.И. Новиков. Дефекты кристаллического строения металлов. Металлургия, М. (1975). С. 137.
- [18] В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, В.Е. Егорушкин. Изв. РАН. МТТ. **4**, 8 (2010).
- [19] Б.И. Николин. Многослойные структуры и политипизм в металлических сплавах. Наук. думка, Киев (1984). 240 с.
- [20] Н.А. Тяпунина, В.Л. Красников, Э.П. Белозерова. ФТТ **41**, 1035 (1999).
- [21] Дж. Хирт, И. Лоте. Теория дислокаций. Атомиздат. М. (1972). 600 с.
- [22] В.Б. Брик. Диффузия и фазовые превращения в металлах и сплавах. Наук. думка, Киев (1985). С. 105.