

## РЕЗУЛЬТАТЫ

публичной защиты диссертации на соискание степени доктора наук

Соискатель: Чакин Владимир Павлович

Диссертация на тему «Эволюция микроструктуры и физико-механических свойств бериллия при высокодозном нейтронном облучении» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

## РЕШЕНИЕ

ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.080.03

ОТ 26.01.2017 Г.

О ПРИСУЖДЕНИИ ЧАКИНУ ВЛАДИМИРУ ПАВЛОВИЧУ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

На основании публичной защиты диссертации Чакина Владимира Павловича на тему «Эволюция микроструктуры и физико-механических свойств бериллия при высокодозном нейтронном облучении» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», диссертационный совет Д 002.080.03 тайным голосованием принял решение присудить искомую степень.

Протокол № 1/17 от 26 января 2017 г.

На заседании присутствовали 15 членов диссертационного совета.

*Председатель:* член-корреспондент РАН, д. физ.-мат.наук, Мулюков Радик Рафикович.

*Члены совета:* д. физ.-мат.наук Назаров Айрат Ахметович, д. физ.-мат.наук Имаев Марсель Фанирович, д. физ.-мат.наук Александров Игорь Васильевич, д. физ.-мат.наук Астанин Владимир Васильевич, д. техн.наук Валитов Венер Анварович, д. физ.-мат.наук Зарипов Наиль Гарифьянович, д. техн.наук Имаев Валерий Мазитович, д. техн.наук Имаев Ренат Мазитович, д. техн.наук Корзникова Галия Фердинандовна, д. техн.наук Лутфуллин Рамиль Яватович, д. техн.наук Маркушев Михаил Вячеславович, д. физ.-мат.наук Мигранов Наиль Галиханович, д. техн.наук Утяшев Фарид Зайнуллаевич, д. физ.-мат.наук Юмагузин Юлай Мухаметович.

Результаты голосования:

за присуждение ученой степени – 15,

против присуждения ученой степени – 0,

недействительных бюллетеней – 0.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.080.03

М.Ф. Имаев

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.080.03

на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук (ФГБУН ИПСМ РАН) по диссертации на соискание ученой степени доктора наук

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 26 января 2017 г., протокол № 1/17

О присуждении Чакину Владимиру Павловичу, гражданину РФ, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Эволюция микроструктуры и физико-механических свойств бериллия при высокодозном нейтронном облучении» по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» принята к защите 13 октября 2016 г., протокол № 14/16, диссертационным советом Д 002.080.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, адрес: 450001, г. Уфа, ул. Степана Халтурина, 39, Приказ Министерства образования и науки РФ о создании совета - № 785/нк от 10.07.2015 г.

Соискатель Чакин Владимир Павлович, 1957 года рождения.

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Радиационное охрупчивание низколегированных сплавов хрома и сплавов хром-железо при нейтронном облучении» защитил в 1996 году в диссертационном совете Д 003.15.03, созданном на базе Института металлургии им. А.А. Байкова.

Соискатель работает по контракту старшим научным сотрудником в Отделе физики прикладных материалов Института прикладных материалов Института технологии Карлсруэ, Германия.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный университет».

Научный консультант – доктор физико-математических наук, **Голованов Виктор Николаевич**, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный университет», проректор УлГУ по науке и информационным технологиям.

Официальные оппоненты:

1. **Рогожкин Сергей Васильевич**; доктор физико-математических наук; профессор; профессор кафедры физики экстремальных состояний вещества Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва;

2. **Рязанов Александр Иванович**; доктор физико-математических наук; профессор; руководитель отделения физики твердого тела и радиационного материаловедения Курчатовского ядерно-физического комплекса Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), г. Москва;

3. **Овчинников Владимир Владимирович**; доктор физико-математических наук; профессор; заведующий лаборатории пучковых воздействий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация – Государственный научный центр Российской Федерации Акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»), г. Москва, в своем положительном заключении,

подписанном академиком Российской академии наук, профессором, доктором физико-математических наук **Пономаревым Леонидом Ивановичем**, указала, что диссертационная работа Чакина В.П. выполнена на актуальную тему и представляет собой логически выстроенную и завершённую научно-исследовательскую работу.

Соискатель имеет 92 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации 46 работ, из них 30 опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ и в ведущих международных журналах. Сорок шесть публикаций по теме диссертации являются научными статьями и четырьмя патентами на изобретение Российской Федерации, написанными лично автором (либо при его непосредственном участии) их общий объём – 16 печатных листов.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Заведующего лабораторией № 33 ядерного реактора Физико-технического института Томского политехнического университета, д. т. н. **Варлачева В.А.** Отзыв положительный, имеется 2 замечания: **1.** Не вполне ясен механизм ускоренного увеличения распухания бериллия при низкотемпературном облучении и высоких флюенсах нейтронов. В частности, в какой пропорции делят этот вклад между собой эффекты накопления трансмутированного гелия и утолщения границ зерен вследствие анизотропного распухания отдельных кристаллитов? **2.** Почему в бланкете ТЯР используется концепция засыпки бериллиевых минисфер, а не просто пластины компактного бериллия по размерам бланкета? Если при облучении в бериллии образуется объемно-связанная система пор, через которую радиоактивный тритий эффективно выходит наружу, зачем проводить фрагментацию пластин на минисферы, если такая же система пор будет образовываться и в пластинах? Для чего изготавливать дорогостоящие минисферы, если можно обойтись пластинами.
2. Директора Института микро- и нанотехнологий Оренбургского государственного университета, д. ф.-м. н., проф. **Легуты С.Н.** Отзыв положительный, без замечаний.

3. Профессора кафедры Общей физики и ядерного синтеза Национального исследовательского университета «МЭИ», д. ф.-м. н. **Будаева В.П.** Отзыв положительный, имеется 1 замечание: **1.** В термоядерном токамаке-реакторе ИТЭР для облицовки первой стенки будет использоваться бериллий марки ТПП-56ПС российского производства, не исследованный в диссертации. Следует испытать бериллий марки ТПП-56ПС в будущих экспериментах с нейтронным облучением большими дозами.

4. Директора Института бериллия ОАО «Композит» **Струли И.Л.** Отзыв положительный, имеется 2 замечания: **1.** В диссертации нет главы, посвященной аналитическому обзору литературы – одной из основных составляющих научно-исследовательской работы. При изложении в автореферате содержания глав есть упоминания об отдельных публикациях или об их отсутствии. Например, при изложении содержания главы 5 «Изменение теплопроводности бериллия при облучении» указано: «К началу наших исследований в литературе отсутствовали данные по влиянию облучения на теплопроводность металлического бериллия», в главе 6 «Изменение механических свойств бериллия при облучении» рассмотрен материал, опубликованный в монографии Г.А. Серняева «Радиационная повреждаемость бериллия», но ссылок на другие работы нет. Отсутствие аналитического обзора литературы затрудняет определение места выполненной работы в ряду других исследований, посвященных выбранной теме. **2.** Следует также отметить, что не объяснен большой разброс результатов измерения микротвердости бериллия, облученного при температуре 473 К (с. 36, рисунок 20), в частности, не указаны условия проведения эксперимента – отличались ли образцы, на которых определяли микротвердость, наблюдали ли отличие микроструктуры исследуемых образцов, нет статистической оценки полученных результатов – не приведены параметры регрессионной модели, описывающей результаты измерения

микротвердости, нет статистической оценки адекватности выбранной регрессионной модели экспериментальным данным.

5. Советника АО «Институт реакторных материалов», д.т.н. **Козлова А.В.** Отзыв положительный, имеется 4 замечания: **1.** В разделе «Научная новизна» автор часто и не всегда обоснованно использует слово «Впервые». Начиная с: «В частности, впервые получены следующие результаты. 1.Получены закономерности изменения микроструктуры бериллия в зависимости от параметров облучения...». На самом деле определенные закономерности в этом поле были установлены и другими авторами (например, Г.А. Серняевым). Автор данной диссертации расширил это поле, но, в то же время, не исчерпал его. **2.** В п.2 того же раздела говорится: «Впервые обнаружено, что в процессе облучения в реакторе при повышенных температурах происходит самопроизвольный выход трития из бериллия...». Факт выхода из бериллия трития (если он в бериллии присутствует) при повышенных температурах известен и ранее из экспериментов по десорбции, причем независимо от того, в реакторе достигнута температура, при которой тритий в бериллии обретает подвижность, или вне реактора. Другое дело, что в реакторе это может происходить при более низкой температуре, поскольку облучение ускоряет все диффузионные процессы. Так что можно говорить о характерных температурах, при которых начинается процесс, но не об обнаружении самого факта выхода трития. **3.** В п.3 того же раздела говорится: «... распухание в центре значительно выше, чем на поверхности, при этом впервые зафиксировано распухание порядка 190 % в центре образца...». В то же время в описании содержания главы 4 на стр. 29 написано: «В таблице 2 представлено расчетное распухание бериллия...». Значение 190 % взято из таблицы 2, и считать это вызывающее серьезные сомнения значение распухания 190 %, является зафиксированным, нет оснований. Это, как минимум, требует экспериментальной проверки (например, методами ПЭМ, чего в автореферате не приведено). Согласно теории перколяции, при случайном расположении пор

самопроизвольное разрушение тела происходит уже при втрое меньших распуханиях, чем 190 %. **4.** В п.6 того же раздела говорится о том, что, согласно измерениям микротвердости, в облученных бериллиевых образцах наблюдается упрочнение, а согласно результатам механических испытаний на аналогичных образцах, облученных в тех же условиях, происходит охрупчивание и разупрочнение! Это тоже установлено впервые. В утверждении заключено логическое противоречие, и, чтобы его снять, надо определить, что подразумевает термин «упрочнение». Обычно под упрочнением подразумевают увеличение условного предела текучести, и в качестве количественной характеристики берут его относительное удлинение. При этом ни микротвердость, ни предел прочности не являются мерой упрочнения. В ряде случаев микротвердость коррелирует с пределом текучести, в других случаях с ним коррелирует предел прочности. Так что при изложении этих вопросов в работе требуется наделить термин «упрочнение» определенным смыслом.

6. Заведующего кафедрой «Обработка металлов давлением» Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева, д.т.н., профессора, академика РАН **Гречникова Ф.В.**, профессора кафедры «Обработка металлов давлением» Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева, д.т.н., профессора **Попова И.П.** Отзыв положительный, без замечаний.

7. Профессора кафедры теоретической физики Национального исследовательского Мордовского государственного университета, д.ф.-м.н., доцента **Шорохова А.В.** Отзыв положительный, имеется 1 замечание: **1.** В качестве замечания хотелось бы отметить практическое отсутствие в автореферате ссылок на работы других исследователей, что затрудняет оценку научной новизны и личного вклада диссертанта.

8. Заведующего лабораторией физики наноструктурных материалов ФГБУН Института физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра РАН, д.ф.-м.н. **Гундерова Д.В.** Отзыв положительный, имеется 1 замечание: **1.** После нейтронного облучения при температурах 673-968 К обнаружено формирование плоских шестигранных газовых пор. Образование пор такой правильной формы – безусловно интересный результат. И желательно было дать объяснение физических механизмов образования пор подобной формы.

9. Начальника отдела 6 ОИРМиТ АО «ГНЦ РФ - ФЭИ», д.ф.-м.н., доцента **Плаксина О.А.** Отзыв положительный, имеется 1 замечание: **1.** Следовало бы отметить важность полученных в диссертации результатов в области разработки и использования источников нейтронов на основе бериллия в активных зонах ядерных реакторов.

В отзывах указано, что представленная работа имеет большое научное и практическое значение и по своей новизне и актуальности соответствует требованиям ВАК к докторским диссертациям.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что они являются компетентными в данной отрасли науки, широко известны своими достижениями в данной области и способны определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана научная концепция улучшения радиационной стойкости бериллия и изделий из него при высокодозном нейтронном облучении;

предложены оригинальные научно-обоснованные объяснения характера и количественных характеристик воздействия нейтронного облучения на микроструктуру и физико-механические свойства бериллия;

установлены и систематизированы закономерности эволюции микроструктуры и физико-механических свойств бериллия в зависимости от параметров нейтронного облучения;

предложена новая интерпретация такого классического понятия в радиационном материаловедении как «распухание», которое обозначает увеличение объема металла за счет радиационных трансмутантов, гелиевых атомов и скопления вакансий; в частности, на третьей стадии дозной зависимости распухания ускоренный рост распухания объяснен зарождением и лавинообразным распространением зернограничных трещин, вследствие чего происходит увеличение объема границ и, соответственно, увеличение объема материала.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны положения, вносящие вклад в расширение представлений о физике радиационных повреждений металлов в целом и, в частности, бериллия, закономерностях образования радиационных дефектов в бериллии при нейтронном облучении в широких интервалах температур и флюенсов нейтронов, включая ранее никогда не исследовавшийся эффект влияния высоких нейтронных доз;

применительно к проблематике диссертации результативно использован подход Редхеда к определению энергии активации термической десорбции трития из облученного бериллия;

изложены закономерности радиационного охрупчивания и разупрочнения облученного бериллия, происходящего вследствие ослабления границ из-за анизотропного распухания и радиационного роста зерен вследствие накопления трансмутированного гелия и образования дислокационных петель вакансионного и междоузельного типов;

объяснен эффект замедленного распухания современных марок бериллия по сравнению со старыми марками при высоких температурах нейтронного облучения;

изучены причинно-следственные связи радиационных изменений микроструктуры с изменениями физико-механических свойств бериллия, в частности, построены модели радиационно-индуцированной самопроизвольной десорбции трития из бериллия в процессе облучения, значительного снижения теплопроводности при облучении, разупрочнения бериллия по результатам механических испытаний на растяжение и сжатие вследствие воздействия нейтронного облучения; проведена модернизация существующей модели радиационного распухания бериллия.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и прошли экспериментальную проверку способы безопасной эксплуатации бериллиевых изделий в ядерных реакторах и метод переработки облученных бериллиевых отходов, в частности, предложенные параметры эксплуатации бериллиевых изделий в ядерном реакторе внесены в соответствующий технологический регламент;

определены критические пределы влияния нейтронного облучения на физико-механические свойства бериллия; полученные экспериментальные результаты вошли в научные базы данных радиационного материаловедения и физики радиационного повреждения бериллия и теперь могут быть востребованы при разработке новых экспериментальных аппаратов, где бериллий будет находиться в поле нейтронного излучения;

предложены практические рекомендации по рабочим параметрам эксплуатации бериллиевого размножителя нейтронов в бланкете будущего термоядерного реактора;

разработаны рекомендации по увеличению ресурса бериллиевых изделий при нейтронном облучении в исследовательских ядерных реакторах путем улучшения конструкции существующих изделий.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты исследований микроструктуры облученного бериллия получены на сертифицированных оптическом и сканирующем растровом и трансмиссионном электронных микроскопах, физико-механических свойств – также на сертифицированных приборах и установках, в частности, все исследовательское оборудование было аттестовано российскими или германскими метрологическими организациями; каждым методом было исследовано не менее трех образцов каждой марки бериллия, облученной в ядерном реакторе при сопоставимых параметрах;

теории и модели построены на известных, проверяемых и воспроизводимых результатах, которые согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации, то есть радиационному повреждению бериллия;

идея работы базируется на анализе практики эксплуатации бериллиевых изделий в ядерных реакторах и технических требованиях к конструкции термоядерного реактора будущего;

использованы для сравнения с авторскими результатами данные по радиационной повреждаемости бериллия, полученные исследователями в прошлые годы;

установлена качественная и, чаще всего, и количественная корреляция авторских результатов с результатами других исследователей, представленными в реферируемых научных журналах по теме радиационного повреждения кристаллических материалов, например, по измеренному в работе коэффициенту диффузии трития в бериллии;

использованы современные методики сбора и статистической обработки исходной и полученной информации, а также эффективные методы визуализации и представления полученных результатов.

Личный вклад соискателя заключается в выборе направления исследования, выработке цели исследования, постановке задач и разработке плана работ,

определении круга экспериментальных методов необходимых и достаточных для выполнения намеченного плана, непосредственном личном участии в получении исходных данных и научных экспериментах, апробации результатов исследования, разработке необходимых экспериментальных стендов и установок, обработке и анализе полученных результатов с последующим оформлением в виде научных публикаций по выполненной работе. Все этапы экспериментальных исследований выполнены либо лично соискателем, либо при его активном непосредственном участии.

На заседании 26 января 2017 г. диссертационный совет принял решение присудить Чакину В.П. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве «15» человек, из них «7» докторов наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», «8» докторов наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», участвовавших в заседании, из «21» человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – «15», против присуждения ученой степени – «0», недействительных бюллетеней – «0».

Председатель диссертационного совета,

д. ф.-м. н.

Ученый секретарь диссертационного совета,

д. ф.-м. н.



Мулюков Радик Рафикович

Имаев Марсель Фанирович

27 января 2017 г.