

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

Диссертационная работа В.П. Чакина посвящена исследованиям микроструктуры и физико-механических свойств бериллия после облучения в широких интервалах температур и флюенсов нейтронов, а также поиску путей увеличения ресурса бериллиевых изделий и компонентов в ядерных и термоядерных реакторах.

Актуальность проблемы

Объектом исследований диссертационной работы является бериллий – металл с уникальными ядерно-физическими свойствами, обуславливающими его широкое применение в качестве функционального материала ядерных энергетических установок. Несмотря на достаточно широкий опыт использования бериллия в качестве отражателя и замедлителя нейтронов исследовательских ядерных реакторов и прогнозируемую перспективу его применения в качестве размножителя нейтронов в термоядерных реакторах будущего, детальной информации о поведении этого материала в поле интенсивного нейтронного излучения в настоящее время еще крайне мало. В связи с этим тема диссертационной работы В.П. Чакина, посвященной выявлению физических закономерностей эволюции микроструктуры и изменений физико-механических свойств бериллия в результате воздействия нейтронного облучения, с целью прогнозирования состояния и ресурса бериллиевых конструкций и увеличения его радиационной стойкости, является, безусловно, актуальной и важной.

Знакомство с материалом работы позволяет также отметить, что вклад автора в решение проблем радиационного повреждения бериллия является весьма существенным. Особенно важными являются установленные автором впервые корреляции между характером радиационно-индуцированных повреждений бериллия и его физико-механическим состоянием после облучения.

Структура и основное содержание диссертации

Диссертация включает в себя введение, шесть глав, заключение и библиографический список из 207 наименований. В **первой главе** автор приводит описание материалов и образцов, использованных в работе, а также условий нейтронного облучения и методов послереакторного исследования. Последние включают в себя структурные методы, такие как оптическая металлография, сканирующая и трансмиссионная электронная микроскопия, рентгенография, а также методы исследования термодесорбции трития и гелия, определения распухания и теплопроводности и процедуры механических испытаний. Необходимо отметить, что комплекс использованных методов и методик выбирался, исходя из критериев их необходимости и достаточности для решения сформулированных задач. Используемые методики исследования облученных материалов, по их содержанию и техническим характеристикам оборудования, отвечают достигнутому на сегодняшний день мировому уровню.

Во **второй главе** В.П. Чакиным представлены выполненные им исследования микроструктуры облученного бериллия, в частности, описаны радиационные изменения элементного состава, включающие накопление газов трития и гелия на реакциях нейтронов с бериллием и образование радиоактивных изотопов на примесях. Большое внимание уделено изучению методом ТЭМ образующихся в бериллии радиационных дефектов в различных условиях облучения: при низкой и высоких температурах, а также после низкотемпературного облучения с последующим высокотемпературным отжигом. Отдельно

Входящий ИЯСМ
№ 1005
от 30.12.2016

описана эволюция в ходе облучения так называемой технологической пористости, которая формируется при изготовлении компактного бериллия методами порошковой металлургии.

Третья глава посвящена исследованиям термической десорбции трития и гелия из облученного бериллия и интерпретации полученных результатов с использованием проведенных на оптическом микроскопе структурных исследований облученных бериллиевых минисфер. В главе описывается также модель термодесорбции трития из бериллия. Выполнен оригинальный расчет энергии активации десорбции, а также проведены расчеты коэффициента диффузии трития в бериллии. Представлены результаты исследования влияния размера зерна и исходной пористости на параметры термической десорбции трития из марок бериллия, изготовленных различными методами.

В **четвертой главе** автором изложены результаты выполненного им исследования процесса набухания бериллия, облученного при низких и высоких температурах, а также бериллия, облученного при низкой температуре, после высокотемпературных отжига. Заслуживает особого внимания описание обнаруженного В.П. Чакиным впервые явления радиационного роста на облученном бериллии, ранее известного только для циркония.

Пятая глава посвящена исследованиям влияния нейтронного облучения на изменение теплопроводности бериллия. Экспериментально получены зависимости теплопроводности бериллия от температуры облучения и флюенса нейтронов. Предложена модель радиационно-индуцированных структурных изменений бериллия при нейтронном облучении.

В **шестой главе** автором приведены результаты механических испытаний облученного бериллия, в частности, кратковременных испытаний на растяжение и сжатие гантелеобразных и цилиндрических образцов перспективных марок бериллия и длительных испытаний бериллиевых минисфер диаметрами 1 и 2 мм. Представлены результаты измерения микротвердости. Рассмотрена модель самопроизвольного разрушения облученного бериллия в результате анизотропного набухания зерен и последующего ослабления границ.

Диссертационная работа логично изложена, хорошо структурирована и аккуратно оформлена. Все заимствования из литературных источников снабжены соответствующими ссылками, в том числе на работы коллег и работы автора с участием коллег.

Новизна проведенных исследований

В рамках диссертации впервые представлены результаты систематических исследований микроструктуры и физико-механических свойств бериллия, подвергнутого воздействию нейтронного облучения в широких интервалах температур и флюенсов нейтронов. Исследования проведены на современных марках бериллия с помощью самых современных методов экспериментальной физики.

Впервые получены следующие результаты:

- установлены закономерности изменения микроструктуры бериллия в зависимости от условий облучения и послерадиационного отжига, объяснена физическая природа процесса формирования дислокационных петель в бериллии при низкотемпературном облучении, определены кристаллографические плоскости залегания дислокационных петель и шестигранных плоских газовых пор, предложен способ очистки облученного бериллия от радиоактивных примесей, новизна которого подтверждена патентом Российской Федерации;

- установлены закономерности термической десорбции трития и гелия, построена модель газовой выделения из облученного бериллия;

- получены экспериментальные данные о набухании бериллия в зависимости от температуры облучения и флюенса нейтронов (с учетом применения высокотемпературного отжига); обнаружены эффекты неравномерной скорости набухания при изменении флюенса нейтронов и по сечению облученного образца бериллия; обнаружено явление радиационного роста бериллия;

- установлены закономерности изменения теплопроводности бериллия от температуры облучения и флюенса нейтронов;

- получены ключевые экспериментальные результаты по изменению микротвердости и кратковременных механических свойств на растяжение и сжатие в зависимости от флюенса нейтронов в широкой области температур облучения;

- выполнены длительные механические испытания на сжатие облученных бериллиевых минисфер диаметром 1 и 2 мм, по результатам которых установлено, что скорость деформации всегда превышает скорость распухания минисфер;

- впервые предложены способы увеличения ресурса бериллиевых изделий в ядерном реакторе, новизна которых подтверждена тремя патентами на изобретение Российской Федерации.

Достоверность полученных результатов

Все результаты и выводы по диссертационной работе достаточно надежно обоснованы и не вызывают каких-либо сомнений. Что касается структурных исследований, автором использованы несколько взаимодополняющих (и даже, в какой-то степени, дублирующих) методов изучения микроструктуры облученного бериллия: таких как оптическая металлография, растровая и трансмиссионная электронная микроскопия. При этом исследовались не менее трех образцов бериллия одной марки, облученных в одних и тех же условиях. Аналогичный подход был использован и в других послереакторных исследованиях. В частности, в испытаниях на термодесорбцию (минисфер диаметром 0,5 и 1 мм) автор использовал навески, включающие от десяти до сотни минисфер и более. При исследовании распухания бериллия проводились измерения не менее десяти бериллиевых образцов на каждое облученное состояние. Температуропроводность импульсным методом измерялась на облученных бериллиевых образцах с использованием дополнительных образцов для проверочных тестов. Кратковременные и длительные механические испытания на растяжение и сжатие проводились на двух-трех образцах для каждого режима облучения. Исследовательское оборудование было аттестовано российскими и германскими метрологическими организациями в зависимости от места проведения исследований. Предложенные автором модели поведения бериллия под облучением надежно обоснованы.

Значимость полученных результатов для науки и практики

Результаты рецензируемой работы доложены более чем на 30 международных и российских научных конференциях и получили высокую оценку специалистов в области радиационной физики конденсированного состояния вещества. Они опубликованы в 46 научных статьях, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

В 2015 г. на 12-й Международной конференции по бериллиевой технологии (Дежу, Республика Корея) В.П. Чакину была вручена престижная научная Премия памяти профессора Марио Далле Донне.

Полученные в диссертационной работе результаты имеют важное **научное значение**. Они вносят существенный вклад в понимание механизмов радиационного повреждения бериллия. Получены уникальные данные об образовании различного типа радиационных дефектов в зависимости от температуры облучения и флюенса нейтронов и установлена связь радиационно-индуцированной микроструктурной эволюции с уровнем физико-механических свойств бериллия.

Важнейшее **практическое значение** имеет вытекающая из результатов проведенных исследований возможность прогнозирования состояния и ресурса бериллиевых изделий и компонентов, используемых в ядерных и термоядерных реакторах, что подтверждается наличием четырех патентов на изобретения по теме диссертации.

Замечания и пожелания к работе:

1. Хотелось бы выяснить, почему автором не проведено определение энергии активации термической десорбции гелия из бериллия? При этом методика Редхеда в работе успешно использована для расчета энергии активации десорбции трития. Расчет для гелия позволил бы более строго обосновать предложенную модель десорбции этих газов из бериллия, в частности, объяснить выход гелия при более высоких температурах по сравнению с тритием.

2. Почему не проведено количественное разделение вклада явления радиационного роста и явления анизотропного набухания зерен в итоговое изменение размеров облученного бериллия. Из текста диссертации не ясно, какое явление превалирует. Вполне можно предположить, что вклад радиационного роста в увеличение размеров облученного бериллиевого образца вообще пренебрежимо мал, и его можно не учитывать.

3. В диссертации приводятся и анализируются результаты по изменению теплопроводности бериллия после облучения в температурном интервале 70-400°C, хотя значимыми для бланкета ТЯР являются значительно более высокие рабочие температуры, вплоть до 650°C. Почему не проведены подобные измерения для высоких температур облучения (что было бы полезно с практической точки зрения)?

Общая характеристика диссертационной работы.

Сделанные замечания не затрагивают существо основных результатов и выводов по работе и не снижают ее общей положительной оценки.

Диссертация Чакина В.П. представляет собой весьма добротное, трудоемкое и важное научное исследование. Полученные в работе результаты можно квалифицировать как новое научное направление в физике радиационного материаловедения бериллия, базирующееся на учете закономерностей дефектообразования, накопления и десорбции изотопов водорода в зависимости от условий облучения, во взаимосвязи с физико-механическими свойствами бериллия.

Автореферат диссертации адекватно и полно отражает основное содержание диссертации.

В целом, с учетом вышесказанного, считаю, что рецензируемая диссертационная работа обладает несомненной научной новизной, а также высокой научной и практической ценностью. Она полностью отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук (п. II.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней») и соответствует паспорту специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния». Автор же рассматриваемой диссертационной работы, Чакин Владимир Павлович, безусловно, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени доктора физико-математических наук по вышеуказанной специальности.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, профессор, заведующий лабораторией пучковых воздействий Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

Овчинников Владимир Владимирович

Адрес: 620016, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106
Тел.: +7 904 38 36 360; +7(343)267-87-74
E-mail: vladimir@iep.uran.ru, viae05@rambler.ru

Подпись Овчинникова Владимира Владимировича заверяю, ученый секретарь института кандидат физико-математических наук



23, 12, 2016

Кокорина Е.Е.