

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Мальгина Андрея Геннадьевича «**Высокотемпературное окисление и охрупчивание сплава Zr-1%Nb в водяном паре**», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

*Актуальность темы.* В работе рассматривается высокотемпературное окисление (ВТО) и охрупчивание сплава Zr-1%Nb, как проблема для оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) в реакторах на тепловых нейтронах в условиях проектной аварии с потерей теплоносителя.

Данная проблема возникла после обнаружения ускоренного (линейного) окисления сплава Zr-1%Nb, изготавливаемого на тройной шихте с основой из электролитического циркония, которое приводит к образованию на поверхности растрескивающихся и осыпающихся оксидных пленок, интенсивному поглощению водорода и резкому снижению пластичности оболочечных труб. Такое поведение отличается от других циркониевых сплавов на основе губчатого циркония, что подтверждается результатами российских и зарубежных исследователей.

Диссертантом выбрана актуальная тема для разработки, позволяющая решить ряд важных задач для обеспечения стойкости оболочек ТВЭлов из сплава Zr-1%Nb и его модификаций к ВТО и охрупчиванию в водяном паре применительно к проектной аварии с потерей теплоносителя.

*Научная новизна.* В процессе решения поставленных задач автор получил данные, которые имеют признаки научной новизны. Они касаются:

- определения различий и закономерностей кинетики окисления, поглощения водорода и охрупчивания в водяном паре при 1000 °С образцов труб из сплава Zr-1%Nb в зависимости от использованной циркониевой основы: электролитической, иодидной и губчатой;

- экспериментального подтверждения влияния примеси фтора в количестве 5 ppm на проявление раннего линейного окисления в водяном паре для сплава Zr-1%Nb на шихтовой основе из электролитического циркония;

- выявления различий в преимущественной диффузии кислорода для сплава Zr-1%Nb в условиях ВТО при 1000°С в зависимости от содержания в материале остаточных примесей;

- получения кинетики окисления в водяном паре при температурах от 800 до 1200 °С модификаций сплава Zr-1%Nb и установления обобщенного влияния водорода на

остаточную пластичность этих сплавов с определением пороговой степени окисления, соответствующей хрупко-вязкому переходу.

*Практическая значимость.* В результате проделанной диссертантом работы:

Развита и внедрена в практику исследований методика ВТО, обеспечивающая однородность окисления и наводороживания циркониевых образцов, что подтверждено в экспериментах на сплаве Zircaloy-4.

Для слитков и труб из сплава Zr-1%Nb рекомендовано требование по содержанию в них фтора менее 1 ppm, а также рекомендовано проведение дополнительных переплавов слитка и оптимизация их режимов для снижения содержания примеси фтора.

Полученные в работе экспериментальные данные использованы для обоснования применения модификаций сплава Zr-1%Nb с содержанием фтора менее 1 ppm в качестве оболочек твэлов реакторов на тепловых нейтронах.

*Достоверность и надёжность результатов* обеспечиваются значительным объёмом исследований, которые подтверждают выводы автора без возникновения каких-либо противоречий. В работе использовались современные методы исследований и современное высокоточное оборудование с использованием аттестованных методик. Полученные результаты воспроизводимы и согласуются с известными экспериментальными и теоретическими данными по проблеме ВТО для циркониевых сплавов.

*Замечания по автореферату:*

1. Согласно автореферату, наводороживание образцов проводилось до 800 ppm, тогда как в условиях реальной эксплуатации в реакторе содержание водорода в оболочечных трубах тепловыделяющих элементов из сплавов типа Zr-1%Nb не превышает 150 ppm. Вызывает вопрос, чем руководствовался автор при выборе экспериментальных условий для подготовки образцов.

2. Недостаточно полно освещено изучение оксидной пленки, образованной после высокотемпературного окисления на сплавах Zr-1%Nb на тройной шихте после дополнительных переплавов слитка.

*Заключение*

Представленные замечания не являются существенными и в большей степени носят рекомендательный характер. В целом автореферат написан чётким и доступным языком, а



также хорошо оформлен, что формирует положительное впечатление о проведённой работе.

Считаю, что диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК и соответствует критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС», а её автор Мальгин Андрей Геннадьевич заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».



Лидер Андрей Маркович, д.т.н., профессор

Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры, профессор отделения экспериментальной физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанных с работой диссертационного совета, и их дальнейшую работу.

Подпись Лидера Андрея Марковича удостоверяю,  
И.о. ученого секретаря ФГАОУ ВО НИ ТПУ



Новикова В.Д.

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д.  
43. Тел. +7 (3822) 705012, E-mail: [lider@tpu.ru](mailto:lider@tpu.ru)

Дата подписания отзыва: 16.01.2025 г.

