

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Мальгина Андрея Геннадьевича на тему «Высокотемпературное окисление и охрупчивание сплава Zr-1%Nb в водяном паре», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» и состоявшейся в МИСИС 20.02.2025 г.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом МИСИС 25.11.2024 г., протокол № 24.

Диссертация выполнена в научно-исследовательском отделе разработки циркониевых материалов научно-исследовательского и конструкторско-технологического отделения разработки твэлов с оксидным урановым и уран-плутониевым топливом для тепловых реакторов АО «ВНИИНМ».

Научный руководитель – д.т.н., главный научный сотрудник отдела разработки циркониевых материалов АО «ВНИИНМ» Маркелов Владимир Андреевич.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом МИСИС протокол № 24 от 25.11.2024 г. в составе:

1. Кудря Александр Викторович - доктор технических наук, профессор кафедры металловедения и физики прочности НИТУ МИСИС - председатель комиссии;
2. Беломытцев Михаил Юрьевич - доктор технических наук, профессор кафедры металловедения и физики прочности НИТУ МИСИС;
3. Филиппов Георгий Анатольевич - доктор технических наук, директор Научного центра качественных сталей ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»;
4. Лиханский Владимир Валентинович - доктор физико-математических наук, начальник отдела моделирования технологий ядерного топлива отделения физики и моделирования энергетики Курчатовского комплекса перспективной атомной энергетики ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»;
5. Полянский Александр Михайлович - доктор технических наук, начальник отдела материаловедческой экспертизы Акционерного общества «Научно-производственное объединение Энергомаш имени академика В.П. Глушко».

В качестве ведущей организации утверждено федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск.

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Определён ключевой фактор проявления в водяном паре при 1000 °С ранней (после ~ 500 секунд) линейной кинетики окисления (ЛКО) для сплава Zr-1%Nb на стандартной тройной шихте – остаточная примесь фтора (из электролитического циркония). В отсутствие фтора, как и в сплаве на основе циркониевой губки, ЛКО не наблюдается в течение 10<sup>4</sup> с и более (при остаточной пластичности оболочечных труб выше 2 %). Стойкость к высокотемпературному окислению (ВТО) повышает также очистка шлифовкой поверхности труб из сплава Zr-1%Nb от фторсодержащих и других примесей.
- Для оболочечных труб из трёх модификаций сплава Zr-1%Nb без примеси фтора определены: кинетика ВТО от 800 до 1200 °С; обобщённое влияние водорода на остаточную пластичность; степень окисления, отвечающая хрупко-вязкому переходу.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- применительно к проблематике диссертации результативно использованы развитая и верифицированная методика ВТО, испытания на диаметрально сжатие колец с определением остаточной пластичности, оптическая и электронная (ПЭМ и СЭМ) микроскопия для анализа структур и инфракрасная абсорбция определения массовых долей водорода по методу восстановительного плавления;
- установлены различия в закономерностях кинетики окисления и поглощения водорода в водяном паре при 1000 °С и снижения остаточной пластичности для труб из сплавов Zr-1%Nb на раздельной основе из электролитического, губчатого или иодидного циркония;
- выявлены различия в диффузии кислорода с образованием оксидных плёнок и ростом подокисного слоя  $\alpha$ -Zr(O) при наличии и в отсутствии остаточного фтора в сплаве Zr-1%Nb.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что в АО ЧМЗ:

- при выплавке сплава Э110 (Zr-1%Nb) с применением в шихте электролитического порошка циркония апробированы рекомендации по использованию дополнительных переплавов и оптимизации их режимов для удаления остаточной примеси фтора (в т.ч. применение увеличенного съема шлифовкой снаружи и травлением изнутри поверхности оболочечных труб) с целью устранения линейного ВТО;
- оболочечные трубы из сплава Э110опт на основе губки АО ЧМЗ по стойкости к линейному ВТО сопоставимы с трубами сплава из губки фирмы Wah Chang (США). Ожидаемый годовой эффект от их замены в ценах 2024 г. - 240 млн. руб.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

результаты получены с использованием сертифицированного оборудования по аттестованным метрологами АО «ВНИИНМ» методикам и согласуются с известными данными в литературе, полученными при сравнимых условиях испытаний.

Личный вклад соискателя состоит в:

выборе объектов исследований; развитии и верификации методики ВТО; постановке и проведении экспериментов; обработке и анализе полученных результатов; подготовке публикаций и докладов на конференциях.

По теме диссертации опубликовано 29 печатных работ, из которых 5 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ (включая 4 - в базах Web of Science/Scopus).

Пункт 2.6 Положения присуждения ученой степени кандидата наук МИСИС соискателем ученой степени не нарушен.

Диссертация Мальгина Андрея Геннадьевича соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в МИСИС, является законченной научно-квалификационной работой, в рамках которой на основании выполненных автором исследований изложены научно обоснованные решения по обеспечению стойкости оболочечных труб из сплава Zr-1%Nb в авариях LOCA в водо-водяных энергетических реакторах.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Мальгину Андрею Геннадьевичу ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 - «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Результаты голосования: при проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 5 человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 5 человек, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии  
20.02.2025 г.



А.В. Кудря