

## ОТЗЫВ

На автореферат диссертации Владимира Павловича Чакина «Эволюция микроструктуры и физико-механических свойств бериллия при высокодозном нейтронном облучении», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

В атомной энергетике бериллий первоначально использовался в качестве материала бериллиевых блоков отражателей и замедлителей нейтронов исследовательских реакторов. Его уникальные свойства привели к интересу к нему разработчиков международного исследовательского термоядерного реактора ИТЭР и, в последствие, национальных термоядерных реакторов ДЭМО, где планируется его использование в качестве обращенного к плазме элемента первой стенки, а также элементов бридерного blankets, в качестве размножителя нейтронов. Для прогнозирования поведения этих элементов необходимо знать, как изменяются свойства бериллия в процессе эксплуатации.

Работа Чакина Владимира Павловича посвящена выявлению закономерностей эволюции микроструктуры бериллия и ее влияния на его физико-механические свойства. ***Это определяет актуальность диссертационной работы.***

***Научная новизна полученных результатов заключается*** в получении и систематизации большого массива результатов исследований микроструктуры бериллия после нейтронного облучения до различных повреждающих доз в широком диапазоне температур. В частности, обнаружены гелиевые поры, имеющие форму шестигранной призмы, высота которой значительно меньше большей диагонали основания, причем соотношение этих размеров зависят от температуры облучения. Экспериментально подтверждено, что в бериллии, как и других металлах, имеющих ГПУ кристаллическую структуру, в базисной плоскости (0001) образуются вакансионные дислокационные петли, а в призматических плоскостях – дислокационные петли межузельного типа. Установлены закономерности ряда процессов, связанных с диффузией в бериллии гелия и трития, в частности, закономерности их термической десорбции.

***Практическая ценность диссертационной работы заключается*** в том, что с использованием полученных в работе закономерностей радиационного воздействия нейтронного облучения на структуру и свойства бериллия предложены пути увеличения ресурса бериллиевых компонент исследовательских реакторов. Так, использование составных блоков замедлителя и отражателя (или блоков в чехле из радиационно-стойкого конструкционного материала) позволят получить экономический эффект, за счет снижения затрат на закупку новых бериллиевых блоков для эксплуатации в ядерном реакторе.

***Обоснованность и достоверность*** полученных результатов обеспечивается использованием нескольких независимых методов исследования микроструктуры

Входящий ИПСМ  
№ 16  
от 11.01.2017

облученного бериллия, а также значимыми объемами исследований и статистической обработкой их результатов. Кроме того, использованное исследовательское оборудование было аттестовано российскими и германскими метрологическими организациями.

Результаты диссертационной работы, выполненной Владимиром Павловичем Чакиным, *прошли апробацию* на международных и отечественных конференциях и симпозиумах по термоядерным технологиям (в частности, бериллиевым) и по новым материалам, используемых для инновационного развития ядерной энергетики. По тематике диссертации были опубликованы 46 статей (включая 4 патента РФ) в научных печатных изданиях.

*В качестве замечаний к автореферату* можно отметить следующие.

1. В разделе «*Научная новизна*» автор часто и не всегда обосновано 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 что 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 понимают 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.

Отмеченные замечания не затрагивают основных результатов, полученных в работе, и не влияют на ее оценку. Судя по автореферату, диссертационная работа «Эволюция микроструктуры и физико-механических свойств бериллия при высокодозном нейтронном облучении», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» является логически законченным целостным научным трудом, с хорошим уровнем проработки исследуемых вопросов. Она удовлетворяет требованиям Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации к докторским диссертациям, а ее автор Владимир Павлович Чакин заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Советник

АО «ИРМ», доктор технических наук,

Шифр специальности 15.16.01

«Металловедение и термическая обработка металлов»

Эксперт РАН, сертификат 2016-01-1466-0090

А.В.Козлов

Подпись А.В. Козлова заверяю,

и.о. заместителя директора по науке

кандидат технических наук



К.И. Ильин

АО «Институт реакторных материалов»

624250, а/я 29, Свердловская обл., г. Заречный

тел.: (34377)-35093, факс: (34377)-35131

e-mail: irm@irmatom.ru

Козлов Александр Владимирович