

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Чакина Владимира Павловича «Эволюция микроструктуры и физико-механических свойств бериллия при высокодозном нейтронном облучении», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность работы. В настоящее время бериллий является перспективным функциональным материалом будущего термоядерного реактора, в частности, планируется его использование в качестве нейтронного размножителя в бланкете и в качестве материала, обращенного к плазме, в первой стенке. Кроме того, бериллий уже широко используется в качестве отражателя или замедлителя реактора деления. Все эти аспекты использования бериллия в поле нейтронного излучения приняты во внимание в представленной диссертационной работе. Из литературы в общем и целом известно, что бериллий подвергается значительному радиационному повреждению при облучении интенсивным потоком быстрых нейтронов, однако детальная, систематизированная информация о характере радиационного повреждения и физических механизмах радиационной стойкости бериллия в условиях облучения быстрыми нейтронами, характерных для ядерного и термоядерного реакторов, в настоящее время отсутствует. Поэтому актуальность проведенных исследований является очевидной и не вызывает сомнений.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитированной литературы, включая опубликованные автором работы по теме диссертации. Каждая экспериментальная глава диссертации посвящена определенному виду экспериментальных исследований, объединенных общей темой.

В первой, методической главе представлено описание материалов, образцов, а также методик и методов, использованных в экспериментальных исследованиях, которые включают методики нейтронного облучения и последующих материаловедческих исследований облученного бериллия. Перечень методик послереакторных исследований включает структурные методы (металлография, сканирующая и трансмиссионная электронная микроскопия, рентгенография), а также термическую десорбцию газов, измерение радиационного распухания и теплопроводности, механические испытания. Комплекс экспериментальных исследовательских методик широк и вполне достаточен для решения задач данной диссертационной работы.

Во второй главе представлены микроструктурные исследования облученного бериллия. Исследованы изменения элементного состава,

Входящий ИЭСМ
№ 14
от 11.01.2017

включающие накопление газовых трансмутантов: атомов гелия и трития, и образование радиоактивных изотопов на примесных элементах. Автором широко использован метод ТЭМ, посредством которого исследованы образовавшиеся в бериллии радиационные дефекты, такие как дислокационные петли, газовые пузырьки и поры. Оптическая металлография применялась для исследований послереакторной эволюции исходной зернограничной пористости, которая существовала в бериллии еще до облучения, поскольку исследуемые марки бериллия, в основном, изготавливались методами порошковой металлургии.

В третьей главе представлены исследования термической десорбции гелия и трития из облученного бериллия, а также анализ полученных результатов с построением модели термодесорбции трития из бериллия. Автор при построении данной модели привлекал исследования микроструктуры облученного бериллия, в частности, исследования сечений бериллиевых микросфер на оптическом микроскопе. Используя методику термодесорбции, автор разработал способы расчета энергии активации десорбции трития из бериллия и коэффициента диффузии трития в бериллии. Особый интерес вызывают исследования влияния размера зерна и исходной пористости на эффективность термодесорбции трития из бериллия, изготовленного различными способами.

В четвертой главе представлены результаты исследований радиационного распухания бериллия, выполненные на материале, облученном в атомных реакторах: СМ. БОР-60, BR2 и HFR в широкой области температур и нейтронных флюенсов. Здесь же представлена модель анизотропного распухания бериллия, вклад в которое вносит также радиационный рост, явление, впервые обнаруженное и исследованное на бериллии именно в данной работе.

Пятая глава представляет исследования радиационного изменения теплопроводности бериллия. Полученные зависимости теплопроводности бериллия от температуры облучения и флюенса нейтронов обсуждаются с привлечением микроструктурных исследований. Представлена также разработанная автором модель радиационного изменения теплопроводности бериллия.

В шестой главе представлены результаты кратковременных и длительных механических испытаний облученного бериллия. Анализируются обнаруженные эффекты резкого снижения хрупкой прочности облученных бериллиевых образцов по испытаниям на растяжение и сжатие с увеличением флюенса нейтронов. Длительные испытания бериллиевых минисфер диаметрами 1 и 2 мм при постоянной нагрузке демонстрируют наличие явной зависимости скорости деформации от температуры облучения. Автором представлена также модель спонтанного разрушения облученного бериллия, которое вызывается анизотропным распуханием и радиационным ростом, что приводит к ослаблению границ и последующему зарождению на них трещин.

Диссертационная работа написана достаточно ясным языком, хорошо структурирована, оформлена в полном соответствии с требованиями по оформлению диссертаций. Имеющиеся в тексте работы заимствования из других литературных источников снабжены ссылками на первоисточники.

Научная новизна. Новизна исследований, в первую очередь, связана с отсутствием в настоящее время достаточного количества экспериментальных результатов на облученном бериллии в обоснование его радиационной стойкости. Автор провел исследования на современных марках бериллия с использованием современных методик послереакторных исследований после облучения бериллия до очень высоких нейтронных доз, что принципиально важно для определения эксплуатационного ресурса ядерных и термоядерных реакторов, основываясь на радиационной стойкости бериллия при больших дозах нейтронного облучения. К числу наиболее интересных и приоритетных результатов, представленных в диссертационной работе, например, относятся:

1. Впервые в облученном бериллии обнаружены дислокационные петли вакансионного типа, которые играют важную роль в понимании механизмов эволюции микроструктуры под действием нейтронного облучения.
2. Впервые установлены закономерности термодесорбции трития и гелия из облученного бериллия, а также механизмы ловушечного захвата и выхода из ловушек трития, что позволило построить непротиворечивую модель газовой выделения из бериллия, облученного нейтронами.
3. Впервые обнаружена неравномерность радиационного распухания бериллия с увеличением флюенса нейтронов, в частности, его ускорение в области максимальных доз, что связано с началом зернограничного растрескивания материала.
4. Впервые на бериллии обнаружено явление радиационного роста, ранее известное только для циркония. Радиационный рост вносит свой вклад в изменение размеров бериллиевого компонента или образца наряду с анизотропным распуханием зерен.
5. Впервые получена практически полностью отсутствующая ранее информация о влиянии нейтронного облучения на изменение теплопроводности бериллия и установлены основные закономерности этих изменений в зависимости от температуры облучения и флюенса нейтронов, построена соответствующая модель, основанная на связи эффектов снижения теплопроводности с параметрами радиационных дефектов.
6. Впервые проведен комплекс исследований механических свойств бериллия, облученного в широком интервале нейтронных доз. Обнаружен эффект резкого падения прочности при низких дозах с последующей стабилизацией уровня остаточной прочности при максимальных дозах.

7. Впервые автором предложены способы повышения ресурса бериллиевых компонентов в ядерном реакторе. Новизна предложенных технических решений подтверждена несколькими патентами Российской Федерации.

Научная и практическая ценность работы. Научная значимость данной работы определяется не только тем, что впервые проведен такой широкий комплекс экспериментальных исследований по влиянию нейтронного облучения на микроструктуру и свойства бериллия, но и тем, что полученные результаты позволяют существенно повысить общий уровень понимания физических явлений и механизмов радиационного повреждения не только в бериллии, но и в других металлах с кристаллической решеткой ГПУ.

Практическая значимость работы заключается в предложенных автором способах увеличения ресурса бериллиевых изделий в ядерном и термоядерном реакторах, полностью основанных на результатах проведенных исследований. В частности, интересен способ термообработки облученного бериллия в области промежуточных температур, что позволяет нивелировать накопившиеся радиационные повреждения, и продолжить эксплуатацию изделия в условиях нейтронного облучения. Немаловажен и тот факт, что на предложенные технические решения получены патенты Российской Федерации.

Достоверность полученных результатов. Достоверность результатов диссертационной работы обусловлена использованием широкого круга современных и в обязательном порядке аттестованных исследовательских методик. Всегда полученные результаты перепроверялись автором на двух-трех дублирующих образцах или даже большем количестве, что зависело от имеющихся образцов, облученных быстрыми нейтронами при данных, конкретных параметрах. Анализ полученных результатов выполнен с использованием современных подходов физики конденсированного состояния, в частности, физики радиационных повреждений металлов.

К **вопросам и замечаниям** по диссертационной работе следует отнести следующие:

1. Известно, что в настоящее время в качестве основного вида бериллиевых минисфер для засыпки бланкета международного термоядерного реактора ИТЭР принят одноразмерный вариант, минисферы диаметром 1 мм. В такой засыпке присутствуют значительные зазоры между минисферами, что снижает эффективность размножения нейтронов. Почему не используются и, соответственно, не исследуются двух- или трехразмерные варианты, например, засыпка минисфер диаметрами 0,2 и 1 мм или 0,2, 0,5 и 1,2 мм? Это бы значительно увеличило плотность засыпки и повысило коэффициент размножения нейтронов.

2. Во второй главе диссертации представлены микроструктурные исследования облученного бериллия, включая анализ накопления газовых трансмутантов: атомов гелия и трития, а также образование радиоактивных изотопов на примесных элементах. При этом с использованием ТЭМ проведены экспериментальные исследования образовавшихся в бериллии кластеров радиационных дефектов, таких как дислокационные петли, газовые пузырьки и поры. Однако в диссертации отсутствует анализ физических механизмов образования кластеров этих радиационных дефектов.

3. В третьей главе представлены экспериментальные исследования термической десорбции гелия и трития из облученного бериллия и проведен анализ полученных результатов с построением модели термодесорбции трития из бериллия. Однако модель термодесорбции газовых атомов гелия и трития должна учитывать образовавшиеся в бериллии под действием нейтронного облучения точечные радиационные дефекты: вакансии и межузельные атомы, с которыми должны взаимодействовать газовые атомы. Обсуждение этого момента отсутствует в диссертации.

4. В четвертой главе представлены экспериментальные результаты исследований радиационного распухания бериллия, выполненные на этом материале, облученном в различных атомных реакторах: СМ, БОР-60, BR2 и HFR в широкой области температур и нейтронных флюенсов, включая также впервые обнаруженный эффект радиационного роста облученного бериллия. В диссертации приводятся ссылки на опубликованные работы по теоретическим моделям радиационного распухания облученного бериллия (смотри стр.168, ссылки [141, 142]). Вместе с тем в диссертации отсутствует сравнение экспериментальных и теоретических результатов по температурным и дозовым зависимостям радиационного распухания, полученным при облучении бериллия в различных атомных реакторах.


Рекомендации по использованию работы.

Результаты диссертационной работы полезны для специалистов-материаловедов и конструкторов, занимающихся разработкой функциональных материалов для ядерных и термоядерных реакторов. В работе присутствуют конкретные практические рекомендации, которые могут быть использованы при усовершенствовании имеющихся и разработке новых проектов бериллиевых компонентов реакторов. В частности, можно рекомендовать результаты диссертационной работы к использованию в следующих российских научных организациях: НИКИЭТ, ВНИИНМ, Курчатовский институт, а также европейских – Fusion for Energy, Eurofusion, EFDA.

Характеристика диссертационной работы. Сделанные замечания и поставленные вопросы не снижают уровень диссертационной работы и не влияют на положительную оценку в целом. Представленные в работе результаты опубликованы, в основном, в специализированных зарубежных научных журналах, прошли апробацию в целом ряде значимых международных конференций и рабочих групп, специализирующихся на материалах термоядерного реактора и, в частности, на бериллии. Автор хорошо известен в кругу специалистов, занимающихся проблемами материалов ТЯР. Диссертация Чакина В.П. является законченным научным трудом, научно-квалификационной работой, логически обоснованной и цельной. Автореферат адекватно и полно отражает содержание диссертации, положения, выносимые на защиту, и заключение по работе.

Результаты, полученные в работе, квалифицируются как важные научные достижения в области физики радиационных повреждений бериллия. Ясно прослеживаются при этом пути практического использования полученных в работе результатов. Таким образом, диссертационная работа Чакина В.П. отвечает требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук (п. II.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденное постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013), а также соответствует паспорту специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния. Считаю, что автор работы Чакин Владимир Павлович заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

**Руководитель отделения Физики Твердого Тела и
Радиационного Материаловедения Курчатовского
Ядерно-физического Комплекса
Национального исследовательского центра
"Курчатовский институт",
доктор физ.- мат. наук, профессор**


А.И.Рязанов
(Александр Иванович Рязанов)

**Подпись руководителя отделения Физики Твердого Тела и
Радиационного Материаловедения Курчатовского Ядерно-Физического
Комплекса Национального исследовательского центра «Курчатовский
Институт» А. И. Рязанова заверяю.**

**Главный ученый секретарь
Национального исследовательского центра
«Курчатовский Институт», кандидат физ.- мат. наук**


С.Ю. Стремоухов

30.12.2016

Адрес:
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)
123182, Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1
Телефон: +7(499) 196-9539
e-mail: nrcki@nrcki.ru