

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 проблемы

Бериллий, обладая уникальными ядерно-физическими свойствами, сегодня широко используется в качестве замедлителя и отражателя нейтронов ядерных реакторов и является перспективным материалом термоядерных реакторов, где он планируется к использованию в качестве материала, обращенного к плазме, в первой стенке или нейтронного размножителя в бланкете. Однако информации о характере и степени радиационной повреждаемости бериллия в настоящее время явно недостаточно, что в значительной степени затрудняет работу конструкторов, работающих над проектами термоядерных реакторов следующего поколения, в которых конструкционные и функциональные материалы будут подвергаться высокодозному нейтронному облучению. Поэтому представленная диссертационная работа чрезвычайно своевременна и актуальна, поскольку направлена на решение проблемы повышения радиационной стойкости бериллия, изделий и компонентов из него.

Структура и основное содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. В главе 1 представлено описание материалов, образцов и методик облучения и последующих исследований. Микроструктура облученного бериллия исследовалась на оптическом, растровом и просвечивающем электронном микроскопах. Распухание измерялось гидростатическим методом и по изменению геометрических размеров. Исследования механических свойств включали механические испытания на растяжение и сжатие, измерения микротвердости, а также испытания на ползучесть. Температуропроводность измерялась импульсным методом. Кроме того, в работе использовалась методика термодесорбционных испытаний, позволяющие получить важные с точки зрения безопасности данные по характеристиками десорбции трития из бериллия. Выбор широкого круга исследовательских методик отвечает поставленными задачами диссертационной работы.

Микроструктурные исследования облученного бериллия представлены в главе 2. Проведено изучение изменений элементного состава бериллия в результате воздействия облучения, то есть накопления трития и гелия, а также радиоактивных изотопов, образующихся на примесях. Автор широко использовал просвечивающий электронный микроскоп для исследований радиационных дефектов в бериллии. По результатам этих исследований построена модель эволюции микроструктуры бериллия после облучения в широких интервалах температур и флюенсов нейтронов.

Входящий ИИСМ
№ 997
от 27.12.2016

В глава 3 представлены результаты исследований термодесорбции трития и гелия из облученного бериллия, на основании которых построена модель десорбции трития и гелия. Автором рассчитана энергия активации десорбции трития и коэффициент диффузии трития в бериллии, а также исследовано влияние размера зерна на характеристики десорбции трития из бериллия, изготовленного по различным технологиям.

Исследование распухания бериллия проведено в главе 4. Измерялось распухание на образцах бериллия, облученных при низких и высоких температурах, а также после последующих высокотемпературных отжигов. Здесь же описано явление радиационного роста бериллия. Автором делается заключение, что итоговое изменение размеров образца бериллия после облучения при низкой температуре обусловлено наложением двух явлений, анизотропного распухания зерен и радиационного роста.

В главе 5 описаны исследования теплопроводности облученного бериллия. Наряду с полученными зависимостями теплопроводности бериллия от температуры облучения и флюенса нейтронов, представлена также модель изменения бериллия при облучении в зависимости от типа и параметров радиационных дефектов.

Глава 6 включает результаты механических испытаний облученного бериллия. Использовались измерения микротвердости, испытания на растяжение и сжатие, а также испытания на ползучесть бериллиевых минисфер. Построены дозные зависимости предела прочности, по результатам которых построена модель самопроизвольного разрушения бериллиевых изделий за счет образования и распространения трещин по границам зерен в результате их анизотропного распухания.

Форма изложения результатов в диссертации выдержана на хорошем уровне, суть научных задач и порядок их разрешения прописаны ясно и подробно. Работа имеет понятную и логичную структуру. В случаях использования заимствованных литературных источников, автор приводит соответствующие ссылки. Вклад автора в решение проблемы на фоне имеющейся базы данных четко выделен и понятен читателю диссертации.

Научная новизна

Новизна и ценность проведенных исследований облученного бериллия заключаются не только в том, что впервые получена значительная база данных по особенностям радиационного повреждения бериллия в широком температурно-дозовом интервале и особенно при экстремально высоких нейтронных флюенсах, но также в том, что использован комплексный подход, заключающийся, во-первых, в прямом сопоставлении обнаруженных эффектов и явлений с характером и параметрами микроструктуры бериллия после облучения, во-вторых, в выдвинутых на базе проведенных исследований предложениях (как научного, так и технологического плана) по увеличению ресурса использования бериллия в поле интенсивного нейтронного излучения.

- подробно исследована эволюция микроструктуры облученного бериллия методом просвечивающей электронной микроскопии, установлены температурные интервалы образования дислокационных петель и газовых пор; показано, что образуется два типа дислокационных петель: вакансионных и междуузельных; определены кристаллографические плоскости залегания дислокационных петель и плоских шестиугольных газовых пор;

- термическая десорбция трития и гелия из бериллия не только подробно исследована с использованием как облученных бериллиевых образцов, так и предварительно насыщенных тритием и водородом, но и предложена модель газовой выделенности из бериллия, которая учитывает различные внешние и внутренние факторы, влияющие на скорость десорбции и общее газовыделение, такие как температура облучения или насыщения, флюенс нейтронов, скорость нагрева при испытании, размер зерна, величина пористости, параметры радиационных дефектов и другие;

- установлено, скорость распухания бериллия, облученного при низких температурах, различна для разных дозных интервалов, отмечается ускорение распухания при максимальных флюенсах нейтронов, которое связано уже не только с накоплением гелия, но и с анизотропией распухания отдельных кристаллитов, что приводит к ослаблению границ зерен и увеличению объема за счет зарождения зернограничных трещин; дополнительный вклад в изменение размеров облученного бериллия вносит также радиационный рост, ранее известный только для циркония;

- теплопроводность бериллия после облучения при низких температурах падает значительно, однако с увеличением флюенса нейтронов происходит ее стабилизация на достаточно высоком остаточном уровне, что является позитивным фактором; построена модель, увязывающая закономерности поведения теплопроводности бериллия с параметрами радиационных дефектов;

- облученный бериллий разрушается в процессе механических испытаний, как на растяжение, так и сжатие, абсолютно хрупко, к тому же происходит значительное снижение его прочности, однако, как и в случае с теплопроводностью, наблюдается стабилизация остаточной прочности при максимальных дозах; испытания минисфер на ползучесть показали строгую зависимость результатов от температуры облучения: при низких температурах – упрочнение, при высоких – разупрочнение, причем в любом случае скорость ползучести на второй стадии превышает скорость распухания.

Практически все представленные выше эффекты и закономерности поведения облученного бериллия получены впервые. Новизна же технических решений по увеличению ресурса бериллиевых изделий в реакторе подтверждается наличием трех патентов на изобретение Российской Федерации.

Достоверность результатов работы

Достоверность полученных автором результатов подтверждается фактом использования в работе аттестованных методик исследований облученных материалов. Для структурных исследований использовались дублирующие и взаимодополняющие методы исследований, такие как оптическая, растровая и просвечивающая электронная микроскопия. Для большинства методик в исследованиях использовалось несколько образцов на состояние, чтобы иметь значимую статистику и подтвердить воспроизводимость получаемых результатов.

Значимость результатов для науки и практики

Результаты диссертационной работы имеют не только большое научное значение, внося заметный вклад в понимание эволюции микроструктуры и физико-механических свойств бериллия под облучением, но и важнейшее практическое значение для обоснования прогноза ресурса бериллиевых элементов атомных и термоядерных реакторов, что подтверждается наличием нескольких патентов на изобретение.

Замечания по работе

1. На рис. 2.9 б явно видно, что гелиевые пузырьки в облученном при 70 °С, а потом еще и отожженном при 700 °С бериллии выстраиваются в многочисленные цепочки, которые формируют собой некие объемные образования. Об этом в тексте работы ничего не говорится. Что это за образования? Характерный их размер значительно меньше размера зерна.
2. На поверхности бериллиевых минисфер в процессе облучения образуется окисный слой, который ясно виден, например, на рис. 3.12 б. Известно, что в оксиде бериллия диффузия изотопов водорода происходит значительно медленнее, чем в чистом бериллии. Учитывался ли этот фактор при анализе полученных результатов по термодесорбции трития из облученного бериллия?
3. Из рис. 4.1, где представлена зависимость распухания от флюенса нейтронов, из которой следует, что, начиная примерно с флюенса 1×10^{23} нейтр/см², происходит увеличение скорости распухания. Этот эффект связан с зернограничным растрескиванием вследствие анизотропного распухания зерен. Насколько критично это увеличение скорости распухания, сопровождаемое распространением трещин по границам, для ресурса бериллия под облучением? Существует ли пороговый флюенс, по достижении которого бериллий самопроизвольно разрушится по границам?
4. На рис. 5.9 представлена зависимость теплопроводности облученного бериллия от температуры облучения, из которой видно, что при 400 °С значения теплопроводности в исходном и облученном состояниях близки, то есть большая разница после низкотемпературного облучения нивелируется. Почему не представлены данные для более высоких температур порядка 650 °С, которые более интересны для термоядерных реакторов с практической точки зрения, и какой прогноз для теплопроводности бериллия, облученного при высоких температурах?

Заключение

Сделанные замечания не носят принципиального характера диссертационной работы и не влияют на положительную оценку работы в целом. Диссертация Чакина В.П. представляет собой цельное, законченное, логически обоснованное научное исследование. Результаты работы квалифицируются как новые важные научные достижения в области исследований влияния нейтронного облучения на структуру и свойства бериллия. Автореферат диссертации полностью отражает основное содержание диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту. Поэтому можно заключить, что диссертационная работа Чакина В.П. соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора наук (п. II.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»), полностью соответствует паспорту специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», а автор работы Чакин В.П. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент



Рогожкин Сергей Васильевич

доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.07 – физика
конденсированного состояния,
профессор кафедры физики
экстремальных состояний вещества
Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ»

Адрес: 115409, Российская Федерация, Москва, Каширское шоссе, 31

Тел.: +7 (495) 7885699 (доб. 9809)

E-mail: SVRogozhkin@mephi.ru



Машкина Татьяна Сергеевна
20.12.2016