

05

Инверсия упругих характеристик бериллиевого конденсата под воздействием слабого магнитного поля

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

Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича,
Черновцы, Украина
E-mail: a_oliynich@ukr.net,
a.oliynich@bigmir.net

Поступило в Редакцию 14 июня 2011 г.

Изучалось влияние слабого ($\sim 10^{-3} - 10^{-2}$ Т) магнитного поля на упругие и неупругие характеристики диамагнитного бериллиевого конденсата. Показано, что влияние поля наиболее ярко проявляется в магнитном последствии, которое приводит к инверсии амплитудных и температурных зависимостей эффективного модуля сдвига при практически неизменном уровне поглощения упругой энергии.

Сильная нестабильность (лабильность) материалов в районе структурных фазовых превращений является благоприятной предпосылкой для эффективного влияния на них слабыми внешними силовыми полями (магнитными, электрическими, механическими и т. п.). Этим, например, успешно пользуются при управлении с помощью магнитного поля (МП) термоупругими мартенситными превращениями в сплавах Гейслера [1], фазовым составом и твердостью в сплавах Ni–Ti [2], структурными превращениями в твердых и расплавленных полимерах [3] и т. п. Однако если в сплавах Гейслера и слабомагнитных сплавах Ni–Ti управление

их структурой при помощи МП является как бы оправданным и понятным, по крайней мере в общих чертах, то механизмы влияния МП на протекание структурных фазовых превращений в немагнитных материалах все еще далеки от понимания и изучены крайне слабо.

В данной работе мы исследовали влияние слабого постоянного МП на упругие и неупругие характеристики бериллиевого конденсата в области аномальных структурно-фазовых превращений с целью изучения возможности влияния МП на характер протекания фазовых переходов в этом материале.

Напомним, что бериллий — диамагнетик (магнитная восприимчивость при температурах порядка комнатных $\chi = -1 \cdot 10^{-9}$), и в интервале 20–400°C в нем протекают структурно-фазовые превращения мартенситного типа [4]. Исходя из современных представлений, некоторые структурные превращения, например термоупругие мартенситные превращения [5], можно рассматривать как особый случай пластической деформации, осуществляемой перемещением по кристаллу специального типа дислокаций — дислокаций превращения. Движение таких дислокаций в кристалле вызывает переход его локальных объемов из одного фазового состояния в другое. Структуры, которые возникают в результате движения сильно расщепленных дислокаций превращения, находятся в материалах в метастабильном состоянии [6]. А это означает, что в таких кристаллах в процессе превращения создаются благоприятные предпосылки для управления дислокациями превращения при помощи слабых МП [3].

В настоящем исследовании изучали низкочастотное ($\sim 1\text{s}^{-1}$) внутреннее трение (НЧВТ) и поведение эффективного модуля сдвига (G_{ef}) в магнийтермическом бериллиевом конденсате (МТК Ве), содержащем 99.95% Ве до, во время и после воздействия слабого магнитного поля (СМП). Магнийтермический конденсат — это материал, который получают из паровой фазы путем конденсации Ве, восстановленного магнием, на подложки с температурой 500–600°C. Поликристаллические образцы для исследований вырезали из пластин конденсата в виде параллелепипедов $1.1 \times 1.1 \times 100$ mm с последующим растворением деформированного слоя. Средний размер зерна составлял $\sim 50 \mu\text{m}$. По данным химического анализа состав основных примесей был в пределах (mass.%): О (0.006), С (0.004), Fe (0.009), Si (0.003), Al (0.003–0.015), Mg (0.003), Mn (0.003), Ni(0.003–0.009).

Измерения НЧВТ и G_{ef} проводили на полуавтоматическом вакуумном релаксметре типа обратный крутильный маятник в синхронном режиме по известной методике [4]. Постоянные магнитные поля с индукцией $B \sim 0.005\text{--}0.04\text{ Т}$ создавали при помощи соленоида.

С целью исключения втягивания держателей-захватов образцов в МП их изготовляли из немагнитных сортов сталей. Во избежание фиксирования нежелательных индукционных эффектов в моменты включения и выключения МП измерения проводили по прошествии определенного времени (как правило, около 10 min) после включения поля и заканчивали за 10 min до его выключения.

Все исследования велись в вакууме 10^{-3} Па в интервале температур $20\text{--}300^\circ\text{С}$ и относительных деформаций кручением $\gamma \sim 1\text{--}3 \cdot 10^{-4}$. Внутреннее трение измеряли с относительной погрешностью не более 1%, а эффективный модуль сдвига G_{ef} , пропорциональный, как известно, квадрату собственных крутильных колебаний f^2 образца, — не более 0.1%.

Исследования влияния магнитного поля на упругие и неупругие характеристики МТК Ве проводили двумя способами: в условиях одновременного воздействия постоянного магнитного и переменного механического полей при комнатной температуре (T_{room}), а также при совместном действии постоянного магнитного, постоянного механического и переменного температурного полей.

Результаты исследований, проведенных первым способом, представлены на рис. 1. Амплитудные зависимости НЧВТ и G_{ef} измеряли при комнатной температуре при увеличении и уменьшении степени относительной деформации кручением γ после дестабилизирующего термоциклирования до 110°С .

Как видно из рис. 1, измерения в магнитном поле *in situ* позволили зафиксировать размягчение эффективного модуля сдвига (на 0.26% в МП индукцией $B = 0.03\text{ Т}$), которое сопровождалось соответствующим увеличением уровня ВТ, — так называемый прямой магнитоэластический эффект [3]. При этом наблюдали прямой гистерезис кривых $G_{ef}(\gamma)$: понижение степени деформации приводило к дополнительному разупрочнению материала еще на 0.19% (рис. 1, *b*). После выключения магнитного поля исходные значения G_{ef} и гистерезис кривых $G_{ef}(\gamma)$ полностью восстанавливались на предыдущем уровне — магнитоэластический эффект в Ве конденсате в этом структурном состоянии оказался обратимым. Однако по истечении определенного

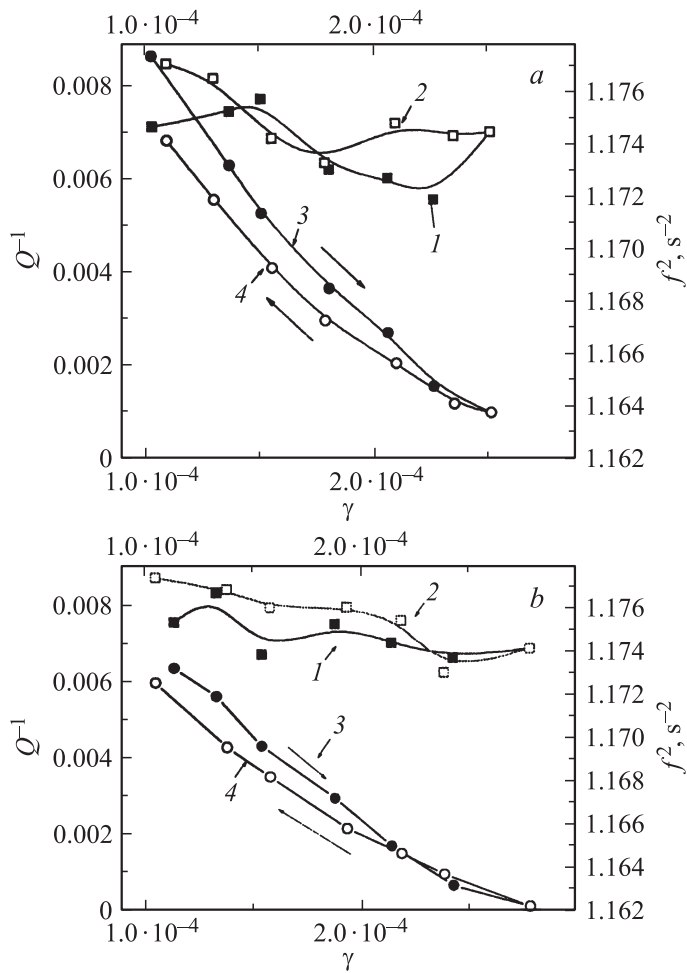


Рис. 1. Амплитудные зависимости НЧВТ (1, 2) и f^2 (3, 4) до воздействия МП (a), в МП ($B = 0.03$ T) in situ (b) и через 96 h после воздействия МП (c).

времени гистерезис кривых $G_{ef}(\gamma)$ становился инверсным (рис. 1, c): зависимости $G_{ef}(\gamma)$, измеренные при уменьшении γ , проходили выше зависимостей, полученных при увеличении деформации. Следовательно,

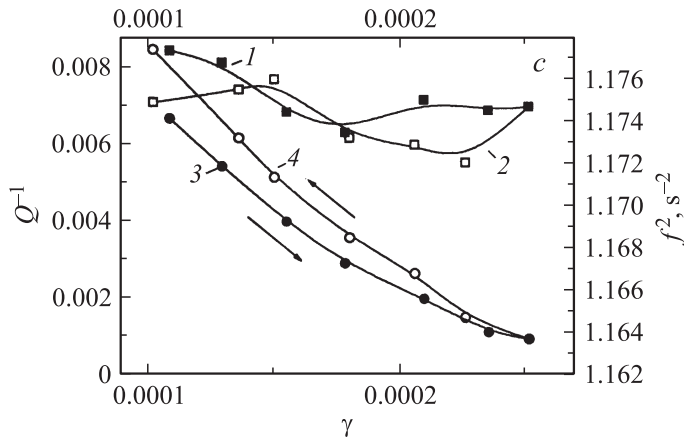


Рис. 1 (продолжение).

уменьшение уровня деформации образцов, обработанных магнитным полем и состаренных в течение ~ 100 h при комнатных температурах в отсутствие МП, приводило не к размягчению, как до воздействия МП, а к обратимому упрочнению МТК Ве. Мы воспользовались термином „обратимое упрочнение“, чтобы подчеркнуть тот факт, что образцы становились более прочными только при уменьшении степени деформации; при повторном увеличении γ значения модуля упругости оставались такими, какими они были до инверсии.

Мы наблюдали также „температурную инверсию“ эффективного модуля G_{ef} МТК Ве, индуцированную слабым магнитным полем, после обработки образцов вторым способом (рис. 2, c). Действительно, до воздействия МП поведение $G_{ef}(T)$ в интервале $20-200^\circ\text{C}$ характеризовалось обратимым замкнутым прямым гистерезисом упругого модуля, присущим фазовым превращениям первого рода: кривые $G_{ef}(T)$ при нагревании проходили выше кривых охлаждения (рис. 2, a). Совместное действие магнитного, механического полей и температуры стимулировало сужение петли и размыкание гистерезиса при температурах порядка комнатных (рис. 2, b). Выключение магнитного поля полностью восстанавливало исходные свойства конденсата. Однако по истечении некоторого времени при измерении упругих и неупругих характеристик

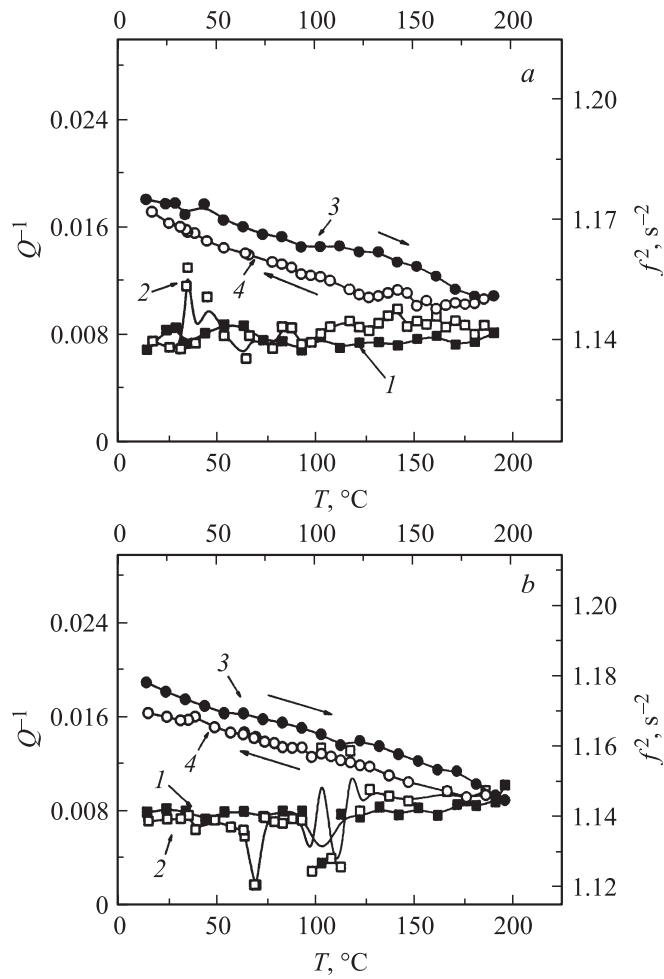


Рис. 2. Температурные зависимости НЧВТ (1,2) и f^2 (3,4) до воздействия МП (а), в МП ($B = 0.03$ Т) in situ (b) и через 360 h после воздействия МП (с).

обработанного магнитным полем МТК Ве зафиксировали температурную инверсию эффективного модуля сдвига при практически неизменном поведении внутреннего трения: при понижении температуры

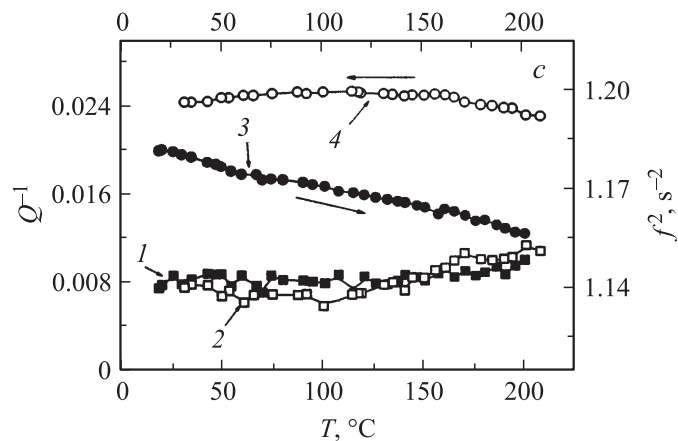


Рис. 2 (продолжение).

модуль упругости при 200°C вырос на 3.1% и кривые охлаждения стали проходить выше кривых нагревания (рис. 2, *c*). Причем температурная инверсия эффективного модуля G_{ef} также оказалась обратимой. Отметим, что авторы [7], исследовавшие гистерезисное поведение скорости продольных звуковых волн в области несоответствующей фазы кристалла LiKSO_4 , обнаружили, что охлаждение кристалла, перешедшего в несоответствующую фазу, приводит к возникновению аналогичного гистерезиса скорости звука в y -направлении гексагонального монокристалла. При охлаждении скорость звука оказывалась выше, чем при нагревании, причем петля гистерезиса, как и в нашем случае, была замкнута. Если учесть, что скорость распространения звука в кристалле пропорциональна соответствующим упругим модулям, можно предположить, что в нашем случае под воздействием МП структурно-фазовое превращение в МТК Be „пошло“ по пути создания несоответствующей фазы. Общеизвестно, что несоответствующие фазы — это метастабильные образования. Метастабильной оказалась и инверсия модуля G_{ef} , поскольку в отсутствие магнитного поля по истечении определенного времени площадь петли обратного гистерезиса стала постепенно уменьшаться. Так, через 528 h после последнего воздействия СМП несовпадение $\Delta G_{ef}(200^\circ\text{C})$ ($\Delta G_{ef}(200^\circ\text{C}) = (G_{ef})_{heat} - (G_{ef})_{cool}$ при 200°C) уменьшилось с 3.1 до

0.84%. При этом уровень внутреннего трения оставался неизменным и практически не „реагировал“ на изменение упругих характеристик конденсата. На первый взгляд создается впечатление, что за поведение НЧВТ и эффективного модуля сдвига отвечают две различные подсистемы дефектов, которые по-разному реагируют на внешние воздействия. Однако отсутствие корреляции в поведении низкочастотного внутреннего трения и эффективного модуля G_{ef} явление нетривиальное и требует более глубокого изучения.

Работа выполнена при поддержке МОН Украины в рамках проекта 0110U000185.

Список литературы

- [1] Коуров Н.И., Пушин В.Г., Королев А.В., Марченков В.В., Марченкова Е.Б., Казанцев В.А., Weber Н.В. // ФТТ. 2011. Т. 53. В. 1. С. 89.
- [2] Бродовой А.В., Бунчук С.Г., Лукьянов А.Н. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 4. С. 8.
- [3] Головин Ю.И. // ФТТ. 2004. Т. 46. В. 5. С. 769.
- [4] Олейнич-Лысюк А.В., Раранский М.Д. // Металлофиз. новейшие технол. 2006. Т. 28. С. 1661.
- [5] Николин Б.И. Многослойные структуры и политипизм в металлических сплавах. Киев.: Наук. думка, 1984. 240 с.
- [6] Кулагина В.В. // Изв. вузов. Физика. 2001. № 2. С. 30.
- [7] Борисов Б.Ф., Краевский Т., Раджабов А.К., Чарная Е.В. // ФТТ. 1993. Т. 35. В. 1. С. 241.