

ОТЗЫВ

дополнительного члена диссертационного совета ДС.ТПУ.03 Пичугина Владимира Федоровича на диссертацию **Бордулева Юрия Сергеевича** «Водород-индуцированные дефекты в сплаве $Zr1\%Nb$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертационной работы.

Диссертационная работа направлена на исследование вопросов дефектообразования в системе сплав $Zr1\%Nb$ - водород. Данная тема является актуальной ввиду того, что бинарные цирконий-ниобиевые сплавы находят широкое применение в реакторостроении. Исследуемый диссертантом сплав $Zr1\%Nb$ является конструкционным материалом оболочек ТВЭЛов энергетических ядерных реакторов типа ВВЭР, где в ходе эксплуатации подвергается водородному воздействию при повышенной температуре. Фундаментальное понимание структурных изменений, которые при этом происходят, в том числе в дефектной структуре, несомненно, важны для развития ядерного материаловедения и создания новых, улучшенных сплавов.

Общая методология и методика исследования. Выбранные и использованные в работе методики исследований, соответствуют современному уровню науки и техники, что достигалось разносторонним подходом к решению поставленной цели и задач. Используемое автором измерительное оборудование, прецизионные экспериментальные методики по подготовке исследуемых образцов, а также методы математического моделирования соответствуют современным стандартам качества, предъявляемым к научным исследованиям. Полученные экспериментальные результаты обрабатывались методами математической статистики с использованием специального программного обеспечения. Диссертационная работа Бордулева Ю.С. состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации составляет 128 страниц. Работа содержит 4 таблицы, 44 рисунка. Библиография включает 205 наименований.

Целью диссертационной работы является установление закономерностей эволюции дефектной и кристаллической структуры сплава $Zr1\%Nb$ при водородном насыщении на основе теоретических и экспериментальных исследований.

Задачи, поставленные в диссертационной работе, полностью соответствуют заявленной автором цели.

Содержание работы.

Во введении автором приведено обоснование актуальности и степень разработанности выбранной темы исследования, сформулированы цель и задачи, а также положения, выносимые на защиту, научная новизна, практическая ценность работы, изложена структура диссертационной работы. Представлены сведения о публикациях и апробации результатов работы.

В первой главе представлен литературный обзор по выбранной тематике исследования. Сформулированы вопросы, требующие дальнейших исследований, и обоснована необходимость настоящей работы.

Во второй главе автор описывает материал для исследования, методы его обработки и методы исследования свойств. Среди методов исследования особое место в данной работе занимают методы аннигиляции позитронов, применяемые как основной инструмент исследования дефектной структуры, наравне с традиционными методами. В данной главе,

также, описаны методы моделирования изучаемых систем, приведены результаты методической работы по определению вклада источника позитронов в спектры аннигиляции позитронов, а также предложен метод подготовки образцов для исследования дефектной структуры в системах металл-водород.

В третьей главе автором приведены результаты математического моделирования поведения позитронов в решетке циркония и системах цирконий-водород, цирконий-вакансия-водород, а также экспериментально определены характеристики позитронной аннигиляции в дислокациях циркония. Изучены изменения аннигиляционных характеристик при изменении параметров решетки, а также количества растворенных атомов водорода. Установленные закономерности позволяют корректно анализировать экспериментальные спектры позитронной аннигиляции, при исследовании систем цирконий-водород.

В четвертой главе описаны результаты экспериментального исследования дефектной структуры сплава $Zr1\%Nb$ при насыщении водородом из газовой фазы при высокой температуре. Приведено согласование экспериментальных и теоретических результатов между собой, а также с литературными данными. Показана эволюция дефектной и кристаллической структуры исследуемого сплава при насыщении водородом.

Оценивая диссертационную работу Бордулева Ю. С., считаю необходимым отметить следующее.

1) Научная значимость и практическая ценность.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты вносят существенный вклад в общую картину понимания вопросов водород-индуцированных дефектов, актуальную для многих материалов. В частности, в данной работе показано, что образование водород-индуцированных вакансий не является равновесным процессом в случае циркониевых сплавов и выдвинуто предположение о справедливости данного утверждения для гидридо-образующих соединений. Выполнены количественные оценки влияния расширения решетки в результате растворения водорода в междоузлиях и захвата водорода вакансиями в цирконии на время жизни позитронов.

Новизна диссертационной работы.

1. Определены основные характеристики аннигиляции позитронов (время жизни и коэффициент захвата) в дислокациях циркония, позволяющие идентифицировать данный тип дефектов и рассчитывать их плотность из спектров времени жизни позитронов.

2. Определены характеристики позитронной аннигиляции в модельных системах цирконий-водород и цирконий-вакансия-водород в различных конфигурациях. Определены зависимости изменения указанных характеристик от количества связанных атомов водорода и объема решетки.

3. Установлены закономерности эволюции дефектной и кристаллической структуры при насыщении водородом до разных концентраций, в том числе образование, смена типов дефектов и определение их концентрации.

Практическая значимость работы.

Определенные в данной работе характеристики позитронной аннигиляции в различных дефектах циркониевого сплава являются независимыми от используемого оборудования и процессов, протекающих в материале. Таким образом, они могут быть применены для идентификации и расчета концентрации дефектов в циркониевых материалах при исследовании последних методами позитронной аннигиляции другими исследователями.

2) Степень обоснованности и достоверности заключений, научных положений, выводов и рекомендаций.

Положения, вынесенные на защиту, обоснованы результатами, представленными в работе. Автор применял современные прецизионные методики исследования и общепринятые инструменты, а также методы статистической обработки результатов измерений. Полученные результаты не противоречат данным, представленным в литературе.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 13 работах, в т.ч. 4 работы - в журналах, входящих в перечень ВАК, 9 - индексируемых международными базами данных Scopus / Web of Science. В публикациях материалы диссертационной работы Бордулева Ю.С. отражены достаточно полно.

3) Личный вклад автора не вызывает сомнений и заключается в постановке цели и задач исследования, проведении экспериментальных исследований и обработке результатов; формулировании выводов и положений, выносимых на защиту; написание статей совместно с соавторами при непосредственном участии автора, а также подготовке докладов и выступлениях на семинарах и конференциях.

4) Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности.

Материалы диссертации и автореферата соответствуют пунктам 1 и 6 паспорта научной специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Замечания по диссертационной работе.

По содержанию диссертации могут быть высказаны следующие замечания и вопросы.

1. В работе показано, что в материале, насыщенном водородом имеются равномерно распределенные области с большей и меньшей концентрацией водорода, чем среднее значение концентрации во всем образце. Тем не менее, в процессе проведения эксперимента, максимальная концентрация водорода в образцах составляла 0,064 масс. %, что соответствует максимальной “средней концентрации водорода” в оболочках ТВЭЛов после эксплуатации. В соответствии с первым утверждением, корректней было бы выбрать максимальную концентрацию водорода с запасом (скажем 0,08 масс. %) для определения состояния дефектной и кристаллической структуры в областях с повышенной концентрацией водорода.

2. В процессе эксплуатации материала оболочек ТВЭЛов происходит также значительное облучение материала быстрыми нейтронами, вызывающее радиационные повреждения. В этой связи, возникают вопросы взаимодействия водорода с радиационными дефектами Френкеля. Эти вопросы не получили обсуждения в представляемой работе.

3. Для изменения дислокационной структуры «...образцы были подвергнуты пластической деформации методом холодной прокатки.» (стр. 72 диссертации), однако оборудование, используемое для этих целей не указано.

4. Существенная часть работы посвящена исследованию плотности дислокаций в зависимости от «...уровня деформации...» (стр. 82 диссертации, рис. 29). Однако в тексте диссертации и автореферата отсутствует определение понятия «уровень деформации» и методов её оценки.

5. Для исследований методом просвечивающей электронной микроскопии образцы готовились механической полировкой. «Тонкие фольги ... для наблюдений ПЭМ были получены механическим шлифованием (стр. 57 диссертации). При подобной методике подготовки образцов возникают механические деформации, приводящие к формированию дислокаций. Возникает вопрос о вкладе этих дислокаций в интегральную плотность дислокаций. Как он решался?

6. Имеется опечатка на стр. 11 диссертации (стр. 7 автореферата). Количество рисунков в работе 44, в то время как автор указал 45.

Заключение.

Указанные замечания не влияют на высокий уровень работы и несущественны для положительной оценки работы, которую можно считать выполненной на высоком теоретическом, экспериментальном и профессиональном уровне. Автореферат диссертации отражает в полной мере содержание диссертации и дает представление о полноте и глубине проведенных научных изысканий диссертанта. Работа диссертанта является законченным научным исследованием. Результаты диссертации хорошо апробированы на большом количестве международных научных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Бордулева Юрия Сергеевича «Водород-индуцированные дефекты в сплаве $Zr_{1\%}Nb$ » полностью удовлетворяет требованиям п.8 «Порядка присуждения учёных степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете», утвержденного приказом ФГАОУ ВО НИ ТПУ от 6 декабря 2018 г. № 93/од в редакции приказа от 28 августа 2019 г. № 66, а её автор Бордулев Юрий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Дополнительный член диссертационного
совета ДС.ТПУ.03

профессор ИШФВП ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет», доктор
физико-математических наук по
специальности 01.04.04 Физическая
электроника

Пичугин
Владимир Фёдорович

Подпись

Дата

О А. Ананьева

Подпись Пичугина В. Ф. заверяю:
учёный секретарь Учёного совета ТПУ

Сведения:

Полное наименование организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Юридический адрес: г. Томск, проспект Ленина, дом 30.

Телефон: 8 (3822) 60-61-64

Эл. адрес: pichugin@tpu.ru

Должность: профессор ИШФВП

Ф.И.О. Пичугин Владимир Фёдорович

Даю согласие на обработку персональных данных