

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Направление подготовки/профиль 03.06.01 Физика и астрономия, 01.04.07 Физика конденсированного состояния

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Отделение Экспериментальной физики

**Научный доклад об основных результатах подготовленной  
научно-квалификационной работы**

Тема научного доклада
Закономерности изменения физико-механических свойств сплава Zr-1%Nb при комплексном ионно-плазменном модифицировании поверхности и наводороживании УДК <u>669.296.5:621.357.74:53</u>

Аспирант

Группа	ФИО	Подпись	Дата
А4-08	Кашкаров Е.Б.		

Руководитель профиля подготовки

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор-консультант	Чернов И.П.	д.ф.-м.н., профессор		

Руководитель отделения

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ	Лидер А.М.	д.т.н., доцент		

Научный руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Никитенков Н.Н.	д.ф.-м.н., профессор		

Известно, что сплавы циркония, являются важным конструкционным и функциональным материалом, применяемым в ядерной энергетике. В качестве примера можно привести их использование в ядерных реакторах для создания тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), каналов, дистанцирующих решеток и др. При эксплуатации данные сплавы подвержены водородной коррозии и охрупчиванию с последующей деградацией механических свойств. Покрытия нитрида титана (TiN), в свою очередь, перспективны в защите материалов от водородной коррозии. Кроме того, покрытия TiN обладают хорошей стойкостью к эрозии, что благоприятно сказывается и на подложку из сплавов циркония. Нитрид титана применяется в качестве защитного покрытия благодаря своей износостойкости, твердости и химической стабильности. Различия между коэффициентом термического расширения материалов покрытия и подложки могут приводить к деградации адгезионных и механических свойств покрытия. Поэтому, одной из наиболее важных задач при разработке технологии нанесения покрытий является обеспечение хорошей адгезии покрытия, в том числе в условиях термического циклирования. Для успешной эксплуатации покрытий не менее важны механические свойства покрытий (твердость, коэффициент трения, модули Юнга). Используемые в настоящей работе вакуумные ионно-плазменные технологии, в частности, плазменно-иммерсионная имплантация металлических ионов титана и осаждение покрытий нитрида титана методами магнетронного распыления и вакуумно-дугового осаждения, широко применяется для модифицирования материалов и создания тонкопленочных покрытий для улучшения их технических характеристик. Для модифицирования поверхности циркониевого сплава, а также осаждения защитных покрытий была использована гибридная вакуумная ионно-плазменная установка «Радуга-спектр».

На основе проведенных исследований были изучены особенности изменения морфологии, структуры и физико-механических свойств поверхностного титансодержащего слоя, сформированного на поверхности циркониевого сплава Э110 при плазменно-иммерсионной ионной имплантации (ПИИИ) и осаждении титана; механизмы взаимодействия водорода с поверхностным титансодержащим слоем, а также его защитные свойства по отношению к водороду; закономерности сорбции и захвата водорода циркониевым сплавом, подвергнутым комплексному ионно-плазменному модифицированию поверхности, включающему последовательную ПИИИ титана и осаждение покрытий нитрида титана. Проведенные исследования показали высокую эффективность защиты сформированных структур от проникновения водорода и перспективность использования разработанного подхода для защиты циркониевых сплавов от водородного охрупчивания.

## Список литературы

1. N.P. Neureiter, B.J. Garrick, et al., Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving Safety of U.S. Nuclear Plants, The National Academy of Sciences, 2014.
2. Birnbaum H.K. Mechanisms of hydrogen-related fracture of metals // Proceeding of the first International Conference «Environmental-Induced Cracking of metal». – USA. – 1988. – P. 21-27.
3. Terrani K.A., Balooch M., Wongsawaeng D., Jaiyen S., Olander D.R.. The kinetics of hydrogen desorption from and adsorption on zirconium hydride // Journal of Nuclear Materials. – 2010. – Vol. 397. – № 1-3. – P. 61-68.
4. Hong E., Dunand D.C., Choe H. Hydrogen-induced transformation superplasticity in zirconium // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – Vol. 35. – №11. – P. 5708-5713.
5. Zuzek E., Abriata J.P., San-Martin A., Manchester F.D. The H-Zr (Hydrogen-Zirconium) system // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. – 1990. – Vol. 11. – №4. – P. 385-395.
6. Черданцев Ю. П., Чернов И. П., Тюрин Ю. И. Методы исследования систем металл-водород // Томск: ТПУ. – 2008. – Т. 286.
7. Singh N., Avasthi D. K., Tripathi A. Electron structure and activation energy of hydrogen in  $\alpha$ -Zr using nonlinear response theory // Bulletin of materials science. – 1997. – Т. 20. – №. 3. – С. 349-358.