

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертационную работу Бордулева Юрия Сергеевича на тему: «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 диссертации**

Наличие дефектов в металлах и сплавах оказывает большое влияние на параметры поглощения и распределения водорода в них. Стоит отметить, что индуцированные водородом дефекты вызывают во многих случаях необратимые изменения физико-механических свойств металлов и сплавов. Одним из широко известных явлений, можно назвать водородное охрупчивание.

Представленная диссертационная работа нацелена на изучение проблемы водородного охрупчивания изделий из циркониевых сплавов. Эти задачи весьма актуальны в связи с вопросами безопасности эксплуатации ядерных энергетических реакторов. Поэтому они требуют всестороннего изучения. Однако, вопросы водород-индуцированного дефектообразования и эволюции дефектной структуры в циркониевых сплавах при вариации содержания водорода изученными далеко не полностью.

Диссертационная работа Ю.С. Бордулева посвящена исследованию этого круга вопросов главным образом методами позитронной аннигиляционной спектроскопии, а также рядом других дополнительных методик. Проведенный диссертантом анализ литературных научно-технических источников свидетельствует о том, что изучение проблемы «цирконий-водород» продиктовано объективной необходимостью.

### **Структура и основное содержание работы**

Представленная диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем диссертации составляет 128 страниц, включая 44 рисунка, 4 таблицы и список использованных источников из 205 наименований отечественных и зарубежных авторов.

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна, практическая значимость работы и личный вклад автора.

В первой главе рассмотрены основные аспекты влияния водорода на свойства металлов и сплавов, включая дефектную структуру. Также, описаны физические основы поведения позитронов в твердых телах, а также принципы их применения для исследования водород-индуцированных дефектов в металлах и сплавах.

Во второй главе выполнен обзор и обоснование выбора экспериментальных и теоретических методов, используемых в данной работе при исследовании дефектной структуры. Основными методами экспериментального исследования в данной работе являются методы позитронной спектроскопии. Для интерпретации полученных

результатов, в данной работе также были применены рентгено-структурные и электронно-микроскопические методики исследования строения материалов, а также моделирование поведения позитронов в решетке и дефектах циркония в присутствии водорода.

Помимо этого, в данном разделе представлены результаты оценки вклада аннигиляции позитронов в материале самого источника позитронов. Источником  $e^+$  были радиоактивные ядра  $^{44}\text{Ti}$ . Это важный аспект исследования, поскольку вклад аннигиляции  $e^+$  в источнике составляет 15-20% в спектрах времени жизни позитронов. Также изложен способ подготовки образцов для исследования водород-индуцированных дефектов методами позитронной спектроскопии с применением данного радиоактивного изотопа.

В третьей главе приведены результаты математического моделирования и экспериментального определения параметров поведения позитронов (время жизни, коэффициент захвата позитронов, параметры формы спектров доплеровского уширения аннигиляционной линии) для различных типов дефектов, таких как дислокация, водород-вакансионный комплекс циркония, междоузельные атомы водорода в решетке, а также области с увеличенным объемом решетки циркония.

В четвертой главе приведены основные результаты экспериментального исследования водород-индуцированных дефектов в циркониевом сплаве, а также их обсуждение с учетом данных, полученных различными инструментами, а также результатов математического моделирования.

Материал диссертации изложен логично и доходчиво, а также сопровождается информативными иллюстрациями и таблицами.

### **Научная новизна результатов диссертационной работы**

В диссертационной работе Ю.С. Бордулева получены следующие новые научные результаты:

- определены время жизни и коэффициент захвата позитронов, локализованных в дислокациях циркониевого сплава  $\text{Zr1\%Nb}$ ;
- определено количественное влияние расширения решетки, растворения водорода в междоузлиях, захвата водорода вакансиями в цирконии на время жизни позитронов и импульсное распределение аннигиляции позитронов;
- экспериментально установлены закономерности эволюции дефектной и кристаллической структуры циркониевого сплава  $\text{Zr1\%Nb}$  при насыщении водородом из газовой фазы.

### **Достоверность результатов и обоснованность выводов**

Выводы и положения диссертации основываются на:

- большом объеме собранных автором экспериментальных данных и их корректной обработкой с применением методов математической статистики и специальных программных продуктов;
- сопоставлении экспериментальных данных между собой, с результатами математического моделирования, полученными в работе, а также с данными,

полученными другими исследователями;

- использовании современных методов подготовки материала для исследования, а также прецизионных и классических методов исследования дефектных структур.

Согласованность полученных экспериментальных результатов, проведенных расчетов с независимыми литературными данными позволяют заключить, что основные выводы диссертации достоверны и обоснованы.

### **Практическая значимость полученных результатов**

Полученные в данной работе величины (время жизни, коэффициент захвата позитронов дефектами), характеризующие поведение позитронов в дефектных структурах циркония, являются базовыми параметрами, на которые можно опираться при любых других исследованиях дефектов в циркониевых сплавах методами аннигиляции позитронов.

Практическая значимость также подтверждается выполнением Бордулевым Ю.С. ряда научно-исследовательских работ, направленных на исследование систем «металл-водород». Указанные работы были поддержаны российскими фондами и организациями.

### **Замечания по диссертационной работе:**

- 1) Работа соискателя называется «Водород-индуцированные дефекты в сплаве  $Zr1\%Nb$ ». Однако, остается не вполне понятной роль ниобия: если бы ниобия не было (скажем, если бы автор изучал чистый цирконий), то в какой мере приведенные результаты остались бы неизменными? Чем будет отличаться поведение водород-индуцированных дефектов в чистом цирконии и в его сплавах с ниобием? Наверное, для этого было бы полезно изучить сплавы с различным содержанием ниобия (1, 2.5, 5%).
- 2) Конечным критерием, определяющим возможность использования изучаемого материала в качестве конструкционного в реакторостроении, являются его механические и прочностные свойства. К сожалению, соискатель не исследовал механические свойства сплава  $Zr1\%Nb$  от состояния его дефектной структуры, сформированной посредством водородного насыщения.
- 3) В работе приведены данные моделирования поведения позитронов в решетке циркония, состоящей всего из 16 и 32 атомов (в сущности это кубик, на ребре которого размещается всего лишь 3 атома Zr). Хотелось бы понять устойчивость полученных результатов моделирования от размера ячейки. Для этого необходимо провести моделирование в ячейках больших размеров.
- 4) Во многих случаях циркониевые сплавы используются для производства труб. При этом листовая заготовка получается прокаткой, при этом в материале образуется много дислокаций. Соискатель сконцентрировался на изучении дефектов типа «вакансия-водород». Однако позитронная спектроскопия позволяет исследовать взаимодействия водорода и с дислокациями. Это направление могло бы быть практически важным приложением данной работы.

Приведенные здесь замечания носят частный характер. Очевидно, что диссертационная работа Бордулева Юрия Сергеевича представляет собой законченную научную работу, выполненную на высоком научно-техническом уровне. Тема работы весьма актуальна. Она связана с практическим использованием методов позитронной аннигиляционной спектроскопии для идентификации микроструктурных изменений в системе цирконий-водород, имеющей большое практическое значение в ядерном материаловедении.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на научных конференциях, и опубликованы в 13 трудах соискателя, в числе которых 4 статьи в журналах из перечня ВАК и 9 статей в зарубежных изданиях.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Учитывая актуальность выполненных исследований, научную новизну и практическую значимость полученных результатов считаю, что представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.8 Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, а ее автор – Бордулев Юрий Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета ДС.ТПУ.03 и их дальнейшую обработку.

**Степанов Сергей Всеволодович**



28.01.20

Заместитель начальника отдела атомно-масштабных исследований,  
начальник лаборатории физической химии,  
доктор физико-математических наук (01.04.07 – Физика конденсированного состояния)

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

ул. Большая Черемушкинская, д. 25. 117218 Москва, Россия  
телефон (499)789-6663;  
e-mail: [stepanov@itep.ru](mailto:stepanov@itep.ru)

Подпись Степанова Сергея Всеволодовича заверяю.

Ученый секретарь НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ

к.ф.-м.н.



В.В. Васильев