

## Влияние степени нестабильности системы на осциллирующий характер временных зависимостей внутреннего трения

© А.В. Олейнич-Лысюк

Черновицкий национальный университет,  
58012 Черновцы, Украина

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 13 ноября 2001 г.)

Исследованы особенности формирования осцилляций на временных зависимостях внутреннего трения поликристаллического Ве, облученного электронами высоких энергий и состаренного при  $T = 300\text{ K}$  в течение разных промежутков времени. Показано, что старение приводит к постепенному уменьшению амплитуды и периода осцилляций. Высказано предположение о синергетическом характере наблюдаемого явления.

В последнее время особенный интерес исследователей вызывают системы, в которых неупорядоченное, хаотическое, движение их элементов под действием внешних возмущений переходит в упорядоченное. Такой переход происходит в результате самоорганизации неравновесных структур. В химии это реакции Белоусова–Жаботинского, в гидродинамике — ячейки Бенара, в физике магнитных явлений — формирование упорядоченности магнитных доменов, в физике прочности и пластичности — формирование линий и полос скольжения, ячеистых и блочных дислокационных структур и т. д. [1]. К аналогичным явлениям следует, по-видимому, отнести и осциллирующее изменение внутреннего трения (ВТ) со временем, наблюдавшееся в некоторых системах после циклических деформаций [2,3]. Однако природа осцилляций ВТ, а также причины их возникновения так и оставались невыясненными. Поэтому целью настоящей работы стало изучение влияния степени нестабильности системы на характер проявления осцилляций ВТ.

В качестве объекта исследований был выбран бериллий марки МТБК-1.5, облученный электронами высоких ( $\sim 18\text{ MeV}$ ) энергий и состаренный в течение разных периодов времени на воздухе при комнатной температуре, поскольку экспериментально установлено, что облучение электронами высоких энергий приводит к появлению хорошо выраженных осцилляций на временных зависимостях ВТ (ВЗВТ) [4]. При изготовлении образцов для исследований использовались пластины, полученные конденсацией бериллия из паровой фазы на подложки с температурой  $500\text{--}600^\circ\text{C}$ . Образцы в виде параллелепипедов размером  $1 \times 1 \times 80\text{ mm}$  вырезались из этих пластин электроэрозионным способом с последующим удалением деформированного слоя.

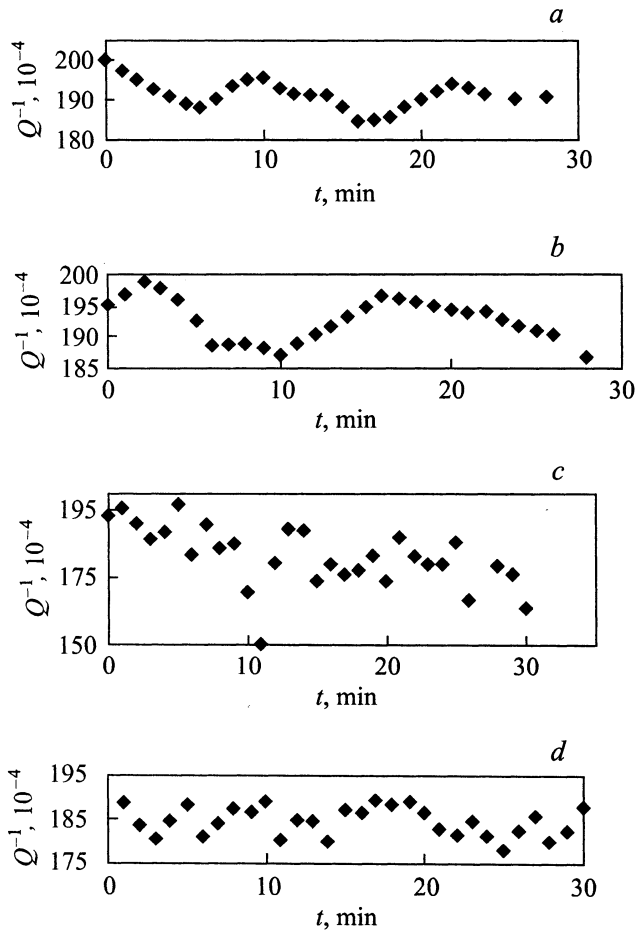
По данным химического анализа содержание примесей в конденсате было в пределах (mass.%): 0.009–0.05 Fe, 0.003–0.14 Al, 0.0037–0.04 C; 0.06–0.15 O, 0.003–0.042 Ga; 0.01–0.017 N. Величина отношений удельного электросопротивления  $\rho_{295\text{K}}/\rho_{4.2\text{K}}$  разных образцов составила 190–220, что соответствует оценке интегральной чистоты не хуже 99.95 mass.% Ве.

Структура конденсата имела столбчатый характер со средним поперечным размером зерен  $40\text{--}70\text{ }\mu\text{m}$ . Длина зерен составляла  $(0.2\text{--}1)d$ , где  $d$  — толщина пластины конденсата, которая изменялась от 1.5 до 3 mm.

Измерения ВТ выполнялись на низкочастотном релаксметре типа „обратный крутильный маятник“ на частотах  $\sim 1\text{ s}^{-1}$  по известным методикам [2–4], позволяющим проводить эксперимент с точностью не хуже 1%, надежно регистрировать осциллирующие зависимости ВТ от времени. Временные зависимости измерялись при относительной деформации  $\gamma = 9 \cdot 10^{-6} \pm 1 \cdot 10^{-7}$  после „накачки“ („накачка“ — циклическая деформация образца при постоянной амплитуде относительной деформации  $\gamma_0$  в течение 5 min) и последующего резкого уменьшения деформации до указанных выше значений, а также без „накачек“ после измерения амплитудных зависимостей внутреннего трения (АЗВТ).

На рис. 1 показаны кривые ВЗВТ, полученные описанным выше способом на облученном и состаренном в течение 6 месяцев при комнатной температуре образце Ве после „накачек“ при  $\gamma_0 = 1.4 \cdot 10^{-5}$ ,  $2.5 \cdot 10^{-5}$  и  $6.6 \cdot 10^{-5}$ , а также без „накачки“ после измерения АЗВТ до  $\gamma = 6.6 \cdot 10^{-5}$ . Сравнение данных, представленных на этом рисунке, с результатами, полученными сразу после облучения образца, показывает, что 1) естественное старение образца приводит к появлению четко выраженных осцилляций с периодом 10–11 min при деформациях, которые не вызывали осцилляций в свежем облученном материале (ср. рис. 1, а настоящей работы и рис. 2, а из работы [4]); 2) значительно изменяется характер ВЗВТ при больших амплитудах „накачки“  $\gamma_0$ .

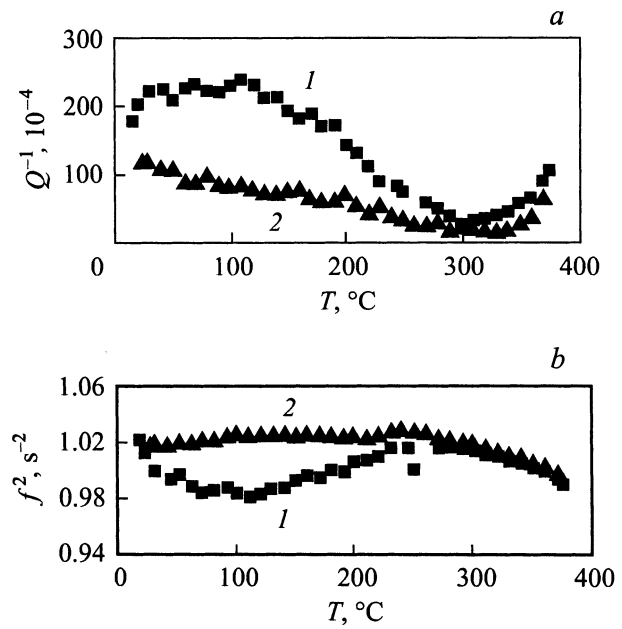
Увеличение времени старения до 10 месяцев приводит к своеобразной локализации осцилляций при  $\gamma_0 = 2.2 \cdot 10^{-5}$ , однако амплитуда и период их становятся меньше, чем после 6 месяцев старения. При больших значениях  $\gamma_0$  осцилляции теряют свою периодичность. Так, после „накачки“ при  $\gamma_0 = 3.5 \cdot 10^{-5}$  на фоне слабого изменения ВТ возникает всплеск поглощения на 17-й минуте измерений, а после „накачки“ при  $\gamma_0 = 6.6 \cdot 10^{-5}$  осцилляции появляются только по истечении определенного времени — на 15–30-й минутах наблюдения.



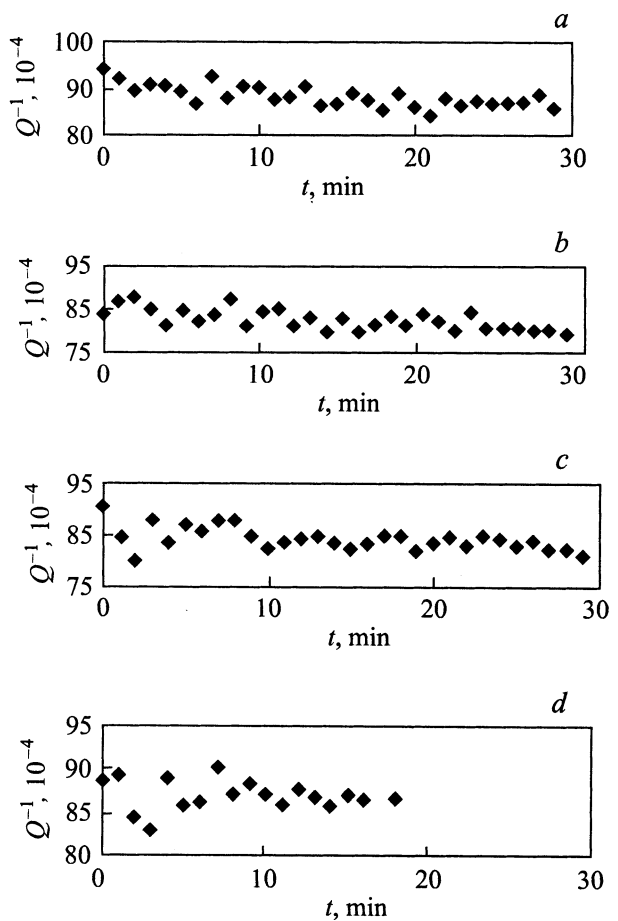
**Рис. 1.** Временные зависимости внутреннего трения МТБК Ве, состаренного в течение 6 месяцев после „накачки“ при  $\gamma_0 = 1.4 \cdot 10^{-5}$  (a),  $2.5 \cdot 10^{-5}$  (b),  $6.6 \cdot 10^{-5}$  (c) и после измерения АЗВТ до  $\gamma_{\max} = 6.6 \cdot 10^{-5}$  (d).

При этом на температурных зависимостях ВТ и квадрата собственных крутильных колебаний  $f^2$ , пропорционального эффективному модулю сдвига  $G_{\text{эф}}$ , образцов, состаренных как в течение 6, так и 10 месяцев, наблюдается существенный температурный гистерезис: кривые нагревания и охлаждения не совпадают в довольно широком температурном интервале (рис. 2). Этот факт свидетельствует об изменении слабо закрепленной дислокационно-примесной структуры Ве в процессе нагревания (охлаждения) вследствие наличия значительных внутренних напряжений [3,4].

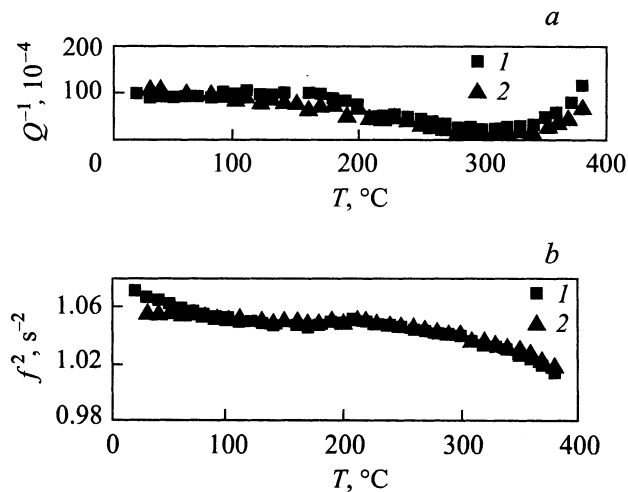
Старение в течение 12 месяцев приводит к подавлению амплитуды осцилляций и уменьшению их периода практически во всем исследуемом интервале деформаций (рис. 3). При этом состояние дефектной структуры образцов характеризуется более высокой стабильностью (рис. 4) — на температурных зависимостях ВТ и  $f^2$  почти отсутствуют характерные аномалии [3]: поглощение упругой энергии слабо изменяется с температурой и находится на уровне фонового во всей исследуемой области температур, а на кривых  $f^2(T)$  нет



**Рис. 2.** Температурные зависимости внутреннего трения (a) и  $f^2$  (b) МТБК Ве после 6 месяцев старения. 1 — нагревание, 2 — охлаждение.



**Рис. 3.** Временные зависимости внутреннего трения МТБК Ве после 12 месяцев старения при комнатной температуре после „накачки“ при  $\gamma_0 = 2.2 \cdot 10^{-5}$  (a),  $3.5 \cdot 10^{-5}$  (b),  $6.6 \cdot 10^{-5}$  (c) и после измерения АЗВТ до  $\gamma_{\max} = 12 \cdot 10^{-5}$  (d).



**Рис. 4.** Температурные зависимости внутреннего трения (а) и  $f^2$  (б) МТБК Ве, состаренного в течение 12 месяцев. 1 — нагревание, 2 — охлаждение.

температурного гистерезиса. Анализ фона ВТ, а также температурных зависимостей АЗВТ свидетельствует об ощутимой стабилизации дефектной структуры Ве.

Следовательно, стабилизация дислокационно-примесной структуры, выведенной из состояния равновесия облучением, в процессе естественного старения приводит к постепенному уменьшению и значительному подавлению осциллирующего характера ВЗВТ. Это, с одной стороны, подтверждает наше предположение о том, что осцилляции ВТ действительно появляются только в неравновесной системе под действием внешних факторов, а с другой — позволяет высказать некоторые соображения относительно возможного механизма такого явления. По всей видимости, периодическое увеличение и уменьшение поглощения упругой энергии невозможно описать в рамках существующих моделей ВЗВТ, построенных на простых моделях взаимодействия дислокаций и дислокационных атмосфер. Только рассмотрение данного явления в рамках представлений об эволюции дислокационно-примесного ансамбля и развитии в нем коллективных, кооперативных явлений [1,5] позволит, как нам кажется, сделать это. Действительно, учет кинетического характера взаимодействия между дислокациями и дислокационными атмосферами, дестабилизированными облучением, сможет объяснить потерю дислокационно-примесным ансамблем пространственной устойчивости и образование неоднородностей в дислокационно-примесных структурах [1]. Эволюция таких структур при наложении внешних напряжений может происходить путем возникновения неоднородных флуктуаций плотности, закрепляющих дислокацию дефектов. При этом следует учитывать, что вероятность образования указанных флуктуаций вдоль дислокаций будет значительно больше вероятности подобных образований в перпендикулярных направлениях, поскольку

подвижность закрепляющих дефектов вдоль дислокационных трубок существенно выше объемной. Об этом свидетельствуют полученные нами оценки коэффициентов трубчатой диффузии  $D_d$  для основных типов примеси в МТБК Ве, сравнение их с коэффициентом объемной диффузии  $D_V$ , а также величина энергии связи дислокации с закрепляющими дефектами  $E_b$  (например,  $D_d$  для Fe в МТБК Ве составил при температурах эксперимента  $5.29 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ , а  $D_V = 1.25 \cdot 10^{-31} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $E_b = 0.056 \text{ eV}$ ). Кроме того, появление таких флуктуаций плотности, закрепляющих дислокацию дефектов, возможно, согласно [1,5], при достижении определенного критического значения плотности. Исходя из этих представлений, можно объяснить и отсутствие осцилляций при  $\gamma_0 = 1.4 \cdot 10^{-5}$  сразу после облучения, и их появление на кривых ВЗВТ после 6 месяцев старения. Действительно, старение приводит к возврату некоторой части примесей на дислокации, что подтверждается анализом АЗВТ и расчетом энергии связи дислокации с закрепляющими ее дефектами. Как следствие на ВЗВТ состаренных образцов после „накачки“ при  $\gamma_0 = 1.4 \cdot 10^{-5}$  появляются четкие осцилляции (рис. 1, а). Дополнительное старение приводит к увеличению количества примесей на дислокациях и стабилизации дислокационно-примесной системы. В результате наиболее яркие осцилляции проявляются только после „накачек“ при  $\gamma_0 = 2.2 \cdot 10^{-5}$ , т.е. после создания оптимального количества примесей на дислокациях. Однако их амплитуда и период существенно меньше, чем после 6 месяцев старения. Можно ожидать, что стабилизация системы в целом приведет к тому, что оптимальные условия для осцилляций не возникнут ни при каких используемых значениях относительных деформаций. Результаты первых сообщений о возникновении осцилляций на ВЗВТ в какой-то мере подтверждают это предположение [2]. Авторы [2] наблюдали осцилляции в системе Al–Ag, содержащей 0.01 mass.% Ag после закалки. При другом количестве примесей и в отожженных образцах осцилляции отсутствовали. Все это, как нам кажется, свидетельствует в пользу предположения о том, что основными условиями и возникновения осцилляций ВТ являются наличие оптимального количества примеси в области залегания дислокаций и существование некоторой нестабильности системы, вызванное либо формированием субструктуры, либо закалкой, либо облучением, либо каким-то иным фактором, т.е. при определенных условиях осцилляции ВТ можно считать индикатором нестабильности системы.

Таким образом, в настоящей работе показано, что для возникновения осцилляций на ВЗВТ необходимо выполнение как минимум двух условий: 1) наличие оптимального количества примесей в области залегания дислокаций; 2) нестабильность дислокационно-примесной структуры в целом, что позволяет отнести это явление к разряду синергетических.

## Список литературы

- [1] Г.А. Малыгин. УФН **169**, 9, 979 (1999).
- [2] Б.Г. Стронгин, П.А. Яковишин. ФХОМ **4**, 123 (1982).
- [3] А.В. Олейнич, Н.Д. Раранский, Б.Г. Стронгин. Металлофизика и новейшие технологии **16**, 4, 47 (1994).
- [4] А.В. Олейнич, Б.Г. Стронгин, Н.Д. Раранский, В.В. Лисюк, В.Т. Маслюк. Металлофизика и новейшие технологии **19**, 1, 62 (1997).
- [5] Г.А. Малыгин. ФТТ **33**, 11, 3267 (1991).