

## РАДИАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЦИРКОНИЯ, ОБЛУЧЕННОГО ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ И НЕЙТРОНАМИ

А.Ю.Дидык, В.Малиновский, В.М.Назаров, И.Л.Сашин,  
В.А.Скурагов, К.Хаванчак, А.Хофман, В.А.Щеголев,  
Юн Дюн Ман

Исследовалось радиационное упрочнение циркония, облученного ионами неона ( $E_i = 230$  МэВ) и нейтронами ( $E_n > 0,1$  МэВ) в одинаковых условиях. Измерялась дозовая зависимость изменения предела текучести  $\Delta\sigma_{0,2}$  от дозы облучения. Показано, что дозовая зависимость в том и в другом случае имеет идентичный вид, но при облучении нейтронами определенный эффект упрочнения достигается при дозе повреждения, в 10 раз меньшей, чем при облучении ионами неона.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций и Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

### The Radiation Hardening of Zirconium After the Bombardment by Heavy Ions and Neutrons

A.Yu.Didyk et al.

The radiation hardening of zirconium after the bombardment by Ne ions ( $E_i = 230$  MeV) and by neutrons ( $E_n > 0.1$  MeV) under the same conditions was investigated. The dose dependence of the yield stress change  $\Delta\sigma_{0,2}$  was measured. It is shown that the dose dependences are identical in both cases, but a certain effect of the hardening after neutron bombardment is achieved at a dose 10 times smaller than in the case of Ne bombardment.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions and Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Сплавы циркония являются основным конструкционным материалом элементов активной зоны ядерных реакторов на тепловых нейтронах, благодаря высокой радиационной стойкости и малому сечению захвата нейтронов<sup>/1-3/</sup>. Рассматривается также возможность применения сплавов на основе циркония в качестве материалов первой стенки термоядерного реактора<sup>/2-5/</sup>. В связи с этим большое внимание уделяется исследованию механических свойств облученного циркония, в частности, изучению низкотемпературного радиационного упрочнения и охрупчивания<sup>/5-7/</sup>.

Для понимания процессов, приводящих к формированию дефектной структуры, ответственной за изменение физико-механических свойств материалов, наряду с реакторными исследованиями большой интерес представляют результаты экспериментов с использованием пучков различных заряженных частиц. Сопоставление данных об изменении механических свойств чистых металлов, вызванных облучением легкими и тяжелыми ионами, и при нейтронном облучении, свидетельствует о качественном совпадении характера дозовых зависимостей радиационного упрочнения<sup>/9-10/</sup>. Несоответствие в степени изменения свойств материалов, облученных разными частицами в одинаковых условиях до равных доз повреждения, стимулирует проведение дальнейших экспериментов в этом направлении с целью установления общих закономерностей радиационно-стимулированных изменений механических свойств твердых тел.

В настоящей работе изучалось радиационное упрочнение циркония, облученного ионами Ne с энергией 230 МэВ и нейтронами спектра деления (с  $E > 0,1$  МэВ).

### Методика экспериментов

В экспериментах использовались образцы из циркониевой фольги толщиной  $(22 \pm 0,25)$  мкм. Образцы имели стандартную форму с размерами рабочей части  $(15 \times 3)$  мм. Чистота материала составляла 99,97%. Примесный состав (в вес.%) приведен в таблице.

Таблица

Cr — 0,0011	Mg — 0,0001	Pb — 0,0010	Sn — 0,0001
Ge — 0,0019	Ni — 0,0002	V — 0,0001	Zn — 0,007
Fe — 0,0050	Mn — 0,0001	Cu — 0,0005	Ti — 0,0005
Hf — 0,0027	Cd — 0,0001	Mo — 0,0020	Al — 0,0050
N — 0,0025	H — 0,0011	C — 0,0050	

Толщина образцов выбиралась из тех соображений, чтобы плотность создаваемых радиационных дефектов была приблизительно одинаковой по всей толщине образца. В нашем случае неоднородность распределения радиационных дефектов составляла не более 10%. В то же время при такой толщине образцов материал можно считать объемным, так как размер зерна в наших образцах составлял в среднем 7 мкм (рис. 1). Это достигалось путем отжига образцов в вакууме при давлении  $10^{-3}$  Па в течение 20 мин с последующим медленным охлаждением до комнатной температуры. Температура и время отжига подбирались таким образом, чтобы произошла полная рекристаллизация

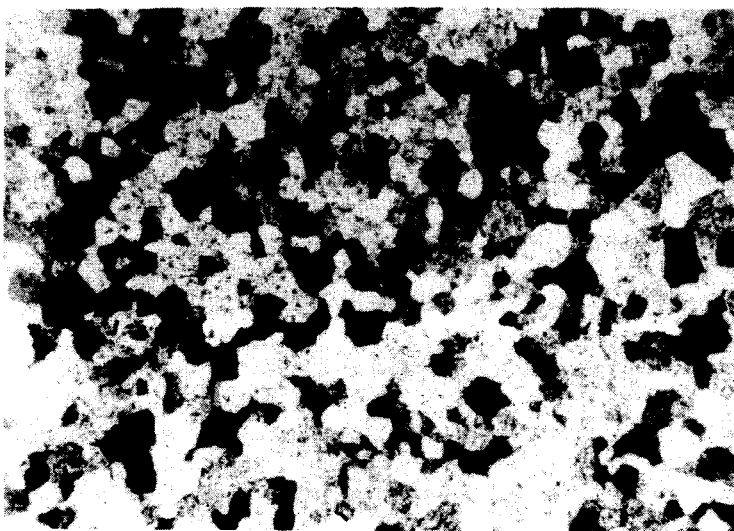


Рис. 1. Зернистая структура образцов Zr (увеличение  $\times 500$ ).

холодно-деформированной фольги. Кроме того, были проведены измерения предела текучести на необлученных образцах толщиной 0,4 мм и 22 мкм с той же самой величиной зерна (7 мкм). В первом случае предел текучести составлял 204 МПа, во втором 202 МПа, т.е. разница была незначительной.

Облучение образцов проводилось выведенным на воздух пучком ионов Ne с энергией 230 МэВ. Во время облучения образец охлаждался потоком сжатого воздуха. В этих условиях температура образца не превышала 100°C. Образцы облучались до доз в интервале  $5 \cdot 10^{14}$ – $6 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> при средней интенсивности потока ионов  $10^{11}$  1/см<sup>2</sup> с.

Для сравнения эффектов радиационного упрочнения при облучении тяжелыми ионами и нейтронами образцы из одной серии облучались в импульсном реакторе ИБР-2 на канале установки РЕГАТА<sup>12/</sup>. Условия облучения были следующие. Плотность потока нейтронов с энергией  $E > 0,1$  МэВ составляла  $1,4 \cdot 10^{16}$  1/см<sup>2</sup> с (в импульсе  $2,5 \cdot 10^{18}$ ). Частота следования импульсов — 5 Гц, длительность импульса — 220 мкс. Температура облучаемых образцов ( $100 \pm 20$ )°C (не превышала 100°C).

После облучения ионами и нейтронами образцы испытывались на растяжение со скоростью деформации  $5,5 \cdot 10^{-5}$  с<sup>-1</sup> на испытательной машине INSTRON-1121. Из диаграмм напряжение — деформация находился условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ . Относительная погрешность определения величины  $\sigma_{0,2}$  не превышала 2%.

## Результаты и обсуждение

Дозовая зависимость предела текучести Zr, облученного ионами Ne и нейтронами, представлена на рис. 2. Видно, что облучение приводит к заметному изменению предела текучести в обоих случаях. Сечение образования радиационных дефектов ионами Ne рассчитывалось по программе, в которой потери энергии на ядерное и электронное торможение определялись по методу, предложенному в работах /13,14/. Аналогичная величина для нейтронов получена с использованием данных, приведенных в /15/.

Зависимости, приведенные на рис. 2, достаточно хорошо описываются выражением вида

$$\Delta\sigma_{0,2} = A(1 - e^{-BD})^{1/2},$$

где  $D$  — доза повреждения, выраженная величиной смещений на атом (с.н.а.), значения параметров:  $A = 48$  МПа и  $B = 1 \cdot 10^4$  (с.н.а.)<sup>-1</sup> (для нейтронного облучения),  $A = 59$  МПа и  $B = 5,3 \cdot 10^4$  (с.н.а.)<sup>-1</sup> (для ионного облучения).

В предыдущей работе /10/, в которой исследовалось радиационное упрочнение Ni, облученного ионами Ne в аналогичных условиях, отмечалось, что при одинаковой величине дозы повреждения больший прирост предела текучести наблюдается при нейтронном облучении. При этом данные по нейтронам

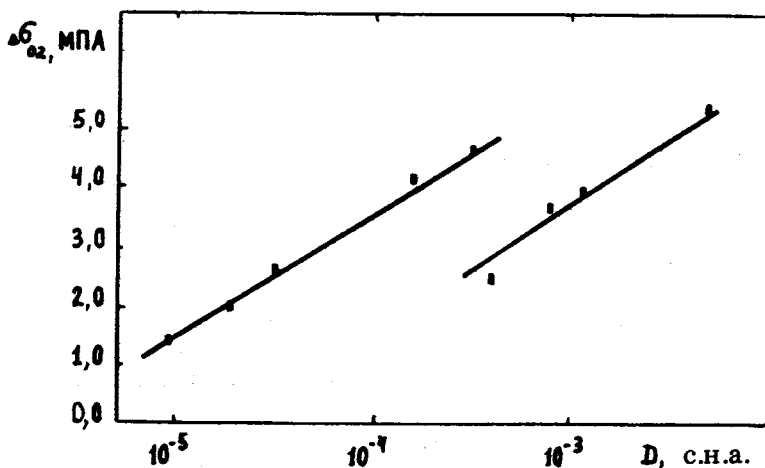


Рис. 2. Зависимость изменения предела текучести Zr, облученного нейтронами (□) и ионами Ne (■), от дозы радиационного повреждения.

облучениям брались из литературы. Такое сравнение не всегда надежно, так как даже небольшие различия в примесном составе изучаемых материалов, используемых в разных работах, могут повлиять на степень упрочнения. В настоящей работе использовался один и тот же материал, и условия облучения были практически идентичны. Поэтому сравнение степени влияния на упрочнение нейтронного и ионного облучения является значительно более определенным.

Как видно из рис. 2, одинаковый уровень радиационного упрочнения Zr, облученного нейтронами и ионами, наблюдается при уровнях повреждения, отличающихся более, чем на порядок; одной из причин такого расхождения может быть различие в энергетических спектрах первично-выбитых атомов (ПВА), генерируемых этими бомбардирующими частицами. Спектр ПВА при нейтронном облучении является более "жестким".

Определенную роль может также играть различие в скорости образования радиационных дефектов. Так, в случае ионного облучения скорость дефектообразования составляла  $1,6 \cdot 10^{-7}$  с.н.а./с, в то время как для нейтронного облучения —  $3,6 \cdot 10^{-10}$  с.н.а./с. Более высокая скорость образования дефектов может приводить к ускорению диффузионных процессов и, следовательно, к усилению радиационного отжига дефектов во время облучения. Не ясно также, как могла повлиять на результат импульсность нейтронного облучения.

Авторы выражают благодарность академику Г.Н.Флерову за внимание к работе, а также персонал ускорителя У-400 и реактора ИБР-2 за хорошее обеспечение наших экспериментов.

## Л и т е р а т у р а

1. Kajano H., Higashiguchi J., Jaima S. — J.Nucl.Science and Technology, 1978, vol.15, No.11, p.868.
2. Guiman M.W., Zee R.H. — J.Nucl.Mater., 1984, vol. 123, p.1017.
3. MacEwen S.R. et al. — J.Nucl.Mater., 1984, vol.123, p.1036.
4. Higashiguchi J., Kajana H. — J.Nucl.Science and Technology, 1978, vol.15, No.4, p.263.
5. Garlick A., Hindmarch P. UKAEA, 1980 (ND-R-468(W)).
6. Peterson K., Vesterlund G., Andersen T. Proc.4-th Int.Conf. of Zirconium in Nuclear Industry, 1979, 4, Philadelphia, (ASTM STP681).
7. Lee O., Zavert Jr. — J.Nucl.Mater., 1983, vol.116, p.297.
8. Ибрагимов Ш.Ш., Реутов В.Ф., Фархутдинов К.Г. — АЭ, 1983, т.54, вып.5, с.339.
9. Jones R.H., Bradley E.R., Styris D.L. — J.Nucl.Mater., 1983, vol.116, p.297.

10. Хаванчак К. и др. ФММ, 1986, т.62, вып.2, с.390.
11. Hone L.W. AESL - 1484, 1962.
12. Назаров В.М. и др. Краткие сообщения ОИЯИ, 6-85, Дубна, 1985, с.42.
13. Бардош Д. Сообщения ОИЯИ, P17-86-336, Дубна, 1986.
14. Бардош Д., Гавриленко Г.П. Препринт ОИЯИ, P17-84-171, Дубна, 1984.
15. Ямницкий В.А. и др. Препринт ХФТИ, 81-31, Харьков, 1981.

Рукопись поступила 6 апреля 1988 года.