

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и
инновациям Национального
исследовательского Томского
политехнического университета



М.С. Юсубов

«25» ноября 2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»
(ФГАОУ ВО НИ ТПУ)**

Диссертация «Водород-индуцированные дефекты в сплаве $Zr1\%Nb$ » выполнена в Отделении экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Бордулев Юрий Сергеевич обучался в очной аспирантуре по специальности 01.04.07 и работал в качестве ассистента в Отделении экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В 2013 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

по специальности «Физика» с присуждением квалификации магистр по профилю «Физика конденсированного состояния вещества».

Справка об окончании аспирантуры и сдаче кандидатских экзаменов выдана Национальным исследовательским Томским политехническим университетом в 2019 г.

Научный руководитель - доктор технических наук Лидер Андрей Маркович, профессор, руководитель Отделения экспериментальной физики, Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность и степень разработанности темы. В настоящее время циркониевые сплавы находят широкое применение в области ядерной энергетики в качестве конструкционных материалов активных зон энергетических ядерных реакторов. При этом, особое внимание уделяется проблемам их надежности и долговечности. В условиях эксплуатации ядерных реакторов они подвергаются различного рода воздействиям, в том числе водородному насыщению, приводящему к структурно-фазовым изменениям, развитию дефектной структуры и соответствующим изменениям механических свойств.

На основании изложенного выше можно сделать вывод о том, что исследование воздействия водорода на эволюцию дефектной структуры сплава $Zr1\%Nb$ является актуальной задачей.

Личный вклад автора заключается в подготовке исследуемого материала, проведении экспериментов, обработке полученных экспериментальных данных, их анализе на основе теоретических моделей аннигиляции позитронов в твердых телах, а также существующих представлений физики конденсированного состояния.

Достоверность полученных результатов обеспечена корректно сформулированной целью и планом исследований, а также использованием современных методов, согласованием экспериментальных данных между собой, с результатами математического моделирования, а также с литературными данными.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что:

1. Определены время жизни и коэффициент захвата позитронов, локализованных в дислокациях сплава $Zr1\%Nb$, составившие 217 пс и $9,12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2\text{с}^{-1}$, соответственно;
2. Определено количественное влияние расширения решетки, растворения водорода в междоузлиях и захвата водорода вакансиями в цирконии на время жизни позитронов и импульсное распределение аннигиляции позитронов, проявляющееся в:
 - росте времени жизни позитронов по линейному закону при увеличении объема решетки с коэффициентом пропорциональности 1,33 пс/об.%;
 - снижении времени жизни позитронов при локализации атома водорода в решетке, а также в окрестности вакансии циркония на 1,2 – 2,5 пс и 7,4 пс, соответственно;
 - росте доли процессов аннигиляции позитронов с электронами в диапазоне энергий 3-5 кэВ и снижению доли процессов аннигиляции позитронов в области валентных электронов (0-1 кэВ) при растворении и захвате водорода;
3. Экспериментально установлены закономерности эволюции дефектной и кристаллической структуры сплава $Zr1\%Nb$ при насыщении водородом из газовой фазы, проявляющиеся в:

- расширении областей кристаллической решетки, достигающем максимального значения 2,4 об. % при концентрации водорода 0,015 масс. %;
- формировании термодинамически неравновесных водород-вакансионных комплексов типа V-H и V-2H с концентрацией дефектов 10^{-6} - 10^{-7} (деф. /атом) при концентрациях водорода ниже 0,015 масс. %;
- образовании дислокационных дефектов, с ростом плотности в диапазоне $(4,57 - 8,88) \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-2}$, при достижении концентрации водорода 0,023 - 0,061 масс. %.

Практическая значимость. Полученные значения параметров аннигиляции позитронов в дислокациях и водород-вакансионных комплексах циркония применимы для деконволюции данных компонент из спектров времени жизни позитронов в циркониевых материалах, подвергнутых механической и водородной обработке и расчета их концентраций.

Результаты исследования эволюции дефектной структуры в сплаве Zr1%Nb после наводороживания дополняют и расширяют общую картину закономерностей изменения дефектной структуры металлов после водородной обработки.

Диссертационная работа Бордулева Юрия Сергеевича, посвященная исследованию эволюции дефектной структуры сплава Zr1%Nb после насыщения водородом, соответствует пунктам 1, 3, 5 и 6 паспорта специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния (физико-математические науки).

Апробация результатов работы. Материалы диссертации были представлены на международных конференциях: Международная конференция студентов и молодых учёных «Перспективы развития

фундаментальных наук», Томск, 2017, 2016, 2015; 17th International Conference on Positron Annihilation, Ухань, 2015; 10th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids, Париж, 2014; Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении», Томск, 2015.

Дипломы. Результаты работы были отмечены следующими наградами: Диплом победителя I всероссийского конкурса докладов студентов "Функциональные материалы: разработка, исследование, применение" (Томск, 2013); Диплом II степени за доклад, представленный на XIX Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2013); Best paper award on 10th International forum on strategic technology (IFOST, Bali, 2015);

По результатам исследования опубликовано 13 статей в рецензируемых журналах: 4 статьи в журналах из перечня ВАК, 9 статей в журналах из базы данных SCOPUS.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Бордулев Ю.С.,** Лаптев Р.С., Гаранин Г.В., Лидер А.М. Оптимизация параметров спектрометра для исследования времени жизни позитронов в материалах // Современные Наукоемкие Технологии. 2013. Т. 8, № 2. С. 184–189.

2. Абзаев Ю.А., Лидер А.М., Клименов В.А., Лаптев Р.С., **Бордулев Ю.С.,** Садритдинова Г.Д., Михайлов А.А., Захарова М.А. Уточнение структуры водород-вакансионных комплексов в титане методом Ритвельда // Физика Твердого Тела. 2016. Т. 58, № 10. С. 1873–1878.

3. **Бордулев Ю.С.** и др. Исследование структуры титанового сплава ВТ1-0 при накоплении и термостимулированном выходе водорода методом спектрометрии по времени жизни позитронов // Известия Вузов Физика. 2013. Т. 56, № 11/3. С. 167–172.

4. Лаптев Р.С., Лидер А.М., Кудияров В.Н., Гаранин Г.В., **Бордулев Ю.С.** Временное и импульсное распределение аннигиляции позитронов в титановом сплаве ВТ1-0 при различном содержании водорода // Известия Вузов Физика. 2013. Т. 56, № 11/3. С. 138–143.

5. **Bordulev Y.S.**, Laptev R.S., Kudiiarov V.N., Lider A.M. Investigation of Commercially Pure Titanium Structure during Accumulation and Release of Hydrogen by Means of Positron Lifetime and Electrical Resistivity Measurements // Adv. Mater. Res. 2014. T. 880. C. 93–100.

6. **Bordulev Y.S.**, Lee K., Laptev R.S., Kudiiarov V.N., Lider A.M. Positron Spectroscopy of Defects in Hydrogen-Saturated Zirconium // Defect Diffus. Forum. 2017. T. 373. C. 138–141.

7. Kashkarov E., Nikitenkov N., Sutygina A., Laptev R., **Bordulev Y.**, Obrosova A., Liedke O., Wagner A., Zak A., Weiß S. Microstructure, defect structure and hydrogen trapping in zirconium alloy Zr-1Nb treated by plasma immersion Ti ion implantation and deposition // J. Alloys Compd. 2018. T. 732. C. 80–87.

8. Kudiiarov V.N. **Bordulev Yu.S.**, Laptev R.S., Pushilina N.S., Kashkarov E.B., Syrtanov M.S. The investigation of hydrogenation influence on structure changes of zirconium with nickel layer // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2016. T. 135. C. 012022.

9. Laptev R.S., **Bordulev Y.S.**, Kudiiarov V.N., Lider A.M., Garanin G.V. Positron Annihilation Spectroscopy of Defects in Commercially Pure Titanium Saturated with Hydrogen // Adv. Mater. Res. 2014. T. 880. C. 134–140.

10. Laptev R.S., Lider A.M., **Bordulev Y.S.**, Kudiiarov V.N., Garanin G.V., Wang W., Kuznetsov P.V. Investigation of Defects in Hydrogen-Saturated Titanium by Means of Positron Annihilation Techniques // Defect Diffus. Forum. 2015. T. 365. C. 232–236.

11. Laptev R.S., Lider A.M., **Bordulev Y.S.**, Kudiiarov V.N., Gvosdyakov D.V. The Evolution of Defects in Zirconium in the Process of Hydrogen Sorption and Desorption // Key Eng. Mater. 2016. T. 683. C. 256–261.

12. Lider A.M., Husaeva O.V., **Bordulev Y.S.**, Laptev R.S., Kudiyarov V.N. Investigation of Defects Accumulation in the Process of Hydrogen Sorption and Desorption // Adv. Mater. Res. 2015. T. 1085. C. 328–334.

13. Laptev R.S., Lider A.M., **Bordulev Y.S.**, Kudiyarov V.N., Garanin G.V. Hydrogenation-induced microstructure changes in titanium // J. Alloys Compd. 2015. T. 645. C. S193–S195.

Диссертация «Водород-индуцированные дефекты в сплаве Zr1%Nb» Бордулева Юрия Сергеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Заключение принято на заседании Отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Присутствовало на заседании 14 чел. Результаты голосования: «за» - 14 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол № 1 от «14» марта 2019 г.



председатель научного семинара,
Крючков Юрий Юрьевич, д.ф.-м.н.,
профессор отделения экспериментальной
физики Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
профессор



(подпись лица оформившего
заключение)

секретарь научного семинара, Степанова
Екатерина Николаевна, к.т.н., доцент
отделения экспериментальной физики
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет

