

УДК 621.039

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАФНИЯ

© 2012 В.Д. Рисованый^{1,2}, А.С. Кадочкин²

¹ ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград

² Ульяновский государственный университет

Поступила в редакцию 20.11.2012

В данной работе представлены методы исследования механических свойств гафниевых образцов нестандартных форм. Исследованы механические характеристики гафниевых образцов различных форм. Получена зависимость механических свойств от флюенса нейтронов и от температуры.

Ключевые слова: гафний, радиационный рост, реакторные исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Реакторное облучение упрочняет гафний и сплавы на его основе и одновременно снижает их пластичность вследствие повреждения структуры и образования радиационных дефектов. Облучение стимулирует зависящие от исходной структуры и состава материала процессы выделения и распада вторых фаз, в том числе за счет накопления трансмутантных элементов. Заметный вклад в изменение механических свойств может вносить наводороживание гафния, особенно при формировании строчечных гидридов с неблагоприятной морфологией. Разделить влияние всех этих факторов, к тому же с учетом анизотропии свойств, присущей всем материалам с ГПУ-решеткой, на механические свойства образцов облученного гафния весьма сложно, т.к. в зависимости от условий облучения они могут сильно изменяться. Следующая сложность связана с методиками определения механических свойств облученных изделий.

Специфика используемых в ядерных установках форм и размеров изделий из гафния, как правило, не позволяет изготовить из них стандартные образцы для механических испытаний, предусмотренных государственными и международными стандартами, общепринятыми для других отраслей промышленности. В связи с этим приходится разрабатывать и применять специальные методики дистанционных механических испытаний, учитывающие конкретные типоразмеры изделий и позволяющие характеризовать состояние материала. Данная работа посвящена исследованию механических свойств гафниевых образцов различных форм после облучения в исследовательских реакторах.

Рисованый Владимир Дмитриевич, доктор технических наук, заместитель директора. E-mail: ris@niiar.ru
Кадочкин Алексей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики и электроники. E-mail: askadochkin@sv.ulstu.ru

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЛУЧЁННОГО ГАФНИЯ

1. Облучение в реакторе РБТ-6. Исследование пластинчатых образцов

Нами были изучены механические характеристики пластины из гафния марки ГФЭ-1 с толщиной стенки 6 мм до и после облучения в исследовательском реакторе РБТ-6 флюенсом быстрых нейтронов $(0,5\text{--}2,5)\cdot10^{21}\text{ см}^{-2}$ при температуре материала 343–358 К. Испытания проводили в интервале температур 293–423 К. Результаты измерений представлены на рис. 1. Как видно из графиков, произошло увеличение прочностных свойств на 30% и снижение пластичности, которая после реакторного облучения сохранилась на достаточно высоком уровне, более 5%.

Также были проведены исследования на ударную вязкость образцов гафния, вырезанных из той же пластины. Образцы имели размеры в сечении 6×6 мм, длину 55 мм. При этом было установлено, что ударная вязкость возросла в несколько раз, т.е. работа, затраченная на разрушение облученного образца и оцениваемая произведением силы на перемещение, в 3–4 раза больше чем на разрушение необлученного. Характерная структура излома облученного образца – сочетание скола с отрывом. Такая структура обычно наблюдается в анизотропных однофазных металлах, отличающихся высокой пластичностью и умеренной прочностью. На поверхности излома встречаются участки вязкого разрушения, осуществляемого путем слияния микропор.

Обнаруженный рост ударной вязкости после облучения мог быть следствием значительного увеличения статических и динамических характеристик прочности и свидетельствует о сохранении высокой работоспособности материала в условиях отсутствия специфических механических нагрузок, характерных для несущих

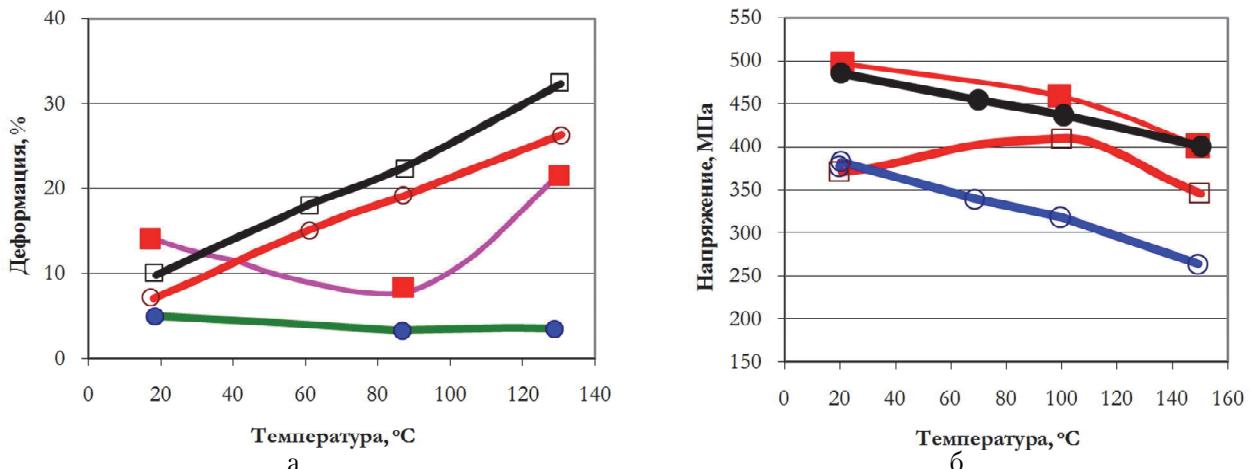


Рис. 1. Зависимость пластичных (а) и прочностных (б) характеристик плоских образцов гафния от температуры:

равномерное удлинение (δ_p) (а) – необлученное (○) и после облучения (●), общее удлинение (δ_0) (а) – необлученные (□) и после облучения (■) предел текучести ($\sigma_{0,2}$) (б) – необлученные (○) и после облучения (●), предел прочности (σ_b) (б) – необлученные (□) и после облучения (■)

конструкций. При облучении происходит снижение сопротивления гафния ударным нагрузкам, что непосредственно связано со снижением пластичности материала. Однако это снижение не носит характера абсолютного охрупчивания материала. Вид излома после испытаний типичен для разрушения пластичных металлов.

2. Облучение в реакторе БОР-60. Исследование кольцевых образцов.

На данном этапе были исследованы механические характеристики кольцевых образцов гафния марки ГФЭ-1, вырезанных из труб диаметром 9,6 мм и толщиной стенки 2,0 мм, облученных в реакторе на быстрых нейтронах БОР-60 до флюенса $1,1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) при температуре 633–663 К. Из-за невозможности проведения испытаний на растяжение (ломались опоры вследствие высокой прочности гафния и большой толщины стенки колец) кольцевой образец подвергался локализованному изгибу, где и зарождалась трещина. Оценку механических свойств проводили, не прибегая к прямым измерениям деформации образцов, а пользуясь лишь диаграммами деформирования. При этом рассчитывали следующие характеристики: деформация в точке разрушения ε , нагрузка в точке отклонения диаграммы деформирования от линейности P_y , максимальная нагрузка в момент разрушения кольца P_{\max} .

Результаты испытаний приведены в табл. 1. Обращает внимание отсутствие пластичности при комнатной температуре при сравнительно низкой нагрузке в момент разрушения. В то же время, при температуре испытаний 623 К деформация в точке разрушения составила (15–25)%, а

максимальная нагрузка 326–350 кг. Характерно, что в большинстве случаев, даже при испытаниях при комнатной температуре, кольцевые образцы не разрушались на несколько кусков, что подтверждает их высокую пластичность.

Также были исследованы механические характеристики кольцевых образцов Hf+0,8%Nb марки ГФИ-1 диаметром 12,5 мм и толщиной стенки 2,0 мм после облучения в реакторах СМ, МИР и БОР-60 [1,2].

На рис. 2 показаны полученные зависимости изменения кратковременных механических характеристик образцов гафния. Жесткий спектр нейтронов (облучение образцов в реакторе БОР-60) приводит к более быстрому упрочнению, что, по-видимому, объясняется высокими темпами накопления радиационных дефектов.

При комнатной температуре испытаний зависимость предела прочности образцов гафния от флюенса нейтронов можно записать как :

$$\sigma_b = \sigma_b^0 + a_3 \cdot 10^{-6} \cdot F_{0,1}^{1/3},$$

где σ_b^0 – предел прочности в исходном состоянии, $F_{0,1}$ – флюенс нейтронов ($E > 0,1 \text{ МэВ}$), см^{-2} , a_3 – коэффициент пропорциональности. Так, для образцов из сплава Hf+0,8%Nb получено уравнение $\sigma_b = 440 + 12,4 \cdot 10^{-6} \cdot F_{0,1}^{1/3}$. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами работ [5, 6, 7, 8].

3. Облучение в реакторе СМ-2. Прутки

Механические характеристики гафния марок ГФИ-1 и ГФЭ-1 были исследованы после облучения в реакторе СМ-2. Гафний, изготовленный методом кальцийтермического восстановления (ГФЭ-1), отличался от изготовленного йодид-

Таблица 1. Механические свойства гафния после облучения [3]

№ пп	Температура испытаний, К	Деформация в точке разрушения, (ε), %	Нагрузка в точке отклонения от линейности (P_y), кг	Максимальная нагрузка, (P_{max}) кг
1.	293	0	-	225
2.	293	0	-	220
3.	523	9	284	364
4.	523	4	300	360
5.	573	30	230	290
6.	573	4	250	320
7	623	15	274	350
8.	623	25	246	326

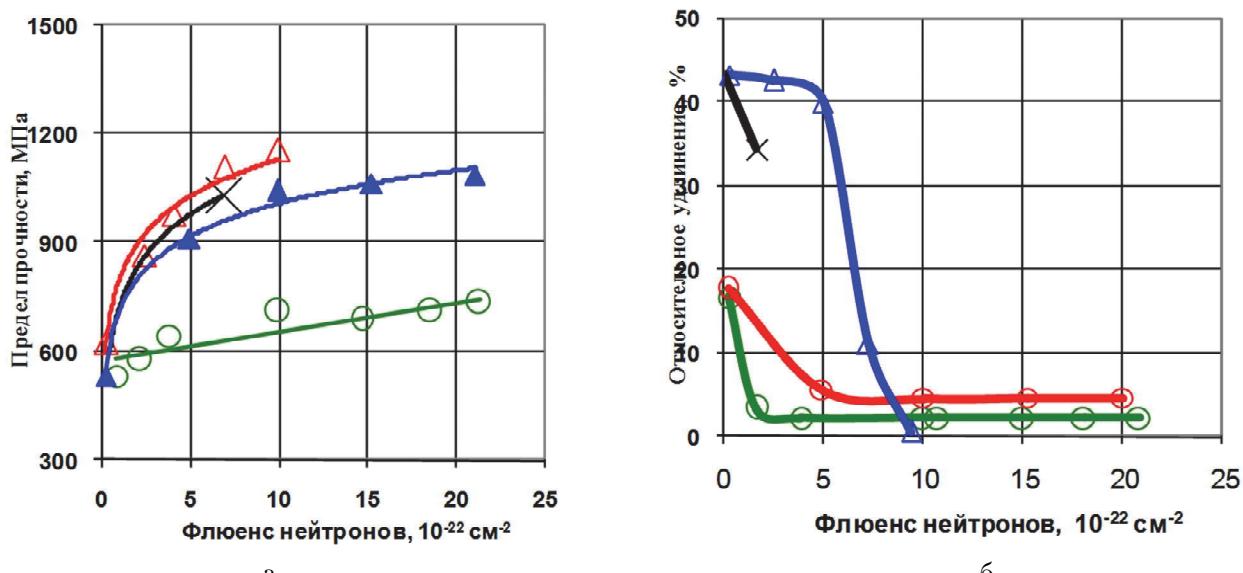


Рис. 2. Изменение механических характеристик Hf+0,8% Nb в зависимости от флюенса нейтронов ($E > 0$): предел прочности (а) и относительное удлинение (б):
○ – облучение в реакторе БОР-60, $T=600 \dots 620$ К; ● – облучение в реакторе СМ-2, $T=550 \dots 600$ К;
▲ – нержавеющая сталь ЭП-753; X – данные работы [5]

ным рафинированием (ГФИ-I) более низкими механическими характеристиками в исходном состоянии из-за повышенного содержания в нем газовых примесей. После облучения в реакторе это различие уменьшается и по мере накопления радиационных дефектов механические характеристики имеют тенденцию к выравниванию, что подтверждают и данные изменения микротвердости гафния, полученного по различным технологиям (рис. 4). Таким образом, различие заключается в темпах накопления радиационных дефектов, которые выше в гафнии с меньшим содержанием газовых примесей.

Были получены результаты по усталостному разрушению образцов гафния, облученных до флюенса нейтронов $2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ и $5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ при температуре [5]. Образцы циклировались при контролируемых напряжениях сжатия и растяжения.

При высоких напряжениях с увеличением флюенса нейтронов происходит уменьшение времени до разрушения (рис. 5).

При изучении [5] влияния облучения на ударную прочность гафния (рис. 3) значительного различия в поведении гафния после облучения не обнаружили.

Исследования на ударную вязкость нестандартных образцов из гафния в виде прутков (диаметр 11 мм, высота 50 мм), которые не имели концентраторов напряжений - надрезов, показали, что с увеличением флюенса нейтронов уменьшается стойкость гафния к ударным нагрузкам (рис. 7). Однако во всем интервале флюенсов нейтронов $(2-2,4) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ она остается на достаточно высоком уровне. Образцы, облученные до флюенса нейтронов $2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$, при испытании на копре изгибались, но полностью не разруша-

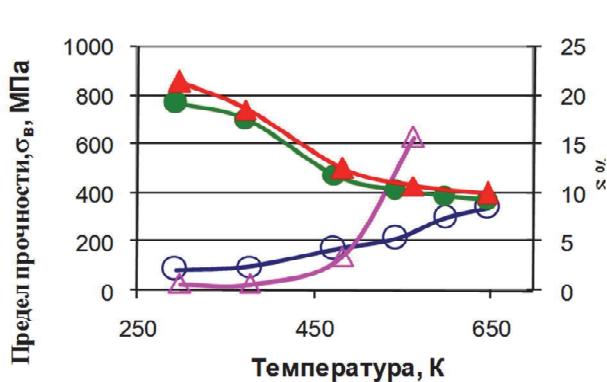


Рис. 3. Зависимость изменения предела прочности и относительного удлинения гафния, облученного в реакторе СМ-2 до флюенса $4,4 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}, T = 550 \text{ K}$) от температуры:
▲, ● – $\sigma_{\text{в}}$ для гафния марки ГФЭ-1 и ГФИ-1;
△, ○ – δ для гафния марки ГФЭ-1 и ГФИ-1

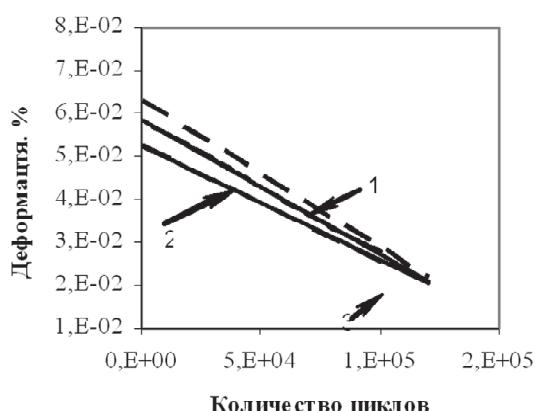


Рис. 5. Зависимость количества циклов облученных образцов гафния от деформации:
1 – до облучения; 2, 3 – при флюенсе нейтронов $2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ и $5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$

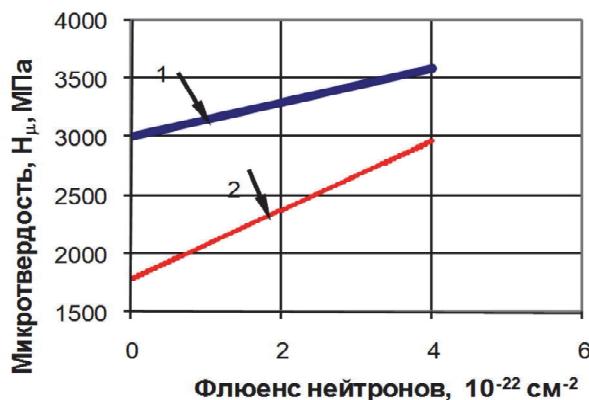


Рис. 4. Изменение микротвердости гафния марок ГФЭ 1 (1) и ГФИ-1 (2) в зависимости от флюенса нейтронов

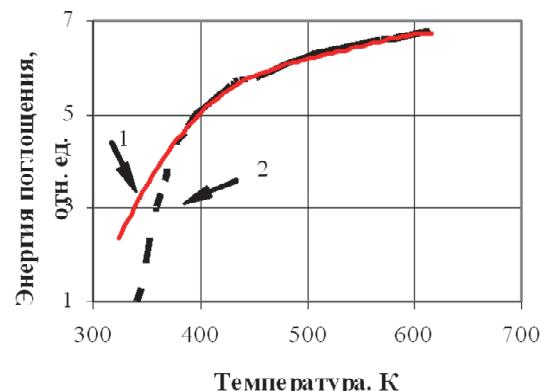


Рис. 6. Изменение энергии поглощения гафнием от температуры:
после (1) и до облучения (2)

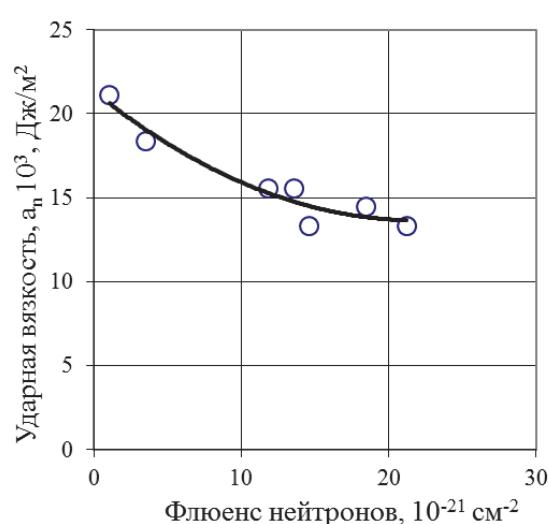


Рис. 7. Изменение ударной вязкости a_n образцов гафния, легированных 0,6 % Nb, в зависимости от флюенса нейтронов ($E > 0,1 \text{ МэВ}$)

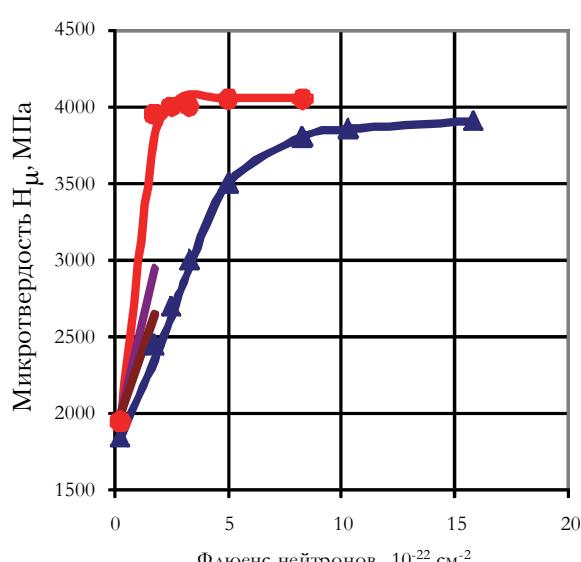


Рис. 8. Изменение микротвердости гафния в зависимости от флюенса нейтронов ($E > 0,1 \text{ МэВ}$):
● – дуговой переплав; ▲ – электронно-лучевой переплав; — – данные работы [5]

лись Наблюдали разрушение на 50-60 % от попечного сечения образца. При флюенсах нейтронов $1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) происходило полное разрушение образцов.

На рис. 8 представлены данные по изменению микротвердости гафния в зависимости от флюенса нейтронов. Темп накопления радиационных дефектов у гафния, имеющего большее количество газовых примесей, ниже, чем у гафния с меньшим их содержанием. Но во всех случаях при достижении значения микротвердости 4000 МПа наблюдали насыщение радиационными дефектами. Дальнейшее облучение не сопровождалось увеличением микротвердости материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе представлены методы исследования механических свойств гафниевых образцов нестандартных форм. Исследованы механические характеристики пластинчатых, кольцевых образцов, а также прутков. Получена зависимость механических свойств, таких как предел прочности, микротвёрдость и ударная вязкость от флюенса нейтронов, определена температурная зависимость деформации, предела прочности и ударной прочности облучённых и необлучённых образцов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральных целевых программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 - 2013 годы» и «Исследования и разработки по приоритетным направлениям

развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рисованый В.Д., Клочков Е.П., Пономаренко В.Б. Гафний в ядерной технике. Димитровград: НИИАР, 1993. 143 с.
2. Risovany V.D., Klochkov E.P., Ponomarenko V.B. Hafnium in nuclear engineering. (Russian materials monograph series), ISBN 0-89448-566-0, La Grande Rark, Illinois 60525 USA, 102 P.
3. Варлашова Е.Е., Рисованый В.Д., Клочков Е.П. и др. Размерная и структурная стабильность образцов гафния марки ГФЭ-1, облученных до высоких по-враждающих доз. // Сб. докл. Пятой международной конф. по реакторному материаловедению, г.Димитровград, 8-12 октября, 1997 г.. В 2-х томах. Т.1. Димитровград, 1998. с.143–154
4. Risovany V.D., Zacharov A.V., Klochkov E.P. et al. Dysprosium and hafnium base absorbers for advanced WWER control rods. // Technical Committee meeting “Control assembly materials for water reactors: Experience, Performance and Perspectives”, Vienna, 12–15 October, 1998, IAEA – TECDOC – 1132. 2000. P.91–102.
5. Murgatroyd R.A., Kelly B.T. Technology and assessment of neutron absorbing materials // Atom. Energy Rev., 1977. V.15. № 1 P.3–74.
6. Herzig C., Manke L., Bubmann W. Mechanisms of the anomalous diffusion in b-zirconium and -hafnium// Point Defects and Defect Interactions Metals. Proc.Yamada Conf. V, Kyoto, 16-20 Nov, Tokyo, 1982. P.578–581.
7. Korth G.E., Brinkman C.R., Becston I.N. The effect of fast neutron irradiation on the mechanical properties of hafnium// Idaho Nuclear Corp. US AEC-IN-1440. TID-4500, 1975
8. Donnell W.J., Weinberg J.C. Low-cycle fatigue properties of irradiated hafnium// Trans.Amer. Nucl.Soc., 1967. V.10. № 1. P. 138.

EFFECT OF IRRADIATION ON MECHANICAL PROPERTIES OF HAFNIUM

© 2012 V.D. Risovanyi^{1,2}, A.S. Kadochkin²

¹Joint Stock Company “State Scientific Center Research Institute of Atomic Reactors”, Dimitrovgrad

²Ulyanovsk State University

This paper presents methods for studying the mechanical properties of hafnium samples of nonstandard forms. The mechanical characteristics of hafnium samples of various forms are studied. The dependence of the mechanical properties of the neutron fluence and temperature is determined.

Keywords: hafnium, radiation growth, reactor study

Vladimir Risovanyi, Doctor of Technics, Deputy Director.

E-mail ris@niiar.ru

Alexey Kadochkin, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Radiophysics and Electronics Department. E-mail: askadochkin@sv.ulsu.ru