

УТВЕРЖДАЮ

И. о. проректора по науке и
стратегическим проектам
Федерального
государственного автономного
образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет»



А.А. Осадченко

02.09. 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на диссертационную работу Саблина Михаила Николаевича «Влияние структуры и термомодеформационной обработки на коррозию и радиационное формоизменение направляющих каналов из сплава Э635», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Актуальность темы диссертационного исследования. Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) – основной тип атомных реакторов, эксплуатируемых в России. В настоящее время реализуются экспериментальные работы по повышению мощности реакторов (ВВЭР-1200 и ВВЭР-1300) и увеличению глубины выгорания ядерного топлива в твэлах. При этих условиях неизбежно повышение температуры теплоносителя, возможно поверхностное кипение, увеличивается длительность контакта комплектующих тепловыделяющих сборок (ТВС) с теплоносителем, что приводит к ускорению коррозии и формоизменения циркониевых компонентов ТВС и может ограничивать их ресурс. В связи с этим актуально повышение коррозионной и деформационной стойкости циркониевых комплектующих штатных и совершенствуемых ТВС реакторов ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 и ВВЭР-1300 и обеспечение их промышленного производства.

Циркониевый сплав Э635 (Zr-1%Nb-1,2%Sn-0,35%Fe) серийно используется для изготовления направляющих каналов (НК) и элементов силового каркаса ТВС реакторов ВВЭР. Трубы для НК должны обладать достаточным уровнем механических свойств, низкими (минимальными) скоростями ползучести и радиационного роста, высокой коррозионной стойкостью в условиях реакторного облучения. Достижение этих параметров главным образом определяется микроструктурой и текстурой циркониевых труб в зависимости от технологии их производства. Таким образом, задача по установлению закономерностей формирования микроструктуры и текстуры сплава (в части размеров и концентрации фазовых выделений) при производстве и поиска оптимальных режимов получения структуры, обеспечивающий комплекс свойств, является актуальной.

Востребованность исследований подтверждена выполнением диссертационной работы в рамках «Программы реализации стратегии топливной кампании в части ядерного топлива на период 2021-2030 г.г.», «Программы научно-технических работ по реализации коммерческих поставок топлива ТВС-КВАДРАТ на АЭС «Ringhals»» и программы «Развитие циркониевых материалов и технологий для атомной энергетики на период 2022-2026 годы».

Оценка содержания диссертации. Диссертационная работа Саблина М.Н. состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка использованных источников и приложения (акт о практическом использовании результатов диссертационной работы). *Во введении* обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна результатов и их практическая ценность, обоснована достоверность полученных результатов. *В первой главе* рассмотрены литературные данные о влиянии структурного состояния сплава Э635 на его радиационный рост и ползучесть, а также факторы, влияющие на коррозионное поведение. В основном, данные по радиационному росту и радиационной ползучести были получены для материалов оболочечных труб применительно к условиям эксплуатации твэлов, что не соответствует температурному интервалу эксплуатации НК из циркониевых сплавов. Данные по влиянию структурного состояния на радиационную ползучесть при сжатии труб НК из сплава Э635 отсутствуют. Деформация радиационного роста циркониевых сплавов в выбранном кристаллографическом направлении пропорциональна фактору анизотропии роста. Увеличение осевой компоненты

текстуры снижает деформацию радиационного роста. Данные по влиянию текстуры на радиационную ползучесть при сжатии и коррозию сплава Э635 отсутствуют. Основными структурными факторами, оказывающими влияние на коррозию циркониевых сплавов, следует считать состав твёрдого раствора α -Zr и второй фазы. В сплаве Э635 могут наблюдаться интерметаллиды разных типов, которые отличаются как по размеру, так и по элементному составу. Данные по влиянию состава интерметаллидов на коррозию сплава Э635 отсутствуют. *Во второй главе* описаны материалы и методы исследований структуры, кратковременных и длительных механических свойств в исходном состоянии и после нейтронного облучения. *В третьей главе* представлены результаты исследований по влиянию режимов термической обработки на формирование интерметаллидов в сплаве Э635, конкретизации условий формирования Т-фазы, а также влиянию размера, состава и равномерности распределения интерметаллидов на коррозию сплава Э635. Представлены результаты модификации режимов термической обработки при изготовлении труб НК из сплава Э635 в промышленных условиях. *В четвертой главе* представлены результаты по оценке влияния степени рекристаллизации труб НК из сплава Э635 на их стойкость к радиационной ползучести при сжатии и растяжении, радиационному росту и кратковременным механическим свойствам до и после нейтронного облучения, а также влиянию степени рекристаллизации на изменение структуры труб после облучения. *В пятой главе* приводятся результаты по оценке влияния текстуры на кратковременные механические свойства труб после нейтронного облучения, радиационную ползучесть, радиационный рост и стойкость к коррозии.

Работа структурирована, отдельные части чётко взаимосвязаны между собой, изложение диссертации технически грамотное.

Основные положения работы, полученные результаты и выводы достаточно полно описаны в публикациях в журналах из перечня ВАК РФ (8 статей). Оформлен 1 патент. Работа неоднократно представлялась на научных конференциях. Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации.

Научная новизна результатов исследований. Впервые показано:

- что наличие Т-фазы в структуре сплава Э635 не только снижает его пластичность и вязкость, но и коррозионную стойкость. Образование Т-фазы в сплаве Э635 возможно как в процессе медленного охлаждения в двухфазной

области, так и в однофазной области при повышении температуры отжига свыше 600 °С;

- что неравномерное распределение фазы Лавеса в структуре изделий из сплава Э635 снижает его коррозионную стойкость;

- что повышение степени рекристаллизации повышает стойкость сплава Э635 к радиационной ползучести при сжатии и растяжении, не влияет на его кратковременные механические свойства и стойкость к радиационному росту;

- что тангенциальная текстура и радиально ориентированные выделения гидридной фазы не влияют на коррозионную стойкость сплава Э635.

Практическая значимость и реализация полученных результатов.

Согласно акту об использовании результатов диссертационной работы, её результаты были использованы для повышения характеристик серийной продукции и внедрения в серийное производство новой продукции. Был введён оптимизированный промежуточный отжиг, позволивший повысить коррозионную стойкость труб НК. Внедрен режим финишного отжига труб НК, обеспечивающий полностью рекристаллизованное структурное состояние материала труб и повышение их стойкости к радиационной ползучести. Разработаны и внедрены в серийное производство технические условия и техническая спецификация на трубы НК с гидротормозом с измененными требованиями к коэффициенту ориентации гидридов в районе гидротормоза трубы.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертационной работе. В диссертационной работе получены новые результаты, которые могут быть использованы разработчиками ТВС для ВВЭР и реакторов зарубежного производства (в англ., PWR), научными организациями и промышленными предприятиями, специализирующимися на разработке и изготовлении металлических изделий, эксплуатирующихся в напряженном состоянии.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Достоверность результатов обеспечена использованием современных методов исследований и аналитического оборудования для измерений, воспроизводимостью и статистической обработкой результатов исследований, а также соответствием изготовленных труб требованиям

конструкторской документации. Полученные результаты по влиянию степени рекристаллизации и текстуры на характеристики радиационной ползучести и радиационного роста согласуются с известными экспериментальными и теоретическими данными для отечественных и зарубежных сплавов циркония.

Замечания по диссертационной работе:

1. Не приведены данные о влиянии наличия/отсутствия Т-фазы в структуре сплава Э635 на его стойкость к нодулярной коррозии.
2. В тексте диссертации не приведены данные о контроле примеси Fe в исходных заготовках для получения образцов, а также данные об элементном составе слитков из циркония для получения труб НК, используемых при отработке режимов деформационно-термической обработки сплава Э635.
3. В тексте диссертации обнаружены описки, орфографические и другие незначительные ошибки, которые не снижают общий уровень диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертационная работа актуальна, обладает научной и практической значимостью, её основные результаты обоснованы и достоверны, она полностью отвечает критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете (МИСИС), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Работа изложена технически грамотно, терминология соответствует принятой среди специалистов в рассматриваемой области.

Диссертационная работа «Влияние структуры и термдеформационной обработки на коррозию и радиационное формоизменение направляющих каналов из сплава Э635» является законченной и выполнена на высоком научно-техническом уровне. Ее автор, Саблин Михаил Николаевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Диссертация рассмотрена на семинаре Научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга ТПУ 22 августа 2025 с участием автора.

Руководитель Научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга ТПУ, доктор физико-математических наук, профессор



Кривобоков Валерий Павлович

Подпись Кривобокова В.П. подтверждаю.

И.о. учёного секретаря Учёного Совета ТПУ



Новикова Валерия Дмитриевна

Телефон: (3822) 606260

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, д.30.