

3. K. Gayer, H. Leider. *Canad. J. Chem.*, **35**, 5 (1957).  
4. K. Kraus, F. Nelson. *J. Amer. Chem. Soc.*, **77**, 372 (1955).

5. К. Е. Клейнер. «Ж. общ. хим.», **20**, 1747 (1950).  
6. А. И. Ривкинд. «Ж. неорганич. хим.», **2**, 6, 1263 (1957).

УДК 621.039.553 : 546.831

## Влияние внутреннего облучения на декремент затухания в цирконии

П. Л. Грузин, А. Н. Семенухин

Среди разнообразных методов радиационной обработки твердых тел, таких, как облучение нейтронами,  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицами,  $\gamma$ -лучами, представляет интерес случай, когда нарушения вызываются ядерными частицами, возникающими в самом исследуемом веществе. Это возможно, если в состав исследуемого вещества предварительно ввести радиоактивные элементы, а также в результате ядерных реакций при внешнем облучении. Под действием такого внутреннего облучения вещество вследствие образования в нем различного рода дефектов структуры переходит в термодинамически неравновесное состояние. Это должно оказывать определенное влияние на такие свойства, как предел текучести, плотность, теплоемкость, электропроводность, а также на фазовые превращения [1].

Изменения свойств твердого тела под действием внутреннего облучения впервые наблюдались на минералах, содержащих естественные радиоактивные элементы. В частности, были замечены изменения структуры и оптических свойств [2, 3].

В работе [4] показано, что в полонии и его соединениях в результате  $\alpha$ -распада происходит смещение атомов. Было также установлено, что под действием внутреннего облучения ускоряются фазовые превращения в соединениях, содержащих полоний или другой радиоактивный элемент.

Внутренним  $\alpha$ -облучением, по-видимому, обуславливаются особенности поведения структурно-чувствительных свойств делящихся металлов — плутония и урана. У плутония, например, наблюдается гистерезис механических и физических свойств, отсутствие воспроизводимости в данных экспериментального определения ряда физических и механических величин [1]. Многократно наблюдалось также аномальное изменение характеристик прочности урана в интервале температур 20—100° С [5].

Систематических исследований изменения свойств твердого тела под действием внутреннего облучения не проводилось, хотя это и может представлять особый интерес. В связи с этим была предпринята попытка изучить влияние внутреннего облучения  $\alpha$ -частицами и атомами отдачи на декремент затухания в цирконии, для чего из порошкового циркония были приготовлены сплавы с 0,5 и 1% урана и 0,02 и 0,04% бора. Сплавы изготавливали в дуговой печи в атмосфере аргона на медном подду. Полученные слитки послековки механически обрабатывали и затем отжигали при 700—800° С в вакууме в течение 20 ч. Готовые образцы имели форму цилиндров диаметром 4—5 мм и длиной 90—100 мм. Резонансные частоты  $f$  таких образцов лежали в пределах 1300—1600 гц. Внутреннее трение определялось по затуханию свободных изгибных колебаний. Главная особенность установки (рис. 1) — возможность опре-

делять внутреннее трение при низких температурах и малой амплитуде деформации ( $10^{-8}$ — $10^{-7}$ ) [6].

Изучалось влияние внутреннего облучения на декремент затухания в сплавах циркония с 0,5 и 1% урана.

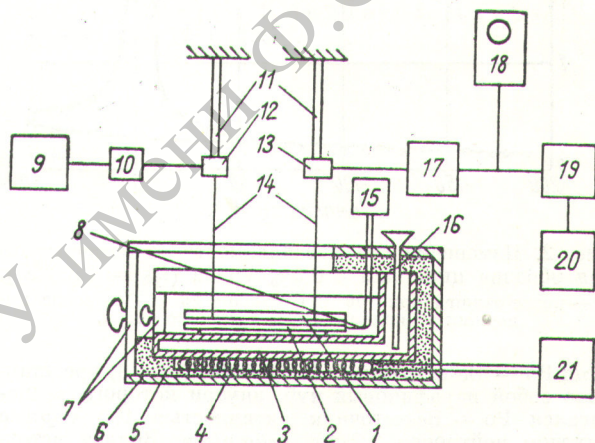


Рис. 1. Схема установки для измерения внутреннего трения:

1 — образец; 2 — контрольный образец; 3 — криостат; 4 — нагреватель; 5 — теплоизоляция; 6 — корпус; 7 — крышки; 8 — терморезистор; 9 — звуковой генератор; 10 — тумблер; 11 — амортизаторы; 12 — электродинамик; 13 — пьезокристалл; 14 — подвески; 15 — потенциометр; 16 — воронка; 17 — усилитель; 18 — осциллограф; 19 — дискриминатор; 20 — пересчетное устройство; 21 — автотрансформатор.

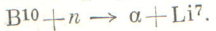
При радиоактивном распаде  $U^{238}$  испускаются  $\alpha$ -частицы с энергией 4,15 Мэв. Эти  $\alpha$ -частицы, а также атомы отдачи вызывают нарушения в структуре металла, которые влияют на свойства вещества, в том числе и на внутреннее трение.

Отожженные образцы после измерения внутреннего трения  $Q^{-1}$  вместе с контрольным образцом из чистого циркония помещались в жидкий азот, где выдерживались 200—400 ч. После этого снова измерялась величина  $Q^{-1}$ . При этом предполагалось, что во время выдержки при температуре жидкого азота происходит накопление дефектов структуры, в то время как при комнатной температуре этот эффект должен быть значительно меньше.

На рис. 2. показано изменение величины  $Q^{-1}$  в зависимости от температуры для образца циркония, содержащего 0,5% урана. Как видно из рисунка, в отожженном образце  $Q^{-1}$  изменяется монотонно, а после выдержки в жидком азоте появляется острый пик при 7° С.

Такой же пик наблюдается и для образца сплава циркония с 1% урана. В контрольном образце этот пик отсутствовал.

В сплавах циркония с бором изучалось влияние на декремент затухания внутреннего облучения частицами, образующимися в результате ядерной реакции



Для этого образцы, содержащие 0,02 и 0,04% бора, облучались при температуре жидкого азота нейтро-

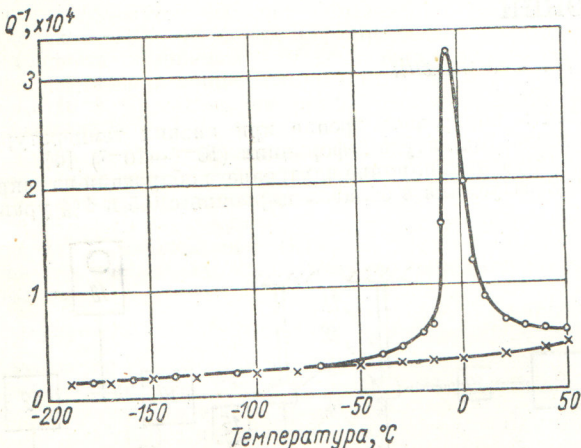


Рис. 2. Изменение  $Q^{-1}$  в зависимости от температуры для образца циркония с 0,5% урана ( $f_{20} = 1420$  гц):  $\times$  — после отжига при  $700^\circ\text{C}$  в течение 20 ч;  $\circ$  — после выдержки в жидком азоте в течение 400 ч.

нами  $Po - Be$ -источника. Устройство (рис. 3) представляло собой парафиновый куб, внутри которого располагался  $Po - Be$ -источник активности 100  $\mu\text{ри}$  с выходом нейтронов  $2,2 \cdot 10^8$  нейтр/сек. Вблизи источника находился сосуд Дьюара с жидким азотом, в который помещались образцы. Защитой от тепловых нейтронов и  $\gamma$ -излучения служили кадмий и свинец.

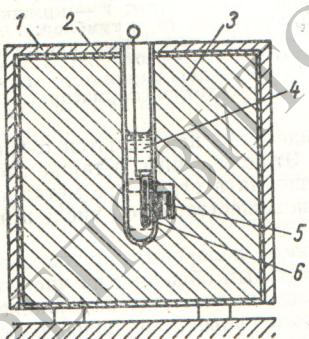


Рис. 3. Схема устройства для облучения нейтронами от  $Po - Be$ -источника:  
1 — свинец; 2 — кадмий;  
3 — парафиновый куб;  
4 — сосуд Дьюара; 5 — источник нейтронов; 6 — образец.

На рис. 4 представлена зависимость величины  $Q^{-1}$  от температуры для сплава циркония с 0,02% бора. После облучения наблюдается уменьшение высоты пика при  $-70^\circ\text{C}$ . Кроме того, появляется пик при  $50^\circ\text{C}$ . Аналогичная картина наблюдается и для образцов циркония, содержащих 0,04% бора. Как видно из рис. 4 и 5, при одинаковой дозе облучения нейтронами эффекты, вызванные внутренним облучением, зависят от содержания бора в цирконии. Последующий нагрев

облученных образцов до температуры  $100-150^\circ\text{C}$  приводил к дальнейшему уменьшению высоты пика при  $-70^\circ\text{C}$  и к исчезновению пика при  $50^\circ\text{C}$ .

Таким образом, установлено, что внутреннее облучение заметно снижает лежащий в области трения температуры  $-70^\circ\text{C}$  пик на кривой внутреннего трения циркония. Этот пик, как было показано раньше [6], аналогичен пику Бордони, поэтому можно предположить, что уменьшение высоты пика связано с закреплением дислокаций радиационными дефектами, образовавшимися при внутреннем облучении. Как известно, примеси могут закреплять дислокации и, следовательно, уменьшать высоту дислокационного пика [7], поэтому в отожженных образцах сплава циркония с ураном этот пик отсутствовал.

Внутреннее облучение, кроме того, что оно уменьшает высоту пика при  $-70^\circ\text{C}$  для образцов сплава цирконий — бор, приводит к появлению острых пиков

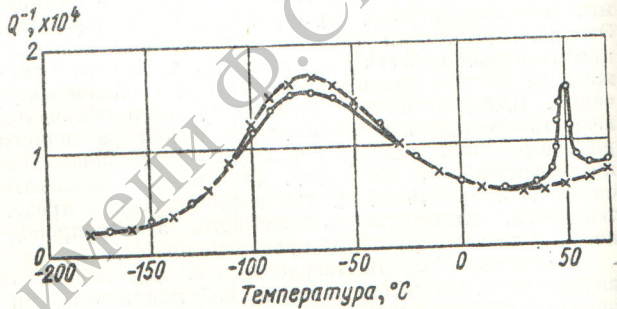


Рис. 4. Изменение  $Q^{-1}$  в зависимости от температуры для образца циркония с 0,02% бора ( $f_{20} = 1600$  гц):  $\times$  — до облучения (деформация 2% и отжиг при  $250^\circ\text{C}$  в течение 4 ч);  $\circ$  — после облучения ( $10^{11}$  нейтр/см $^2$ ).

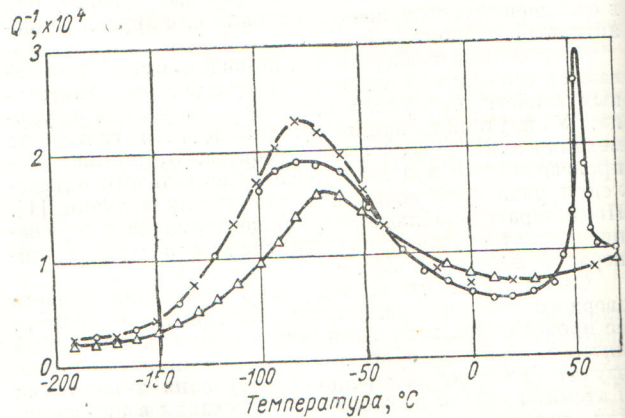


Рис. 5. Изменение  $Q^{-1}$  в зависимости от температуры для образца циркония с 0,04% бора ( $f_{20} = 1480$  гц):  $\Delta$  — после отжига при  $800^\circ\text{C}$  в течение 20 ч;  $\times$  — до облучения (деформация 2% и отжиг при  $250^\circ\text{C}$  в течение 4 ч);  $\circ$  — после облучения ( $10^{11}$  нейтр/см $^2$ ).

$Q^{-1}$  при  $-7^\circ\text{C}$  для сплава циркония с ураном и при  $50^\circ\text{C}$  для сплава циркония с бором. Энергия активации, вычисленная для этих пиков, приблизительно равна  $0,6-0,7$  эв.

Острые пики внутреннего трения наблюдались также на облученной меди [8]. Однако причины их возникновения окончательно еще не выяснены. Предполагают, что они связаны с взаимодействием одиночных вакансий с дислокациями [9]. Такой механизм может быть принят потому, что указанный пик отжигается при температуре 100—150° С, когда вакансии подвижны и легко коагулируют. Возможно, что появление этих пиков связано с миграцией вакансий под действием упругих напряжений. На это указывает, в частности, близость величин энергии активации для пиков  $Q^{-1}$  и энергии активации для отжига электросопротивления облученной меди при температурах 240—300° К. Эта стадия отжига обычно связывается с миграцией вакансий [10].

Таким образом, в работе установлено влияние внутреннего облучения  $\alpha$ -частицами и атомами отдачи на декремент затухания циркония. Выяснена также возможность использования лабораторных Po — Be-источников нейтронов в исследованиях по физике твердого тела.

Поступило в Редакцию 14/XI 1962 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Копытин, Ю. В. Гагаринский. «Атомная энергия», **10**, 238 (1961).
2. A. Faessler, *Kristallogr.*, **104**, 81 (1952).
3. Ю. М. Дымков, Б. В. Бродин. «Атомная энергия», **10**, 35 (1961).
4. R. D'Eue. *J. Inorg. and Nucl. Chem.*, **4**, № 5—6 (1957).
5. Г. Я. Сергеев, В. В. Титова, К. А. Борисов. *Металловедение урана и некоторых реакторных материалов*. М., Атомиздат. 1960.
6. А. Н. Семенович, П. Л. Грузин, А. И. Дашковский. *Металлургия и металловедение чистых металлов*. Вып. 4. М., Атомиздат (в печати).
7. D. Niblett, I. Wilks. *Philos. Mag.*, **2**, 1427 (1957).
8. D. Thompson, D. Holmes. *J. Appl. Phys.*, **30**, 525 (1959).
9. L. Bruner. *Phys. Rev. Lett.*, **3**, 411 (1959).
10. H. Cooper, J. Koehler, J. Marks. *Phys. Rev.*, **97**, 599 (1955).



РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. СКОРНИЦЫ