

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**Исаенковой Маргариты Геннадьевны**

на диссертационную работу **Обухова Александра Валерьевича**  
«Влияние реакторного облучения и послерадиационного отжига на  
элементный состав и кристаллическую структуру вторых фаз в циркониевых  
сплавах Э110 и Э635», представленную на соискание учёной степени  
кандидата технических наук по специальности 1.3.8 – «Физика  
конденсированного состояния»

### **Актуальность работы**

Благодаря низкому сечению захвата тепловых нейтронов, высоким механическим свойствам и коррозионной стойкости в пароводяной среде малолегированные сплавы на основе циркония до сих пор являются незаменимыми конструкционными материалами для активных зон реакторов на тепловых нейтронах. Развитие атомной энергетики, отраженное в проектах ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ, а также ужесточение требований их безопасной и продолжительной эксплуатации предусматривает существенное повышение эксплуатационных свойств материалов, применяемых для изготовления элементов активной зоны ядерного реактора. Ужесточение требований к конструкционным материалам в связи с аварийными ситуациями последних лет на АЭС объясняет повышенный интерес к прогнозированию свойств облученных материалов в экстремальных условиях. Изменение структуры и элементного состава материалов под воздействием облучения сопровождается изменением механических свойств, коррозионной стойкости и радиационной ползучести изделий. Радиационные изменения структурно-фазового состояния материалов отражаются также на поведении материалов после эксплуатации, т.е. последующей транспортировке и хранении отработавшего топлива.

Элементный состав сплавов полностью определяет формирование структуры материала, а, следовательно, и его физико-механических свойств. Получение данных о влиянии реакторного облучения и послерадиационного отжига на элементный состав и кристаллическую структуру вторых фаз в циркониевых сплавах Э110 и Э635 позволит обосновать изменения состава отечественных сплавов с целью повышения функциональных свойств изделий

из циркониевых сплавов для обеспечения надёжной и безопасной работы ЯЭУ и для обращения с ядерным топливом на протяжении всего жизненного цикла. В этой связи задача нахождения оптимального баланса легирующих элементов на основе знаний о механизмах процессов, связанных с факторами радиационного и температурного воздействия на структурные составляющие сплавов того или иного состава, безусловно является актуальной. Полученные результаты также могут быть использованы для совершенствования моделей механизмов радиационного упрочнения, радиационного роста, ползучести, коррозии и т.д., и опять же целенаправленного управления структурой сплавов на основе циркония.

### **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа изложена на 143 страницах, включая 73 рисунка, 15 таблиц и список литературы из 94 наименований. Основные разделы диссертации включают: введение, литературный обзор; описание объектов исследования; методическую часть, экспериментальную часть, состоящую из четырёх разделов, и заключение.

Диссертационная работа имеет весьма четкую структуру и хорошо воспринимается при знакомстве с материалами работы.

**Первая глава** диссертации представляет собой аналитический обзор структурно-фазового состояния отечественных и зарубежных сплавов и его изменения под воздействием нейтронного облучения.

**Вторая глава** посвящена описанию исследованных материалов и режимов их испытаний.

**В третьей главе** освещены методические вопросы исследования структурно-фазового состояния материала после облучения и послерадиационного отжига. Рассмотрены процедуры изготовления фольг и графитовых реплик.

**Четвертая глава** состоит из четырех разделов, в которых последовательно рассматриваются изменения структуры при облучении в области низких (40-70 °С) и рабочих для ВВЭР-1000 температур (290-340 °С), а также при послерадиационном отжиге. В отдельных разделах главы рассматриваются разные составляющие отечественных сплавов Э110 и Э635:  $\beta$ -фазы и интерметаллидные фазы разного состава.

## **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в рецензируемой диссертации, обоснованы системным анализом работ, относящихся к изучению структуры дополнительных фаз в сплавах на основе циркония, используемых как в России, так и за рубежом. В центре внимания работы находится выявление закономерностей изменения морфологии, элементного состава и кристаллической структуры выделений вторых фаз в циркониевых сплавах Э110 и Э635 под действием реакторного облучения в двух температурных интервалах 40–70 °С и 290–340 °С, а также влияния на них длительного послерадиационного отжига.

В работе поставлены и успешно решены следующие задачи реакторного материаловедения применительно к эксплуатации и последующему хранению изделий из циркониевых сплавов:

- проведено экспериментально-расчётное определение значений повреждающей дозы для элементов ТВС ЯЭУ из сплавов циркония Э110 и Э635 после эксплуатации;
- построены зависимости изменения элементного состава, размера и кристаллической структуры выделений вторых фаз от степени радиационного повреждения при температурах облучения 40 - 70 °С и 290 - 340 °С, а также температуры и длительности послерадиационного термического воздействия;
- выявлены условия и механизмы трансформации кристаллической решётки и морфологии фазы Лавеса  $Zr(Nb,Fe)_2$  под действием реакторного облучения, изменения состава и размера частиц  $\beta$ -Nb и фазы Лавеса, роста и морфологии радиационно-индуцированной мелкодисперсной фазы в сплавах Э110 и Э635.

Предложенные в диссертационной работе научные положения, выводы и рекомендации, можно признать обоснованными.

## **Научная новизна и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

В результате решения поставленных задач получены систематические, новые данные по закономерностям и механизмам перераспределения легирующих элементов между частицами вторых фаз и матрицей, сопровождающимися изменением размеров частиц, в сплавах Э110, Э635 и их модификаций в зависимости от температуры и повреждающей дозы облучения

(до 35 снв в диапазонах температур облучения 40 - 70 °С и 290 - 340 °С), а также температуры и длительности послерадиационного термического воздействия.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается их соответствием имеющимся представлениям о процессах, происходящих с изделиями ЯЭУ из сплавов циркония при температурном воздействии, а также согласованностью экспериментальных результатов, полученными методами электронной микроскопии фольг и графитовых реплик, а также элементного анализа. Экспериментальные данные получены с использованием современного исследовательского и аналитического оборудования для изучения структурно-фазового состояния материалов. Результаты диссертационной работы широко представлены в научной периодике и доложены на международных и отечественных конференциях. Полученные акты об использовании результатов также подтверждают достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертанта.

### **Практическая ценность научных положений, выводов и рекомендаций**

1. Полученные результаты использованы АО «ВНИИНМ» при создании модификаций сплавов Э110 и Э635: Э110М (Zr-1Nb-0,12Fe) и Э635М (Zr-0,8Nb-0,35Fe-0,8Sn); использованы при обосновании стойкости к радиационному формоизменению и коррозии в литиевом водно-химическом режиме PWR сплава Э110М в качестве оболочек твэлов ТВС-К для опытной эксплуатации на АЭС «Ringhals-4» (акт о внедрении АО «ВНИИНМ» №8/345 от 17.11.2021 г.).
2. Моделирование поведения твэлов после эксплуатации в реакторе ВВЭР-1000 для обоснования их сухого хранения во многом базируется на результатах исследования микроструктуры оболочек из сплава Э110 после длительного послерадиационного отжига этих твэлов.
3. Продемонстрирована возможность использования ускоренных радиационных испытаний до одинаковых повреждающих доз в исследовательском реакторе с большей, чем в ЯЭУ, скоростью радиационного повреждения, для изучения закономерностей изменения фазового состава сплавов циркония после облучения в реакторе ВВЭР-1000.
4. Часть полученных результатов вошла в отраслевую базу данных «Облученные Материалы Ядерной Техники (ОМЯТ)», раздел "Конструкционные материалы", разработанной в НИЯУ МИФИ

(Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2012621049 от 8.10.2012 г) [1].

Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертации, сформулированы на основе обобщения данных, полученных при выполнении договорных научно-исследовательских работ с головной циркониевой организацией АО «ВНИИНМ», проекта РФФИ, что подтверждает их практическую ценность. Получены два акта о внедрении результатов в АО «ВНИИНМ» и ДИТИ НИЯУ МИФИ.

### **Соответствие диссертации и автореферата требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней**

Диссертация и автореферат Обухова А.В. соответствуют требованиям, предъявляемым к диссертациям положением о порядке присуждения ученых степеней. Проведён обзор актуальной зарубежной и отечественной литературы по теме диссертации, правильно установлены задачи и методы исследований. Экспериментальные данные проиллюстрированы таблицами и рисунками с должной информативностью.

### **Замечания и вопросы по работе**

1. В литературном обзоре допущена некоторая неточность при описании условий образования фаз. А именно, утверждается, что омега-фаза «Образуется непосредственно в процессе закалки высокотемпературной фазы  $\beta$ -Zr или при её старении после закалки». Следует заметить, что образование омега-фазы при старении происходит в строго регламентированном интервале температур и длительностей. Именно это важно.
2. Для получения повреждающей дозы 35 сна проводилось длительное облучение и обычно трудно найти образцы-свидетели, которые находились в аналогичных условиях, но без облучения. Какие образцы использовались в качестве образцов-свидетелей?
3. Полученные результаты базируются, главным образом, на просвечивающей электронной микроскопии. Это безусловно основной метод исследования мелкодисперсных включений. Однако, электроны позволяют исследовать только тонкие слои (менее 1 мкм), а получение фольг приводит к перераспределению дефектов. Как сказывается специфика приготовления образцов на морфологии включений и перераспределении легирующих

элементов? Почему при выполнении работы не использовали растровый электронный микроскоп или рентгеновскую дифракцию?

## **Заключение**

Сделанные замечания имеют рекомендательный характер и не снижают общей высокой оценки диссертации. Достоверность результатов не вызывает сомнений и подтверждается их согласованностью с литературными данными. Это позволяет утверждать, что обозначенные в работе цели и задачи исследования достигнуты, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны.

Диссертационная работа Обухова А.В. выполнена на высоком научно-техническом уровне. Она представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно-обоснованные технические и методические решения по закономерностям и механизмам перераспределения легирующих элементов между частицами вторых фаз и матрицей, сопровождающимся изменением размеров частиц, в сплавах Э110, Э635 и их модификаций в зависимости от температуры и повреждающей дозы облучения, а также температуры и длительности послерадиационного термического воздействия.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 16 Отраслевых и Международных научно-технических конференциях, опубликованы в 18 печатных работах, в том числе 4 статьях в реферируемых журналах, входящих в перечень ВАК; 8 статьях, входящих в Международную систему научного цитирования Scopus; 4 статьях в журналах, входящих в национальную библиографическую базу данных научного цитирования, индексируемых в РИНЦ; 2 статьях в сборниках тезисов научных конференций. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в атомной промышленности как для разработки сплавов, так и при создании моделей поведения материалов в условиях воздействия потоков тепловых нейтронов. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По научному уровню полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №

842, а ее автор Обухов Александр Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

### Официальный оппонент

Исаенкова Маргарита Геннадьевна



15 марта 2022 г.

Профессор отделения ядерной физики и технологий офиса образовательных программ / Институт ядерной физики и технологий / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», доктор физико-математических наук, доцент по специальности 01.04.07 (1.3.8). Специальность, по которой была защищена диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук - 01.04.07(1.3.8) «Физика конденсированного состояния».

Адрес: Каширское шоссе, д. 31, 115409, г. Москва

Телефон (рабочий): +7 (495) 788-56-99 доб. 96-39

Адрес электронной почты: [MGIsaenkova@mephi.ru](mailto:MGIsaenkova@mephi.ru)



Подпись удостоверяю  
Заместитель начальника отдела  
документационного обеспечения  
НИЯУ МИФИ

*В.М. Сашорозова*