

УДК 621.039

РАДИАЦИОННЫЙ РОСТ ГАФНИЯ

© 2012 А.С. Кадочкин¹, Е.М. Муралева^{1,2}

¹Ульяновский государственный университет

²ОАО «ГНЦ НИИАР», Димитровград

Поступила в редакцию 20.11.2012

В данной работе представлены результаты исследования радиационного роста гафния после облучения в реакторах СМ-2, СМ-3 и БОР-60. Исследована зависимость линейного и объёмного радиационного роста гафниевых образцов от флюенса нейтронов и температуры облучения.

Ключевые слова: гафний, радиационный рост, реакторные исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Способность изделий сохранять целостность, форму, геометрические размеры в процессе реакторного облучения – важнейший критерий их радиационной стойкости. Для материалов с ГПУ-решеткой, к которым относится и гафний, основное формоизменение связано с радиационным ростом.

Под радиационным ростом понимают изменение размеров, формы изделий без изменения объема в отсутствие приложенного напряжения при облучении энергетическими частицами. Он связан с кристаллографической и микроструктурной анизотропией материалов. Для поликристаллических структур с зёрнами, близкими к равноосным, деформация радиационного роста в направлении \vec{d} определяется из выражения:

$$\varepsilon_d = S G_d F^n, \quad (1)$$

где S – структурный коэффициент, зависящий от особенностей микроструктуры материала и температуры облучения; F – флюенс нейтронов; n – показатель степени; G_d – текстурный фактор (индекс) роста, связанный с текстурным коэффициентом f соотношением $G_d = 1 - 3f$. (f определяется рентгеноструктурными методами).

Радиационный рост обусловлен асимметричным взаимодействием генерируемых облучением вакансий и междоузлий (с определенным фактором предпочтения) с анизотропно распределёнными различного рода стоками в виде дислокаций, границ зёрен, дислокационных петель, кластеров, в результате чего происходит перераспределение атомов материала. Одновременно междоузлия и вакансии участвуют в фор-

мировании и эволюции структуры радиационных дефектов, являющихся в свою очередь соответствующими стоками для точечных дефектов.

Следует отметить, что в настоящее время не существует количественной модели радиационного формоизменения, которая бы адекватно учитывала структурные изменения, происходящие в гафнии под действием реакторного облучения. Можно лишь проследить некоторые особенности и закономерности поведения исследованных материалов. При этом важным является изготовление материалов одинакового состава по единой технологической схеме, т.к. коэффициент S в формуле (1) является решающим фактором, влияющим на ход радиационного формоизменения, и его значительное изменение связано, главным образом, с легированием, термообработкой и деформационной схемой производства. Именно исходная структура и температура реакторного облучения в основном обуславливают характер радиационной повреждаемости и эволюции радиационных дефектов.

РЕАКТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАФНИЕВЫХ ОБРАЗЦОВ

1. Облучение в реакторах СМ

Нами исследовались прутки из гафния марки ГФЭ-1 диаметром 9,6 мм и высотой 50 мм, изготовленные по различным технологиям. Все образцы имели равноосные зёрна размером 14-20 мкм.

Микротвёрдость образцов из трех первых партий составила 2200–2400 МПа, у последней – 2100–2200 МПа. Рентгеноструктурными исследованиями были построены обратные полюсные фигуры. Был рассчитан текстурный коэффициент f (см. табл. 1), характеризующий эффективную долю базисных плоскостей в осевом направлении образцов. В зависимости от технологии изготовления текстурный коэффициент изменяется от 0,117 до 0,33.

Кадочкин Алексей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики и электроники. E-mail: askadochkin@sv.ulsu.ru

Муралева Елена Михайловна, кандидат технических наук, научный сотрудник. E-mail: muraleva@niiar.ru

Таблица 1. Основные характеристики образцов из гафния марки ГФЭ-1 для исследования радиационного роста

№ п/п	Схема деформации	Температура отжига, К	Размер зерна, мкм	Микротвердость, МПа	Текстурный коэффициент
1	Ковка	1073	20	2200-2400	0,19
2	Обжатие и ковка	1076	16	2200-2400	0,33
3	Двойное горячее прессование	1423	14	2200-2400	0,02
4	Горячая экструзия	1123	14	2100-2200	0,17

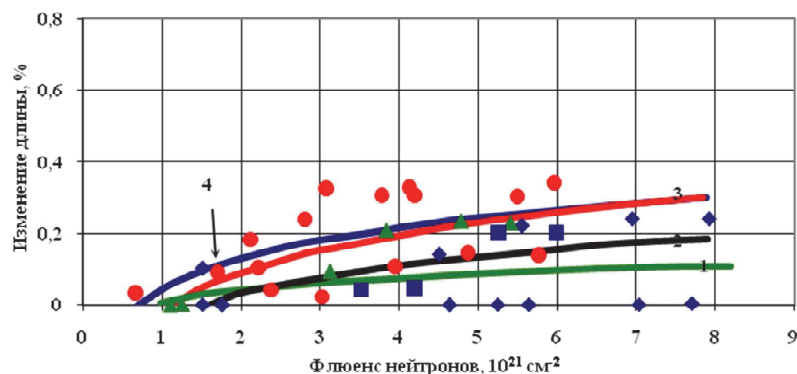


Рис. 1. Изменение длины образцов после облучения в реакторе СМ-2: 1,2,3,4 – партии образцов

Образцы облучались в реакторе СМ-2 до максимального флюенса быстрых нейтронов $7,8 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) при температуре на поверхности образцов 593–603 К, в центре – 643–668 К. Исследования облученных образцов проводили с извлечением из реактора через 53, 160, 191, 237 и 347 эфф. суток. Таким образом, на одних и те же образцах были получены экспериментальные данные по изменению длины и диаметра образцов (рис. 1). Следует отметить имеющийся разброс в полученных результатах. С учетом этого разброса и ошибки измерений не всегда возможно корректно выявить преимущества той или иной технологии изготовления образцов гафния. Во всех случаях увеличение длины не превышало 0,38%. Наблюдается тенденция к уменьшению скорости радиационного роста при увеличении времени облучения и флюенса нейтронов.

Кривые плавно переходят на плато без стадии перелома и резкого увеличения скорости радиационного роста. Диаметры образцов гафния при этом практически не изменились, хотя следовало бы ожидать их уменьшения на величину до $\sim 0,1\%$. Это связывается как с ошибкой измерений, так и образованием оксидной пленки на поверхности образцов.

Электронно-микроскопические исследования также не выявили принципиальных различий в дислокационных структурах у облученных образцов гафния, изготовленных по четырем различным технологиям. Плотность дислокационных петель с-типа у них находится на уровне $\sim 3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$, размер до 115 нм.

В реакторе СМ-3 облучались трубки из гафния марки ГФИ-1. Они имели диаметр от 8,2 до

13,5 мм, толщину стенки 2,0 мм и высоту 50 мм. Максимальный флюенс быстрых нейтронов составил $2,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, температура облучения 583–603 К. После облучения измеряли высоту и диаметры образцов, по полученным результатам определяли деформацию радиационного роста (рис. 2). Увеличение длины образцов гафния происходит в две стадии:

- 1) – сравнительно интенсивного роста до флюенса быстрых нейтронов $(5\text{--}7) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$);
- 2) – стадию насыщения при более высоких флюенсах быстрых нейтронов.

Полученные результаты радиационного роста прутков гафния после облучения в исследовательском реакторе СМ-2 хорошо коррелируют между собой, несмотря на различия в технологических схемах получения металла и

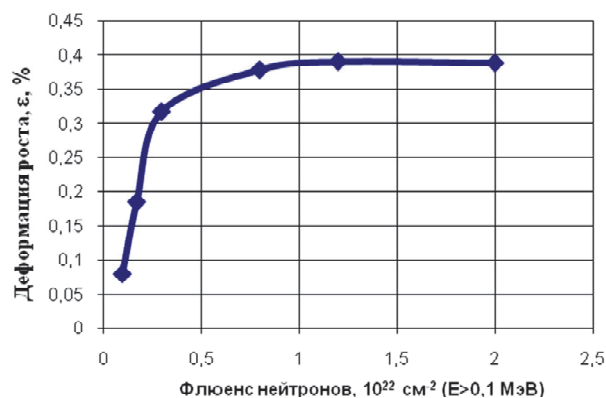


Рис. 2. Деформация роста образцов гафния марки ГФИ-1 в зависимости от флюенса быстрых нейтронов (реактор СМ-2) [1]

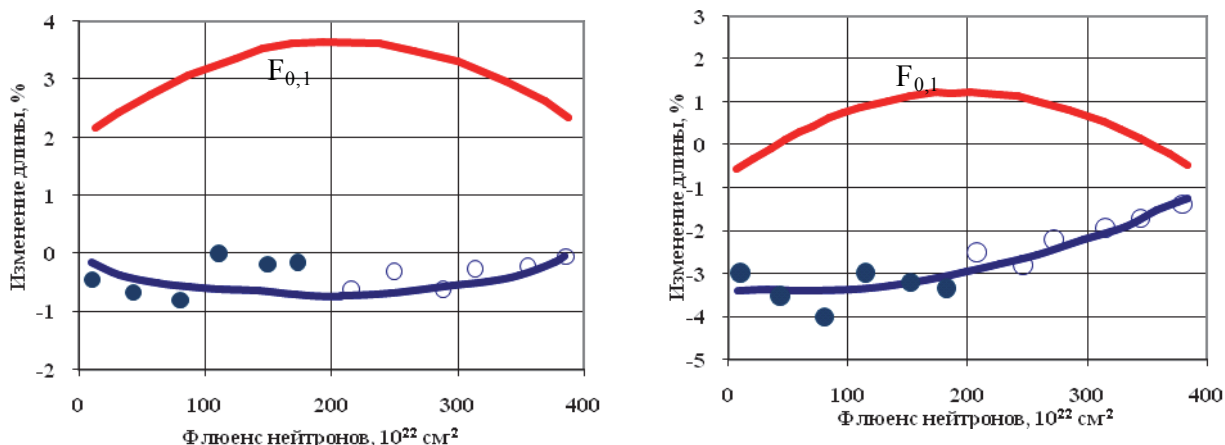


Рис. 3. Зависимость изменения диаметров макетов ПЭЛа от флюенса нейтронов ($F_{0,1}$) по высоте активной зоны реактора БОР-60 (○ – труба Hf $\varnothing 9,6$ мм; ● – пруток Hf $\varnothing 8,2$ мм): а – облучение в течение одной микрокампании; б – облучение в течение четырех микрокампаний

изготовлении изделий. По-видимому, следует ожидать существенных различий в радиационном росте при более высоких повреждающих дозах. Если проводить аналогию с цирконием, как структурным и химическим аналогом гафния, должен появиться и перелом кривой, связанный с резким возрастанием скорости радиационного роста (рис. 3).

2. Облучение в реакторе БОР-60

Обнаружено сильное влияние температуры облучения в совокупности с более жестким потоком нейтронов на радиационный рост гафния при облучении в ядерном реакторе на быстрых нейтронах БОР-60. Облучали прутки диаметром 8,2 мм и трубы диаметром 9,6 мм длиной около 100 мм из гафния марки ГФЭ-1 [2].

Облучение проводили в среде натрия, температура которого составляла 603-613 К на входе в активную зону и 630-640 К на выходе из зоны (в реакторе СМ-2 температура теплоносителя не превышала 560-570 К). Расчетная температура образцов гафния варьировалась в пределах 630-670 К. Максимальная плотность потока быстрых нейтронов составляла $(0,9 \pm 1,0) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ($E > 0,1$ МэВ), максимальный флюенс быстрых нейтронов – $3,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1$ МэВ). Одновременно облучали две одинаковые сборки. Первую сборку выгрузили после одной микрокампании, вторую – четырех.

После реакторного облучения наблюдалось анизотропное изменение размеров образцов гафния 3. При достижении флюенса быстрых нейтронов $1,1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1$ МэВ) длина прутков увеличилась на $(0,6 \pm 0,1)$ %, а диаметры уменьшились, соответственно, на 0,7% и 1,1%. При достижении флюенса $3,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1$ МэВ) диа-

метры прутка и трубы уменьшились на 2,4% и 3,1%. Измерить длину этих образцов не удалось из-за их искривления. Искривление произошло вследствие отсутствия достаточного аксиального зазора в облучательном устройстве. Прогиб составлял около 3 мм. С учетом прогиба и исходного аксиального зазора, максимальное увеличение длины макетов было оценено величиной не менее 3%.

Таким образом, в данной работе представлены результаты исследования радиационного роста гафния после облучения в реакторах СМ-2, СМ-3 и БОР-60. Исследована зависимость линейного и объемного радиационного роста гафниевых образцов от флюенса нейтронов и температуры облучения. Отмечены стадии радиационного роста: быстрый рост до флюенса $(5-7) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ и последующее насыщение.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рисованый В.Д., Захаров А.В., Клочков Е.П. Органы регулирования на основе гафния и титаната диспрозия для тепловых водоохлаждаемых реакторов // Сб.тр. Четвертой межотраслевой конф. по реакторному материаловедению, (г.Дмитровград, 15-19 мая, 1995 г.). Т.4. Дмитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1996. С.37–53.
2. Варлашова Е.Е., Рисованый В.Д., Клочков Е.П. и др. Размерная и структурная стабильность образцов гафния марки ГФЭ-1, облученных до высоких повреждающих доз // Сб. докл. Пятой международной конф. по реакторному материаловедению, г.Дмитровград, 8-12 октября, 1997 г. В 2-х томах. Т.1. Дмитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1998. С.143–154.
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-

вреждающих доз // Сб. тезисов докл. Пятой между-
народной конф. по реакторному материаловедению

(г.Дмитровград, 8-12 октября, 1997 г.) Дмитров-
град: ГНЦ РФ НИИАР, 1997. С.57.

RADIATION GROWTH OF HAFNIUM

© 2012 A.S. Kadochkin¹, E.M. Muraleva^{1,2}

¹Ulyanovsk State University

²Joint Stock Company "State Scientific Center Research Institute
of Atomic Reactors", Dimitrovgrad

This paper presents the results of a study of radiation growth of hafnium after irradiation in the SM-2, SM-3, and the BOR-60 reactors. The dependence of the linear and volume radiation growth of hafnium samples on neutron fluence and irradiation temperature is determined.

Keywords: hafnium, radiation growth, reactor study

*Alexey Kadochkin, Candidate of Physics and Mathematics,
Associate Professor at the Radiophysics and Electronics
Department. E-mail: askadochkin@sv.ulsu.ru
Elena Muraleva, Candidate of Technics, Research Fellow.
E-mail: muraleva@niiar.ru*