



Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии  
Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

Тема работы
<b>Коррозионная стойкость циркониевого сплава Zr-1 Nb с защитным Сг/Та покрытием при высокотемпературном окислении</b>

УДК 620.193:669.269.058

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А95	Корнеев Степан Павлович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Сыртанов М.С.	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов М.А.	д.экон.наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Передерин Ю.В.	к.т.н		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОЯТЦ	Селиваникова Ольга Валерьевна.			

Компетенции выпускников ООП «Ядерные физика и технологии» по направлению  
14.03.02 Ядерные физика и технологии,  
специализация «Пучковые и плазменные технологии»  
(2019 года приёма)

Код компетенции	Наименование компетенции
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
ОПК(У)-1	Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ОПК(У)-2	Способен осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, предоставлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
ОПК(У)-3	Способен использовать в профессиональной деятельности современные информационные системы, анализировать возникающие при этом опасности и угрозы, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
ПК(У)-1	Готов принимать участие в теоретических исследованиях в различных областях физики, связанных с современными высокотехнологическими способами энергетического воздействия на материалы, основанными на использовании радиационных и плазменных потоков, разрабатывать адекватные физические и математические модели изучаемых процессов
ПК(У)-2	Способен участвовать в экспериментальных исследованиях в различных областях физики, связанных с воздействием плазмы и пучков заряженных частиц на вещество, самостоятельно осваивать современную физическую аналитическую и технологическую аппаратуру, применять современные методы исследования свойств материалов и различных структур, проводить стандартные и сертификационные испытания технологических процессов, оборудования и изделий.
ПК(У)-3	Способен осуществлять самостоятельный поиск, изучение и использование научно-технической информации по тематике исследования, применять современные компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области
ПК(У)-4	Способен проектировать плазменно-пучковые технологические процессы и оборудование для применения в научных исследованиях и промышленности

<b>Код компетенции</b>	<b>Наименование компетенции</b>
ПК(У)-5	Готов к участию в производственно-технологической деятельности, связанной с применением плазменных и пучковых технологий для обработки материалов и синтеза новых материалов (в том числе нанесению функциональных покрытий), определению основных параметров технологических процессов, анализу физических и механических свойств изделий и материалов.
ПК(У)-6	Способен применять современные цифровые технологии и пакеты прикладных программ для расчета технологических параметров, обосновывать принятие конкретного технического решения при разработке технологических процессов.
ПК(У)-7	Способен к контролю за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования.



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии  
Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:  
Старший преподаватель ОЯТЦ  
\_\_\_\_\_ 03.10.2022 г. Селиваникова О.В.  
(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
0A95	Корнеев Степан Павлович

Тема работы:

<b>Коррозионная стойкость циркониевого сплава Zr-1 Nb с защитным Cr/Ta покрытием при высокотемпературном окислении</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№34-109/с от 03.02.2023 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.2023 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Мишени для магнетронного распыления из Ta и Cr, магнетронная распылительная система, пирометр Optris CT laser 3MH1CF4, атмосферная печь ATS 3210, Applied Test Systems Inc, аналитические весы CP 124S, сканирующего электронного микроскопа MIRA3, приставка для энергодисперсионного анализа Ultim Max 40, дифрактометр XRD-7000S.</p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной).</i></p>	<p>Обзор литературных источников, Осаждение покрытий Cr/Ta, провести испытания полученных образцов на коррозионную стойкость в перегретом паре и на воздухе, провести анализ структурно – фазового состояния до и после коррозионных испытаний, Выявить закономерности окисления циркониевого сплава с Cr/Ta покрытием.</p>

<b>Перечень графического материала</b>	
<i>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Титульный лист.</li> <li>2. Актуальность.</li> <li>3. Причины выбора тантала.</li> <li>4. Цели и задачи.</li> <li>5. Пароциркониевая реакция.</li> <li>6. Используемое оборудование.</li> <li>7. Нанесение покрытий.</li> <li>8. Фазы исследуемых покрытий.</li> <li>9. Методика эксперимента.</li> <li>10. Окисление на воздухе.</li> <li>11. Анализ снимков сканирующей электронной микроскопии.</li> <li>12. Рентгеноструктурный анализ.</li> <li>13. Окисление в потоке водяного пара (1200 °С).</li> <li>14. Окисление в потоке водяного пара (1250 – 1400 °С).</li> <li>15. Снимки СЭМ для Cr-Ta-1(1200°С).</li> <li>16. Снимки СЭМ для Cr-Ta-1(1250-1400°С).</li> <li>17. Анализ снимков СЭМ.</li> <li>18. Заключение.</li> </ol>
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Гасанов М.А., д.экон.наук, профессор отделения социально-гуманитарных наук
Социальная ответственность	Передерин Ю.В., к.т.н., доцент отделения ядерно-топливного цикла

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	03.10.2022 г.
---	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Сыртанов М.С.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A95	Корнеев С.П.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Обучающемуся:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А95	Корнееву Степану Павловичу

<b>Школа</b>	<i>ИЯТШ</i>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<i>НОЦ Б.П. Вейнберга</i>
<b>Уровень образования</b>	<i>бакалавр</i>	<b>Направление/специальность</b>	<i>14.03.02 Ядерные физика и технологии</i>

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей в соответствии со штатным расписанием НИ ТПУ</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>- районный коэффициент- 1,3; - коэффициент дополнительной заработной платы -1,15; - накладные расходы – 16%</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30 %.</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Анализ потенциальных потребителей результатов исследования. Исследование конкурентных технических решений. Проведение SWOT-анализа</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Определение трудоемкости работ. Разработка графика проведения научного исследования. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Оценка сравнительной эффективности проекта</i>

1. *Оценка конкурентоспособности технических решений*
2. *Матрица SWOT*
3. *Альтернативы проведения НИ*
4. *График проведения и бюджет НИ*
5. *Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ*

*Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):*

1. *Оценка конкурентоспособности технических решений*
2. *Матрица SWOT*
3. *Альтернативы проведения НИ*
4. *График проведения и бюджет НИ*
5. *Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ*

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	13.03.2023 г.
---	---------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор ОСГН	Гасанов М.А.	д.экон.наук		13.03.2023 г.

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А95	Корнеев Степан Павлович		13.03.2023 г.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Обучающемуся:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А95	Корнеев Степан Павлович

<b>Школа</b>	<i>ИЯТШ</i>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<i>НОЦ Б.П. Вейнберга</i>
<b>Уровень образования</b>	<i>бакалавр</i>	<b>Направление/специальность</b>	<i>14.03.02 Ядерные физика и технологии</i>

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

<p>1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</i></li> <li>– <i>опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</i></li> <li>– <i>негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</i></li> <li>– <i>чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</i></li> </ul>	<p><i>Объектом исследования: покрытие Cr/Ta</i> <i>Область ядерная энергетика</i> <i>Рабочая зона: лаборатория 106 физического корпуса ТПУ</i> <i>Размеры помещения: 32 м<sup>2</sup></i> <i>Наименование оборудования рабочей зоны: ПЭВМ.</i></p>
<p>2. <i>Перечень законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</i></li> <li>– <i>ГОСТ Р ИСО 6385-2016. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем.</i></li> </ul>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<p>1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</i></li> <li>– <i>действие фактора на организм человека;</i></li> <li>– <i>приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</i></li> <li>– <i>предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</i></li> </ul>
<p>2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>механические опасности (источники, средства защиты);</i></li> <li>– <i>термические опасности (источники, средства защиты);</i></li> <li>– <i>электробезопасность (в т.ч. статическое</i></li> <li>– <i>электричество, молниезащита –</i></li> <li>– <i>источники, средства защиты);</i></li> <li>– <i>пожаровзрывобезопасность (причины,</i></li> <li>– <i>профилактические мероприятия,</i></li> <li>– <i>первичные средства пожаротушения)</i></li> </ul>

3. <i>Защита в чрезвычайных ситуациях:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>перечень возможных ЧС на объекте;</i></li> <li>– <i>выбор наиболее типичной ЧС;</i></li> <li>– <i>разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</i></li> <li>– <i>разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</i></li> <li>– <i>разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</i></li> </ul>
4. <i>Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</i></li> <li>– <i>организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</i></li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	13.03.2023 г.
---	---------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Передерин Ю.В.	к.т.н		13.03.2023 г.

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А95	Корнеев Степан Павлович		13.03.2023 г.



## Реферат

Выпускная квалификационная работа: 123 страницы, 30 рисунков, 23 таблиц, 104 источников.

Ключевые слова: авария с потерей теплоносителя, Cr/Ta покрытие, высокотемпературное окисление, *in situ* дифракция, диффузионный барьер, взаимная диффузия, циркониевый сплав, коррозионная стойкость.

Объектом исследования является (ются): хром – танталовое покрытие, полученное методом магнетронного распыления, предназначенное для подавления взаимной диффузии хрома и циркония при высокотемпературном окислении циркониевой топливной оболочки ядерного реактора в аварийных условиях.

Цель работы: установить закономерности и механизмы окисления циркониевого сплава Э110 с покрытием Cr/Ta на воздухе и в среде перегретого водяного пара.

В процессе исследования проводились: осаждение двухслойного покрытия Cr/Ta на циркониевой подложке методом магнетронного распыления, окисление образцов на воздухе и в перегретом водяном паре, рентгеноструктурный анализ (РСА), *in situ* дифракция, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), анализ коррозионных привесов.

В результате исследования: было получено 5 серий образцов с двумя разными структурами тантала:  $\alpha$  – Ta и  $\beta$  – Ta. Было выявлено, что  $\alpha$  – Ta выполняет защитную функцию лучше, нежели  $\beta$  – Ta. В ходе *in situ* РФА было выяснено, что танталовый подслои предотвращает взаимную диффузию хрома и циркония до 1250 °С. По результатам РСА было выявлено образование фазы Cr<sub>2</sub>Ta при 60 минутах окисления в среде воздуха. Анализы привесов подтвердили большую пригодность  $\alpha$  – Ta.

Экономическая эффективность работы: данная работа экономически эффективна, поскольку позволяет производить аварийно устойчивые топливные оболочки.

## Содержание

Введение .....	2
Глава 1. Современные сплавы на основе циркония.....	6
1.1 Zircaloy.....	6
1.2 Отечественные сплавы.....	8
1.3 ZIRLO .....	9
1.4 M5.....	9
Глава 2. Покрытия топливных оболочек .....	12
2.1 Защитные покрытия .....	12
2.1.1 Покрытия на основе железа .....	12
2.1.2 Покрытия на основе нитридов .....	14
2.1.3 Покрытия на основе карбидов .....	16
2.1.4 Покрытия на основе хрома.....	16
2.2 Механизм деградации покрытий на основе хрома .....	21
2.3 Барьерные слои.....	24
2.3.1 Барьерные слои на основе тугоплавких металлов .....	26
2.3.2 Барьерный слой Мо.....	28
2.3.3 Барьерные слои на основе нитрида хрома.....	32
Глава 3. Материалы и методы исследования .....	36
3.1 Подготовка образцов.....	36
3.2 Осаждение покрытий .....	36
3.3 Фазовые состояния исследуемых образцов.....	38
3.4 Высоктемпературное окисление.....	39
3.5 Характеристика образцов .....	40
Глава 4. Результаты исследования.....	43

4.1 Окисление на воздухе .....	43
4.2 Окисление в потоке водяного пара.....	47
4.3 Результаты in situ дифракционных исследований .....	53
4.4 Механизм окисления циркониевого сплава Э110 с Cr/Ta покрытием.....	55
Заключение.....	57
Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	59
Введение .....	59
5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения .....	61
5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	61
5.1.2 Анализ конкурентных технических решений .....	62
5.1.3 SWOT-анализ.....	64
5.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	68
5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	68
5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ .....	69
5.3. Бюджет научно-технического исследования.....	73
5.3.1 Расчет материальных затрат НТИ .....	73
5.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ .....	74
5.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы.....	75
5.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	77
5.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	77

5.3.6 Контрагентные расходы .....	78
5.3.7 Накладные расходы.....	79
5.3.8 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	79
5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .	80
Заключение.....	84
Глава 6 Социальная ответственность .....	85
6.1 Правовые вопросы обеспечения безопасности .....	85
6.1.1 Организация рабочей зоны исследователя .....	86
6.2 Производственная безопасность.....	89
6.2.1 Опасные и вредные производственные факторы.....	90
6.3 Аварийные и чрезвычайные ситуации.....	100
Заключение.....	102
Список источников.....	103

## Введение

В настоящее время сплавы на основе циркония крайне распространены как материалы тепловыделяющих оболочек (ТВЭЛ) реакторов типа ВВЭР (в иностранной классификации - PWR), поскольку они обладают рядом свойств, критически важных для стабильной работы ядерного реактора: низкое сечение захвата тепловых нейтронов, стойкость к радиационному распуханию. При всех достоинствах циркония, он имеет серьезный недостаток, касающийся его взаимодействия с водяным паром (пароциркониевая реакция) при высоких температурах, которое может возникнуть при аварийных ситуациях. Результатом этой экзотермической реакции является не только выделение водорода и тепла, но и охрупчивание оболочки и уменьшение ее исходной толщины ввиду окисления циркония [1]. Реакция начинается при температуре 950 °С, при 1200 °С она становится самоподдерживающейся. Аварии на "Три Майл - Айленд"(США) и "Фукусиме"(Япония) послужили печальным примером опасности пароциркониевой реакции.

В настоящее время рассматривается несколько подходов к решению этой проблемы. Первый — это разработка новых материалов топливной оболочки. Научные группы предлагают использовать сплавы Мо [2,3], SiC [4,5] и современные стали [6,7]. Однако этот метод чрезвычайно дорог и требует много времени для реализации. Вторым способом - осаждение защитных покрытий на оболочки, который намного дешевле, проще и более осуществим, чем первый способ. Очевидно, что к этим покрытиям должны предъявляться те же требования, что и к циркониевым оболочкам [1]. Кроме того, особенно важны устойчивость материалов к высокотемпературному окислению, низкая скорость поглощения водорода и хорошая адгезия с цирконием. В настоящее время наиболее перспективными покрытиями являются покрытия на основе хрома. Среди других материалов хром выделяется рядом преимуществ:

- Коррозионная стойкость хромовых покрытий по большей мере обусловлена образующейся в результате окисления пленке  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [8].
- Хром имеет хорошие адгезионные свойства. В работе [9] отмечается, что На сплавах циркония с хромовым покрытием после таких деформаций, как тепловое расширение, вздутие или радиационное распухание оболочки в нормальных условиях эксплуатации или аварийных условиях, включая закалку перегретых твэлов, не было обнаружено отслоения покрытия.
- Сечение поглощения тепловых нейтронов хрома 2,9 барн, мало по сравнению с другими материалами, используемыми для нанесения покрытий [10].
- Модуль упругости Cr примерно в два раза больше, чем у Zr, что помогает улучшить общую жесткость оболочки [11].
- Температура эвтектики Cr-Zr составляет около 1332 °С, что выше расчетных аварийных температур. С другой стороны, определяется верхний температурный предел защитного действия покрытия в случаях тяжелых аварий [12].

Тем не менее, существует проблема с ростом температуры значительного увеличения скорости взаимной диффузии хрома и циркония. Подобная взаимная диффузия приводит к образованию интерметаллического соединения  $\text{Cr}_2\text{Zr}$  на границе "покрытие - подложка", а также увеличению зерен  $\text{ZrO}_2$  на границах зерен хрома, в следствие чего значительно усиливается диффузия кислорода в циркониевый сплав. Это ведет к растрескиванию покрытия и беспрепятственному проникновению кислорода в циркониевый сплав.

Для предотвращения взаимодействия хрома с цирконием при высоких температурах необходимо создавать диффузионный барьер. Для обеспечения работоспособности топливной оболочки с хромовым покрытием желательно,

чтобы материал диффузионного барьера удовлетворял следующим требованиям[14]:

- Взаимодействовать с цирконием без образования эвтектик (выше 1332 °С) и других соединений.
- Предотвращать диффузию хрома и других нанесенных материалов с циркониевым сплавом в течении всего срока работы топливной оболочки.
- Не влиять на энергетические характеристики реактора.

Рядом научных групп рассматривается возможность использования тугоплавких металлов в качестве барьерных подслоев [15,16,17]. Однако многие тугоплавкие металлы обладают очень большими сечениями захвата тепловых нейтронов, по сравнению с цирконием (0,18 барн): родий (143,5 барн), рений (94 барн), гафний (104 барн), иридий (211 барн) [10]. Относительно небольшими сечениями обладают тантал (20,4 барн), вольфрам (18,1 барн) и рутений (20 барн)[10].

Авторы обзорной статьи [14] провели анализ теоретических и экспериментальных данных. Полагается, что использование чистых Ti, V, Ru и Os в качестве диффузионных барьеров неэффективно, поскольку они не предотвращают взаимную диффузию и образуют хрупкие интерметаллические вместе с Cr и Zr. Образование интерметаллических соединений приведет к растрескиванию и отслоению покрытия. По мнению тех же авторов, более перспективным является использование Ta, Nb или W, поскольку они низкую взаимную диффузию в системе подложка/барьер/покрытие.

Тантал, теоретически, не образует промежуточных фаз с цирконием. Его растворимость в  $\beta$ -Zr составляет 13,3 ат.% при 1200 °С, 7,7 ат.% при 1000 °С. С хромом тантал образует фазу Лавеса Cr<sub>2</sub>Ta. При этом, растворимость тантала в хrome примерно 1 ат.%; растворимость хрома в тантале 5 ат.%[14]. Тем не менее, действительное поведение танталового диффузионного барьера до сих пор не изучено.

Поэтому, данная работа посвящена исследованию механизмов окисления и взаимной диффузии Cr покрытия с Ta подслоем, нанесенных на подложку из сплава Э110 при помощи магнетронного распыления.

**Цель настоящей работы** – установление закономерностей и механизмов окисления циркониевого сплава Э110 с покрытием Cr/Ta на воздухе и в среде перегретого водяного пара.

Задачи:

1. Нанести покрытие Cr/Ta на циркониевую оболочку из сплава Э110 при помощи магнетронной распылительной системы.
2. Провести испытания полученных образцов на коррозионную стойкость в перегретом паре и на воздухе.
3. Провести анализ структурно – фазового состояния до и после коррозионных испытаний.
4. Выявить закономерности окисления циркониевого сплава с Cr/Ta покрытием.



## Глава 1. Современные сплавы на основе циркония

На сегодняшний день, хотя многие сплавы на основе Zr были изучены на предмет потенциального использования в ядерных реакторах, лишь некоторые из них имеют коммерческое значение, и новые сплавы на основе Zr постоянно разрабатываются.

### 1.1 Zircaloy

Нелегированный Zr демонстрирует плохую коррозионную стойкость, которая еще ухудшается с увеличением содержания азота. 2,5% Sn, как хороший компромисс между коррозионной стойкостью, прочностью и технологичностью, был добавлен к нелегированному Zr для снижения негативного влияния N. Этот сплав был назван Zry-1 [18]. Однако добавление Sn не могло оказать полного положительного эффекта, если в сплаве не присутствовали Fe, Ni или Cr. Кроме того, скорость коррозии сплавов Zr-Sn уменьшается с уменьшением содержания Sn [18]. Соответственно, содержание Sn было уменьшено до 1,8% на основе Zry-1, а Fe, Ni и Cr были добавлены для повышения коррозионной стойкости бинарного сплава, что привело к созданию Zry-2. Для дальнейшего улучшения коррозионной стойкости и технологичности Zry-2 были разработаны три прототипа сплава, а именно Zry-3A, 3B и 3C (химический состав приведен в Таблица 1). Zry-3 не был принят коммерческими электростанциями из-за более низкой прочности (около 75% от Zry-2).

Таблица 1 - Состав (содержание %) различных сплавов на основе Zr

Сплав	Содержание добавок, %				
	Sn	Fe	Cr	Nb	Другие
Zry-1	2,5	-	-	-	

Zry-2	1,5	0,12	0,1	-	0,12 O, 0,05 Ni
Zry-3A	0,25	0,25	-	-	
Zry-3B	0,5	0,4	-	-	
Zry-3C	0,5	0,2	-	-	0,2 Ni
Zry-4	1,5	0,2	0,1	-	0,09 – 0,13 O
Э110	-	-		0,95 – 1,05	≤0,10 O
Э125	-	-		2,20 – 2,60	2,20 – 2,60 O
Э635	1,10 – 1,30	0,3 – 0,4		0,95 – 1,05	0,05 – 0,12 O
ZIRLO	1,02	0,1		1,01	0,01 – 0,15 O
M5	-	0,05	0,015	1	0,09 – 0,13 O

Zry-2 демонстрирует превосходную коррозионную стойкость при повышенных температурах в паре, поскольку Fe, Cr и Ni, по отдельности или в комбинации, повышают коррозионную стойкость, что делает его наиболее подходящим для условий кипящего водо – водяного реактора (ВВЭР).

Между тем, Zry-4 рекомендуется использовать в условиях водо – водяного энергетического реактора из-за того, что Zry-4 обеспечивает почти такие же механические свойства, но поглощение водорода Zry-4 ниже, чем Zry-2 [19]. Таким образом, Zry-2 и Zry-4 стали стандартными материалами топливных оболочек для реакторов BWR и PWR, соответственно, с начала 1970-х годов. Для улучшения использования U и снижения стоимости ядерного топливного цикла было выяснено, что Zry-4 с низким содержанием Sn (1,32-1,44%) обладает превосходной коррозионной стойкостью в реакторах ВВЭР без существенного влияния на поглощение водорода [20]. Впоследствии Zry-2 и Zry-4 с низким содержанием Sn стали основой и эталоном для других топливных оболочек на основе Zr.

## 1.2 Отечественные сплавы

Вместо добавления Sn, российские специалисты больше внимания уделяли эффектам добавления Nb, который оказывает благоприятное воздействие, аналогичное добавлению Sn [21]. Сплавы Э110, Э125 и Э635 были успешно разработаны в Советском Союзе для реакторов ВВЭР и РБМК (Реактор Большой Мощности Канальный) в 1958, 1958 и 1971 годах соответственно [21]. Было отмечено, что оба сплава Э110 и Э635 обладают высокой прочностью, сопротивлением ползучести и устойчивостью к радиационному распуханию, за исключением различий в их характеристиках (Рисунок 1): Э110 обладает высокой коррозионной стойкостью в высокотемпературной воде под давлением, но интенсивно корродирует в среде кипящей воды в присутствии Li, а Э635 обеспечивает хорошие механические свойства и коррозионную стойкость в кипящей воде, но уступает Э110 в воде под давлением [21].

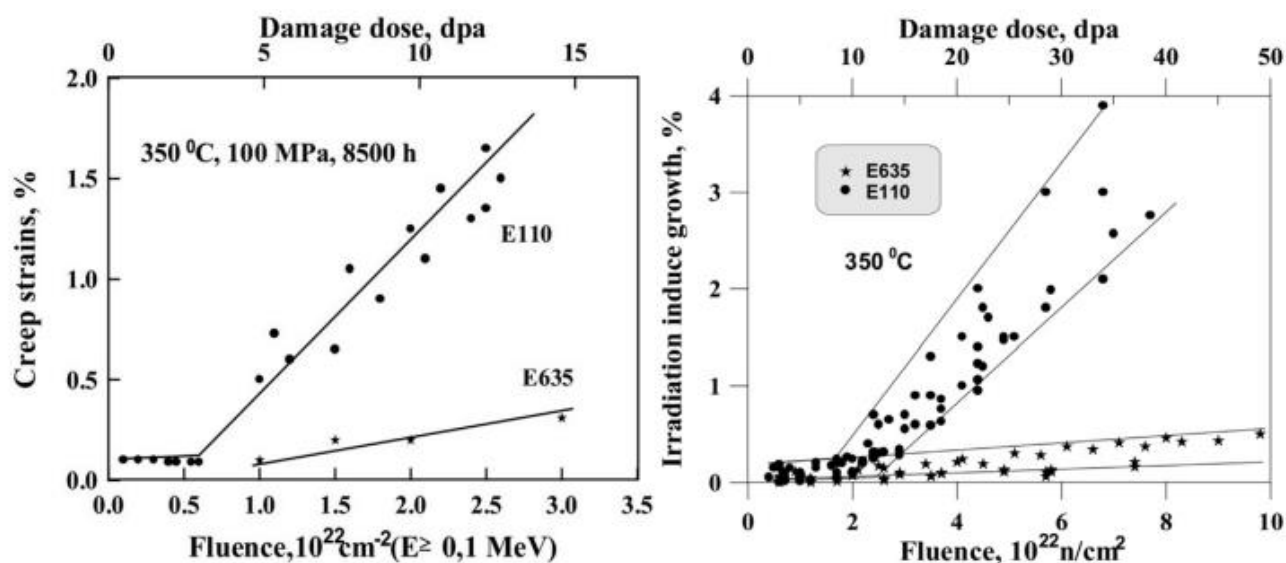


Рисунок 1 - Ползучесть и радиационное распухание Э110 и Э635 [22].

В качестве оптимального решения для ТВС ВВЭР было предложено использовать Э110 в качестве материала оболочек твэлов и Э635 в качестве материала каркасных компонентов, поскольку Э110 имеет более высокую равномерную коррозионную стойкость, но недостаточную геометрическую

стабильность, которая может быть компенсирована преимуществами Э635 [22]. Э125 используется для труб кожуха ВВЭР-440 [21].

### **1.3 ZIRLO**

Сплав Zr-Sn-Nb-Fe с обработкой отжигом при 873 К в течение 8 ч, названный ZIRLO, был разработан на основе российского сплава E635 в 1987 году [23]. По результатам длительного испытания на коррозию в автоклаве и испытания на облучение при высокой степени выгорания в среде ВВЭР, ZIRLO показал более низкую скорость коррозии в автоклаве при высокой температуре, более низкую скорость коррозии в реакторе и более высокую стойкость к ползучести по сравнению с Zry-4 [23]. Впоследствии эти достоинства были подтверждены еще раз, что внутриреакторная ползучесть и рост при облучении ZIRLO были примерно на 80% и 50%, соответственно, ниже, чем у Zry-4 [24]. Кроме того, кроме Zry-4, ZIRLO обладает лучшей коррозионной стойкостью, меньшим ростом при облучении и лучшими свойствами ползучести для топлива с высоким выгоранием, чем другие сплавы Zr-Nb, и к концу 1990-х годов использовался почти на всех АЭС, спроектированных компанией Westinghouse в США, а также в нескольких европейских странах [25].

### **1.4 M5**

Как было описано ранее, снижение содержания Sn в сплавах на основе Zr приводит к снижению скорости коррозии, поэтому современная тенденция оптимизации существующих или разработки новых сплавов заключается в снижении содержания Sn. Новые сплавы на основе Zr с более низким содержанием Sn (1,3%) были получены AREVA и ее промышленными партнерами: четвертичные материалы (Zr, Sn, Fe и V, обозначаемые как M4), (Zr, Sn, Fe и Nb, включая Сплав 3, Сплав 1) и тройные материалы (Zr, Nb и O,

включая Сплав 2 и Сплав 5, обозначаемые как М5). Но, так или иначе, только М5 был применен в качестве материала оболочки в широком диапазоне сред ВВЭР при выгорании до 78 ГВтд на метрическую тонну урана (MTU) [26]. М5, разработанный на основе российского материала E110 в 1980-х годах, представляет собой сплав Zr-Nb без Sn с контролируемым содержанием O, Fe и S (серы) и отличается однородной высокоочищенной дисперсией precipitates  $\beta$ -Nb в полностью рекристаллизованной микроструктуре, которая в первую очередь ответственна за преимущественное сопротивление ползучести [27]. Отсутствие Sn, контролируемая химия сплава и оптимизированная термообработка приводят к очень высокой коррозионной стойкости и превосходным механическим свойствам в условиях высокой степени выгорания и высокой дозы облучения. Кислород оказывает благоприятное влияние на термическую ползучесть в диапазоне 900-1800 частиц на миллион (ppm), в то время как содержание углерода должно быть относительно низким из-за его негативного влияния на коррозию в паре при 400 °C. Аналогично, содержание S оптимизировано до уровня ниже 10 мд, поскольку преднамеренное добавление S способно обеспечить улучшенную высокотемпературную механическую прочность оболочки М5 без ухудшения коррозионной стойкости [28]. Более того, значительное улучшение сопротивления ползучести может быть получено при низкотемпературной (600 °C) обработке [29].

Различия в химическом составе и термической обработке отличали М5 от других сплавов на основе Zr, обеспечивая лучшие свойства. Во многих литературных источниках [30, 31, 32] сообщается, что М5 считался лучшим выбором, чем Zry-4, благодаря впечатляющим улучшениям в коррозионной стойкости и сопротивлении ползучести. Также было отмечено, что М5 показывает очень хорошее поведение в условиях АСПТ превосходит Zry-4 и другие сплавы на основе Zr (даже сплавы Zr-1%Nb) при том же уровне выгорания благодаря более низкому поглощению водорода [33]. Вследствие этого М5 получил широкое одобрение органов безопасности США,

Великобритании, Китая и т.д., и к концу 2011 года более 4,5 миллионов оболочек M5 было использовано в 94 коммерческих реакторах ВВЭР [34].

## **Глава 2. Покрытия топливных оболочек**

В настоящее время разрабатывается множество различных покрытий, потенциально пригодных для использования в качестве защиты топливной оболочки от коррозии. В рамках этого раздела будут разобраны основные результаты, которые были получены научными группами в ходе исследования потенциально перспективных покрытий.

### **2.1 Защитные покрытия**

#### **2.1.1 Покрытия на основе железа**

В основном работы по данному виду покрытий посвящены изучению поведения FeAlCr. Как было выяснено в работе [35], покрытия на основе Fe требуют барьерного слоя между основным слоем и подложкой для предотвращения образования эвтектики Zr-Fe. В работе [36] осуществлялось исследование по высокотемпературному окислению сплава Zry-2 с покрытием FeCrAl, нанесенного методом магнетронного распыления. Авторами было выяснено, что покрытие с толщиной 1 мкм предотвращает окисление образца сплава в среде пара при температуре 700 °С в течении 15 часов, в то время как такая же тонкая пленка толщиной 0,3 мкм уже не дает аналогичного результата. Проведенные далее автоклавные испытания в условиях реактора типа ВВР в течении 20 дней демонстрирует достойное поведение без потери целостности покрытия. Научной группой [37] были проведены испытания образцов циркониевого сплава с покрытием FeCrAl, полученного методом лазерного распыления и ионно – дугового имплантирования. Таким образом авторы пытались добиться улучшения адгезии покрытия по отношению к подложке. Полученные образцы демонстрируют улучшенные параметры окисления, ползучести и стойкости к облучению по сравнению с используемыми Zr покрытиями. Хорошая радиационная стойкость также

наблюдалась для сплавов FeCrAl при облучении тяжелыми ионами [38]. Однако в работах отмечается, что из – за быстрой диффузии железа в цирконий наблюдается образование толстых слоев  $\text{FeZr}_2$  и  $\text{FeZr}_3$  (Рисунок 2 а,б).

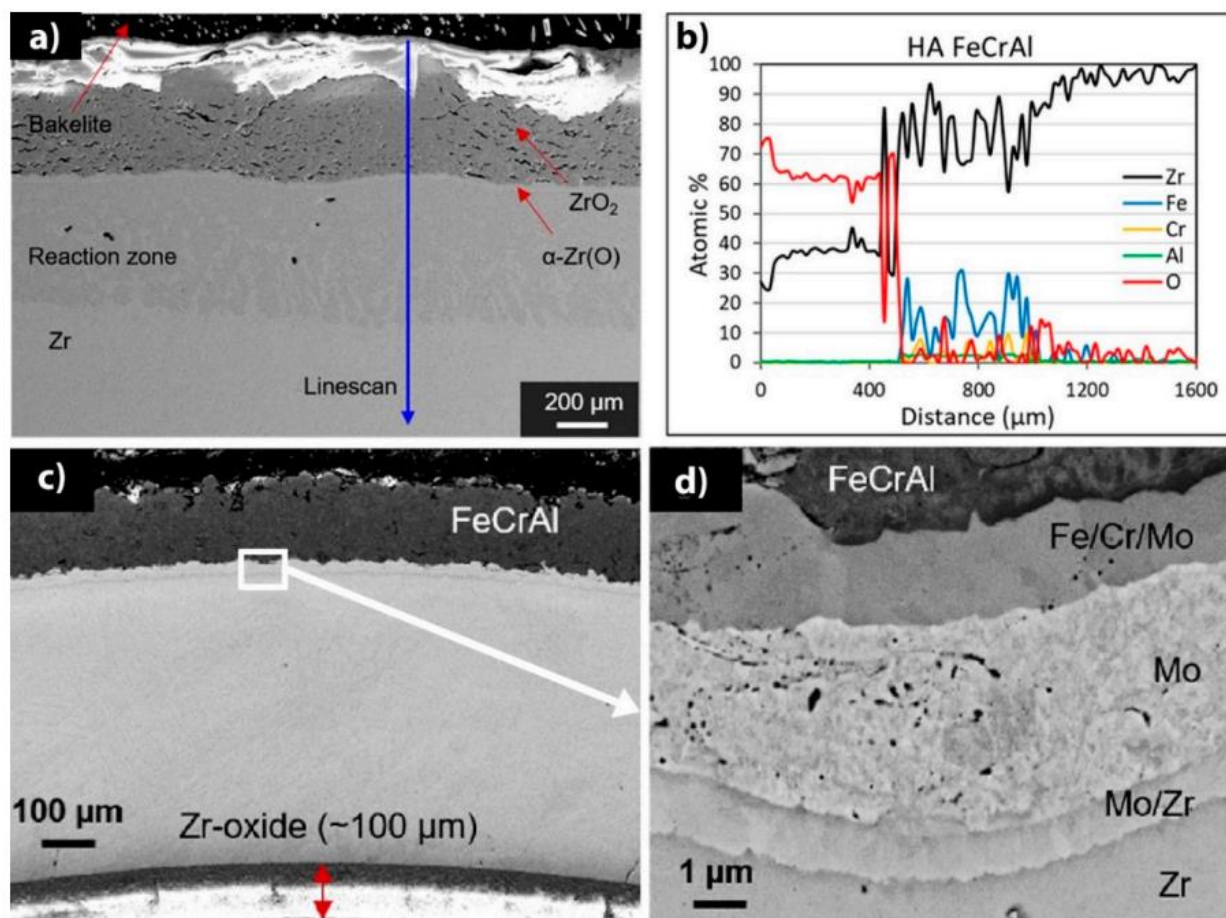


Рисунок 2 - СЭМ изображения поперечного сечения после воздушного окисления при 1200 °C: (а) покрытие FeCrAl на Zircaloy-4 и (б) соответствующее ЭДС [39,40].

В работе [40] рассматривалась система FeCrAl/Zr с промежуточным покрытием в виде Mo, который предположительно должен предоставлять взаимную диффузию при высоких температурах (Рисунок 2 в, г). Покрытия FeCrAl улучшили устойчивость сплава Zr к окислению при воздействии паровой среды при температуре 1200 °C. Поведение при вздутии и механические свойства образцов с покрытием, исследованные в условиях имитации аварии с потерей теплоносителя, показали более низкую окружающую деформацию и меньшие разрывы по сравнению с обычным Zr.



## 2.1.2 Покрытия на основе нитридов

В работе [41] были получены покрытия TiN и  $Ti_{0,35}Al_{0,65}N$  наложках из Zry -4 при помощи импульсного лазерного распыления. Затем образцы были испытаны в течении 48 часов при 500 °С и давлении 25 МПа [41]. Образцы с покрытиями не были повреждены, в то время как непокрытые образцы демонстрировали сильное окисление с последующим нарушением целостности образца. В работе [42] так же отмечалось, что покрытия TiN уменьшают наводороживание циркониевого сплава Zr. Однако нанокристаллические TiN-покрытия могут диссоциировать при бомбардировке энергичными частицами, образуя обогащенные титаном зоны с низкой стойкостью к окислению [43].

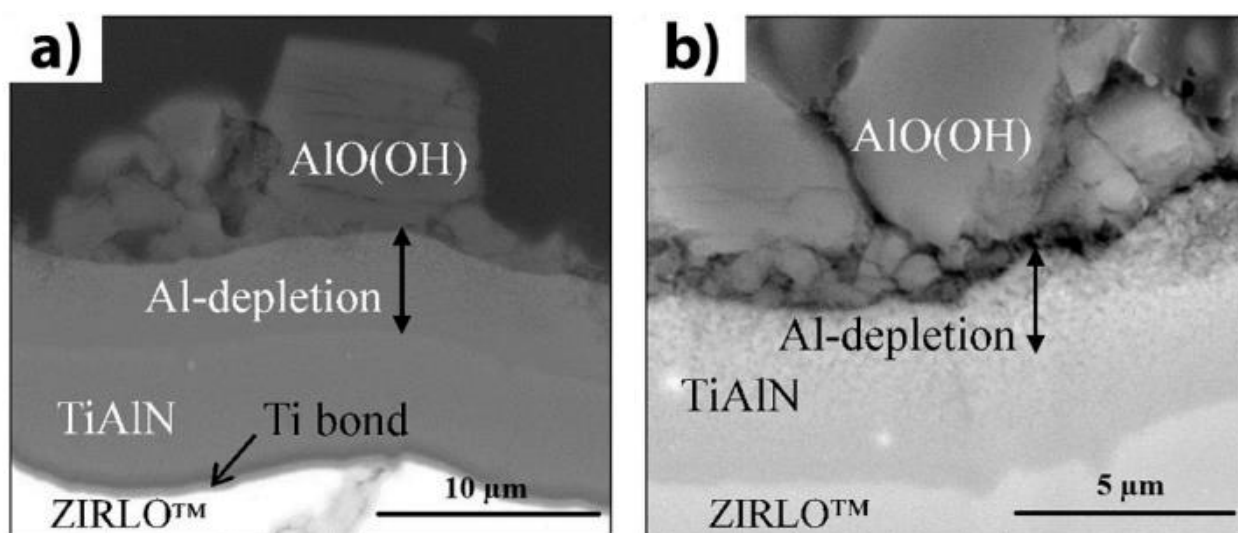


Рисунок 3 - СЭМ-изображения поперечного сечения TiAlN/Ti/ZIRLO после автоклавного испытания при 360 °С в течение 72 ч: (а) режим вторичных электронов и (б) обратно рассеянных электронов [45].

Тем не менее, не смотря на хорошие диффузионно – барьерные свойства покрытий TiN, их использование в качестве защитного покрытия или промежуточного диффузионного барьера не рассматривается, ввиду большой разницы в коэффициенте теплового расширения по отношению к цирконию [44]. В трудах [45,46] исследовали коррозионную стойкость покрытий TiAlN

и TiN, нанесенных на подложки из сплава ZIRLO методом катодно -дугового распыления.

Коррозионные испытания проводились в чистой воде при температуре 360 °С и давлении 18,7 МПа в течение 72 ч. После испытаний наблюдалось очень незначительный привес в пределах 1-5 мг/дм<sup>2</sup>, в то время как образцы ZIRLO без покрытия имели средний привес 14,4 мг/дм<sup>2</sup>. Однако истощение алюминия в высокотемпературной водной среде приводит к образованию фазы боэмита, которая ухудшает коррозионную стойкость покрытий TiAlN (Рисунок 3). Для устранения образования боэмита эффективным может быть осаждение внешнего слоя TiN или многослойный подход на основе покрытия TiN/TiAlN [46,47].

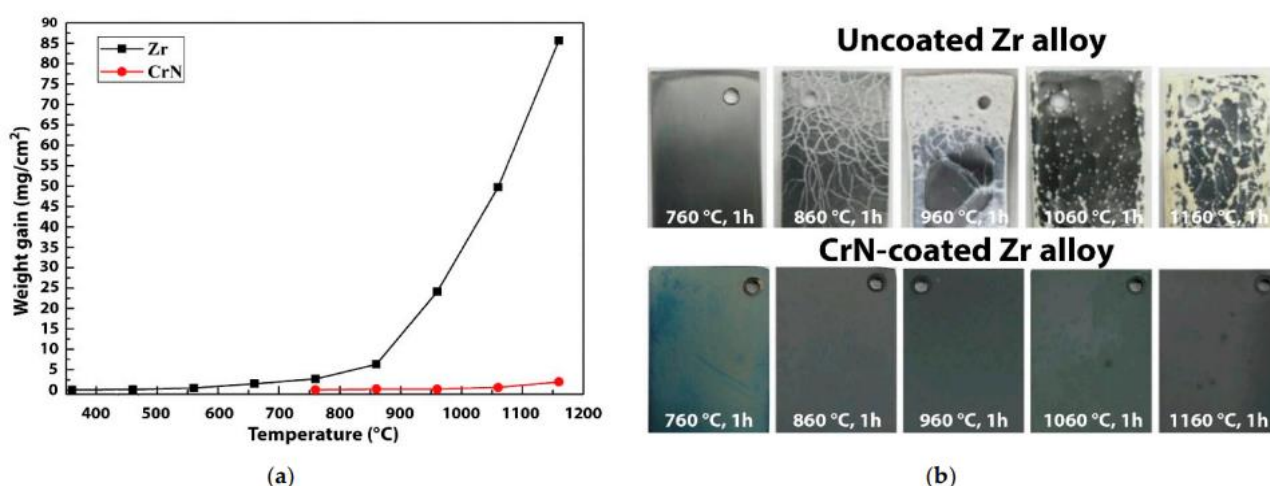


Рисунок 4 – Коррозионный привес сплавов Zr без покрытия и с покрытием CrN как функция температуры окисления на воздухе (a), и внешний вид образцов после испытаний на окисление (b) [44].

Сравнительный анализ коррозионной стойкости образцов Zry-4 с покрытиями CrN, TiAlN и AlCrN толщиной 2 – 4 мкм (Рисунок 4), показал, что покрытия CrN демонстрируются в целом лучше характеристики как в водной, так и в паровой среде [48,49].

### 2.1.3 Покрывтия на основе карбидов

Карбид кремния является перспективным материалом для покрывтий циркониевых топливных оболочек, так как он имеет высокую температуру плавления, низкую химическую активность, превосходную стойкость к окислению при высоких температурах и более низкое сечение тепловых нейтронов, чем у циркониевых сплавов [50]. Покривтия SiC, осажденные на сплав Zry-4 с помощью совместного напыления мишеней SiC и Si, демонстрируют повышенную стойкость к окислению в паре при температуре 900 °C благодаря образованию защитного слоя диоксида кремния [51]. Помимо этого, покривтия SiC снижают наводороживание циркониевых сплавов при нормальных рабочих температурах. Тем не менее, нестабильный рост оксидов и испарение покривтия во время коррозионных испытаний в автоклаве должны быть тщательно учтены при разработке покривтий на основе SiC [52]. В то же время покривтия Zr – Al – C, нанесенные методом магнетронного распыления, продемонстрировали плохие защитные свойства при окислении в среде пара при температуре выше 800 °C из-за образования ZrO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [52].

### 2.1.4 Покривтия на основе хрома

Хромовые покривтия привлекают большое внимание в качестве материала для покривтия циркониевых сплавов благодаря своей высокой температуре плавления, хорошей стойкости к высокотемпературному окислению и схожему коэффициенту теплового расширения по сравнению с Zr (см. таблицу 2).

Таблица 2 - Физические свойства хрома и циркония [57]

Элемент	Сечение захвата тепловых нейтронов, барн	Плотность г/см <sup>3</sup>	Температура плавления (°С)	Коэффициент термического расширения, 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	Коэффициент теплопроводности, В/(м · К)
Cr	2,9	7,14	1850	6,7	94
Zr	0,18	6,51	1845	5,8	23

Хромовые покрытия на подложках из сплавов на основе Zr, изготовленных по различным технологиям, таких как дуговое ионное напыление [58], 3D лазерное напыление [9] и газодинамическое напыление [40], были исследованы различными научными группами. Основные преимущества выбора Cr в качестве материала покрытия основаны на образовании защитного слоя Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на поверхности во время окисления. Слой Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> оказался стабильным при нормальных условиях в автоклавных испытаниях, поскольку он начинает действовать как диффузионный барьер.

После выдержки при 415°С и 10 МПа в течение 200 дней коррозионный привес составил менее 0,05 мг/см<sup>2</sup> для образца Zry-4 с хромовым покрытием, осажденного методом PVD, что соответствует толщине 250 нм образовавшегося внешнего оксида Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, что в ~50 раз меньше, чем у образцов без покрытия [8]. Кроме того, Cr-покрытия могут обеспечить значительный дополнительный запас для LOCA (одновременно значительно уменьшается из-за существования барьера Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. На рисунке 6 представлены скорости коррозии и окисления в воде (360°С, ~18 МПа), моделирующем условия ВВЭР), и в высокотемпературном паре при 1200°С в

условиях АСПТ, соответственно, сплавов на основе Zr без покрытия и с Cr-покрытием, изготовленных различными способами.

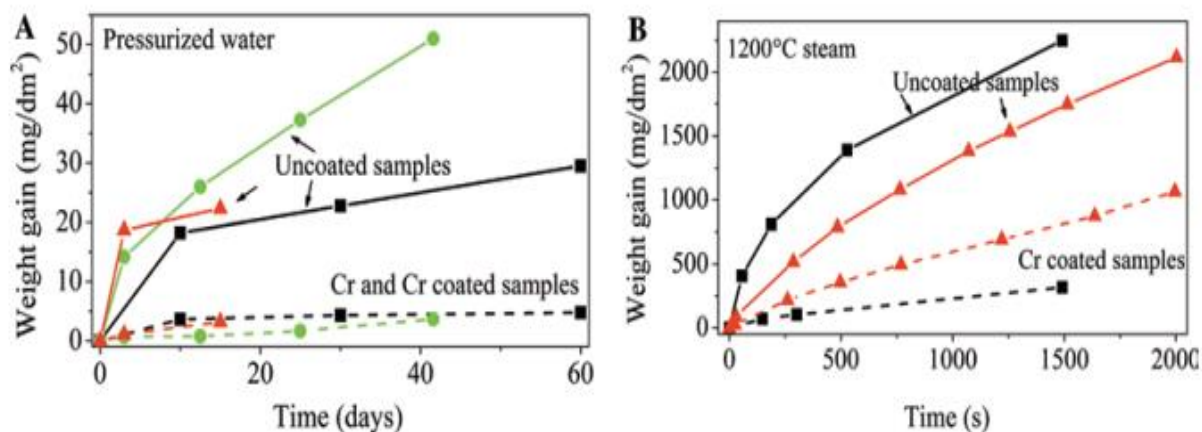


Рисунок 5 - Сравнение скорости коррозии в воде, имитирующих условия (А) и скорость окисления в высокотемпературном паре в условиях АСПТ (В) сплавов на основе Zr без покрытия и с Cr-покрытием, изготовленных различными способами:

■, покрытия Cr, нанесенные методом PVD [8]; ▲, покрытия Cr, нанесенные методом газодинамического напыления [9; 40]; ●, покрытия Cr, нанесенные методом катодного дугового испарения [59].

В целом, металлические сплавы Zr с Cr-покрытием демонстрируют превосходную коррозионную стойкость при на порядок меньшем удельном привесе, чем сплавы на основе Zr без покрытия. Также была доказана превосходная коррозионная стойкость сплавов Zr с Cr-покрытием, изготовленных различными методами осаждения, во время испытаний в автоклаве (рис. 6А). Что касается испытаний на высокотемпературное паровое окисление при температуре 1200°C, то для образцов с покрытием, как показано на рисунке 6В, наблюдается улучшенная стойкость к окислению; удельный привес был в несколько раз ниже для образцов с покрытием. На рисунке 7 показаны оптические микрофотографии листовых образцов Zr<sub>90</sub>-4 с Cr-покрытием после автоклавного испытания при 360°C в течение 60 дней и последующего окисления при 1100°C в паре в течение 850 с [8] Результаты показали, что покрытия демонстрируют определенные особенности

самовосстановления, а трещины оказывают лишь ограниченное и локализованное влияние на общее окисление образца с покрытием в условиях испытания. Не наблюдалось сколов покрытий и ускоренного окисления подложки из циркалоя.

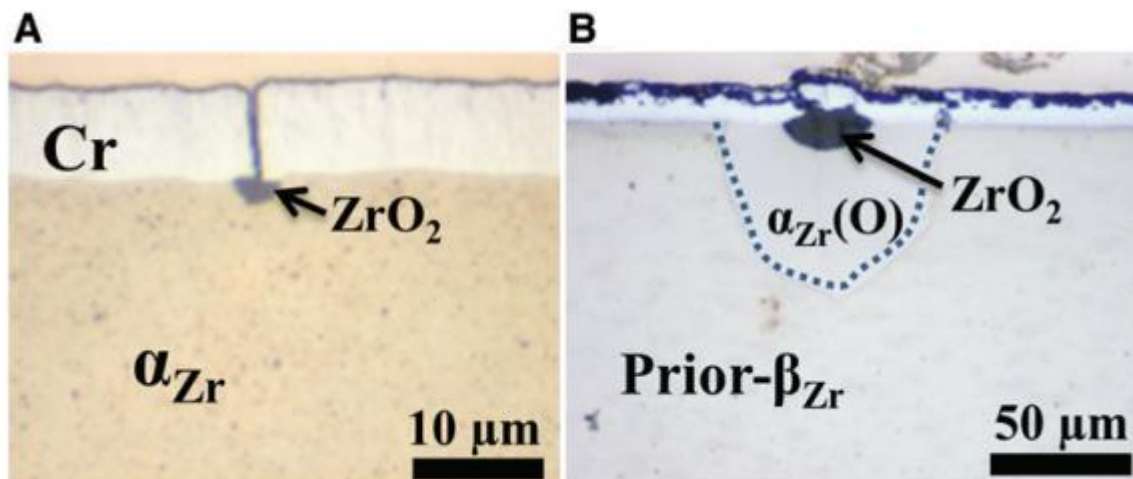


Рисунок 6 - Оптические микрофотографии образцов Zry-4 с Cr-покрытием с предсуществующей трещиной по всей толщине покрытия после автоклавного испытания при 360°C в течение 60 дней (А), а затем окисления при 1100°C в паре в течение 850 с (В) [8].

Kim и др. [9] провели испытания на кольцевое сжатие и кольцевое растяжение для оценки адгезионных свойств между слоем Cr-покрытия, нанесенным с помощью технологии 3D-лазера, и трубой из сплава на основе Zr при комнатной температуре. На рис. 8 показаны результаты испытаний на кольцевое растяжение и внешний вид образца топливной оболочки из Zry-4 с Cr-покрытием после испытания. Толщина слоя Cr-покрытия варьировалась от 80 до 200 мкм. Слой с Cr-покрытием не имел дефектов до 4% деформации с несколько повышенной прочностью, в то время как после 6% деформации в слое с Cr-покрытием образовались боковые трещины. Тем не менее, граница раздела между слоем Cr-покрытия и подложкой Zircaloy-4 сохранялась без отслоения.

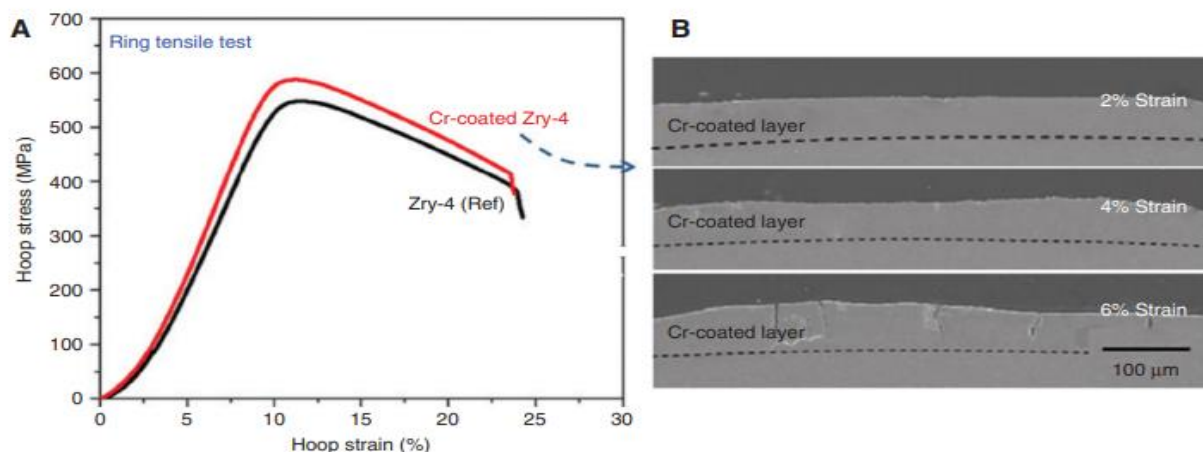


Рисунок 7 - Результат испытания на кольцевое растяжение (А) и поперечное сечение СЭМ-изображения образцов из Zry-4 с Cr-покрытием, осажденных с помощью 3D-лазера (В) после испытания на кольцевое растяжение (А). после испытаний на кольцевое растяжению [9].

Помимо чистого хрома, в качестве материала покрытия некоторые научные группы исследовали сплавы на основе хрома. Так, например, сплав Cr – Al показал лучшую коррозионную стойкость, чем чистый хром [35,55]. Однако, как отметили авторы статьи [56] после окисления образуется более сложная и неоднородная структура оксидных слоев. Так же были проведены исследования покрытия Ni – Cr. Авторами [60] было показана, что подобное покрытие обладает лучшей пластичностью по сравнению с хромовым покрытием но при высоких температурах он демонстрируют меньшую стойкость к окислению и происходит быстрая диффузия Ni вглубь циркониевого сплава.

## 2.2 Механизм деградации покрытий на основе хрома

Методы нанесения покрытий, материалы и параметры осаждения играют значительную роль в устойчивости защитных покрытий к окислению. Ключевой механизм защиты включает образование стабильного оксидного слоя на поверхности покрытия с низкой скоростью окисления. К стабильным и хорошо изученным оксидам относятся  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Поэтому дальнейшее обсуждение будет сосредоточено в основном на покрытиях, которые образуют эти оксиды. В особенности речь пойдет о оксиде хрома. Одной из важных рассматриваемых проблем является разрушение/сублимация оксидов в воде и паре при нормальной эксплуатации и в аварийных условиях [61]. Среди упомянутых оксидов хром является единственным стабильным оксидом, который медленно улетучивается/сублимируется в условиях автоклава и АСПТ [62]. Скорость сублимации  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$ , как ожидается, не будет проблемой при температурах ниже  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ ; однако, заметное улетучивание было показано после автоклавных испытаний в имитированной среде ВВЭР [63]. Кроме того, защитное покрытие, а также растущий оксидный слой должны иметь плотную микроструктуру, чтобы уменьшить диффузию кислорода и водорода (образующихся в результате реакции окисления) по границам зерен покрытия.

Другой серьезной проблемой является взаимная диффузия на границе раздела между защитным покрытием и материалом топливной оболочки. Взаимная диффузия наблюдается в основном для металлических покрытий из-за более высоких коэффициентов диффузии в металлах по сравнению с керамикой. Таким образом, когда металлические покрытия окисляются, покрытие может расходоваться в результате роста оксида и образования междиффузионного слоя. Взаимная диффузия также усугубляется тем, что



могут образовываться эвтектические фазы с низкой температурой плавления, особенно в аварийных условиях.

Рассмотрим один из предложенных механизмов деградации хромового покрытия. Brachet и др. [64] предложили следующий механизм, основанный на внутренней диффузии кислорода вдоль частиц  $ZrO_2$ , распределенных по границам зерен хрома (Рисунок 8).

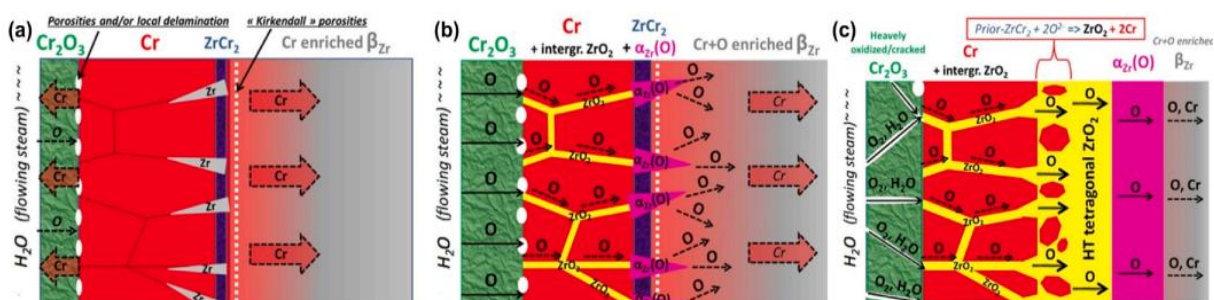


Рисунок 8 - Схема механизма деградации сплавов Zr с покрытием Cr в среде высокотемпературного пара, предложенная Brachet и др.[64].

Этап 1. В начальной стадии формируются слой  $Cr_2O_3$  и промежуточный слой Zr – Cr. Атомы Zr из исходной подложки проходят через слой Zr – Cr, следом диффундируя через границу зерен хрома.

Этап 2. Диффундирующий внутрь кислород взаимодействует с атомами Zr на границе зерен Cr, приводя к образованию  $ZrO_2$ . Образование  $ZrO_2$  на границах зерен Cr приводит к потере защитной способности остаточного Cr-покрытия: кислород диффундирует по новообразованным дорожкам  $ZrO_2$  и больше не реагировал с остаточным Cr-покрытием.

Этап 3. На заключительном этапе кислород, диффундирующий вглубь, достигает слоя Zr – Cr и циркониевой подложки. За этим следует окисление подложки, защитная способность хромового покрытия полностью утрачивается. Структура полностью окисленного циркониевого сплава с хромовым покрытием, представленная на Рисунок 9, включает в себя растрескавшийся слой  $Cr_2O_3$ , остаточный слой хромового покрытия с вкраплениями  $ZrO_2$ , промежуточный слой Cr – Zr, слой  $ZrO_2$  и слой  $\alpha - Zr(O)$  и предшествующую подложку  $\beta - Zr$ .

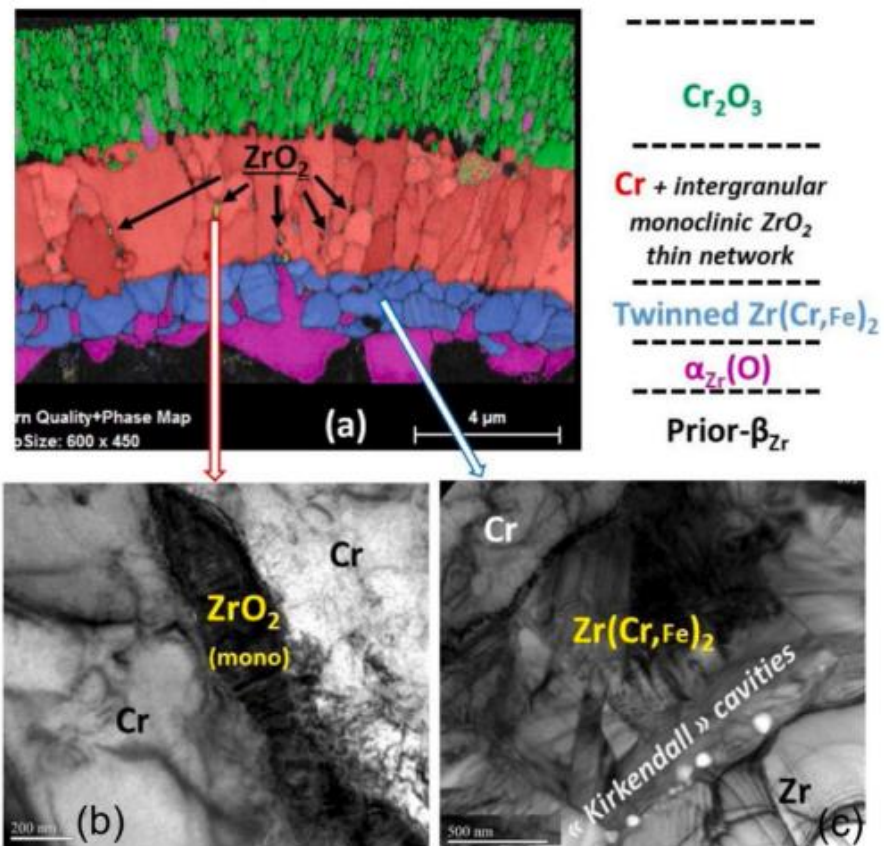


Рисунок 9 - Типичная микроструктура образца Zircaloy – 4 с хромовым покрытием после парового окисления в течение 1400 с при 1200 °С. (а) Фазовая карта SEM-EBSD. (b) и (c) представляет собой микрофотографию ПЭМ [64].

Реакция, при которой  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  может быть восстановлен диффундирующим цирконием, является ключевым процессом деградации хромового покрытия. Как только  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  восстановлен, новообразованный хром будет снова окислен до  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Толщина  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  остается неизменной, когда скорость реакции окисления Cr и скорость реакции восстановления  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  достигают баланса [65]. На этом этапе сомнительно, что слой  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  является защитным. Более того, даже при достижении баланса диффузию и растворение атомов хрома в циркониевой подложке остановить не удастся. В результате, толщина слоя  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  продолжает уменьшаться и, наконец, происходит реакция окисления с последующим разрушением Zr-подложки [66].

## 2.3 Барьерные слои

Взаимная диффузия элементов покрытия имеет сложный негативный эффект, связанный с быстрым расходом покрытия и образованием анизотропных структур внутри сплавов Zr, в результате образования и последующей кристаллизации жидких эвтектических фаз. Эти процессы ускоряются с ростом температуры, поэтому поведение защитных материалов в аварийных условиях очень важно для разработки устойчивых к окислению покрытий Zr сплавов.

Brachet и др. исследовали поведение Cr-покрытия сплава M5 при паровом окислении при 1400-1450 °C в течение 100 секунд с последующей закалкой в воде [64]. Было обнаружено, что быстрая взаимная диффузия Cr-Zr при нагревании сопровождается образованием эвтектики Cr-Zr при 1305-1325 °C, которая постепенно обогащается цирконием вместе с ростом внешних оксидных слоев  $ZrO_2/\alpha-Zr(O)$  в период изотермического окисления. Krejčí и др. наблюдали аналогичные микроструктуры сплава Э110 с покрытием Cr после парового окисления при 1400 °C в течение 2 мин [67]. Более высокое содержание Cr было обнаружено в области предшествующей фазы  $\beta-Zr$  (с более низким содержанием кислорода).

Взаимная диффузия также оказывает негативное влияние на сплавы Zr с покрытием FeCrAl [68]. В этом случае быстрая диффузия Fe и Cr приводит к образованию хрупких интерметаллических соединений, таких как  $Fe_2Zr$ ,  $FeZr_2$ ,  $FeZr_3$  и  $Zr(Cr,Fe)_2$ , а также к низкой температуре плавления эвтектических фаз Zr-Fe или Zr-Fe-Cr [69,70,71]. Таким образом, эвтектические фазы и несоответствие коэффициентов температурного расширения между сплавом Zr и интерметаллидами могут привести к возникновению микротрещин. Wang и др. продемонстрировали поведение окисления покрытия FeCrAl с барьерным слоем  $ZrO_2$ , сформированным методом плазменно-электролитического окисления (PEO) на поверхности сплава Zry-4. Было обнаружено, что слой  $ZrO_2$  толщиной 10-15 мкм устраняет

диффузию Fe и Cr в сплав в паре при 1000 °C [72]. Nan и др. продемонстрировали хорошие барьерные свойства 10,6 мкм Mo диффузионного барьера между 6,6 мкм FeCrAl покрытием и сплавом Zry-4 при окислении паром до 1200 °C [73]. Несмотря на лучшую стойкость к окислению покрытий FeCrAl/Mo, сильная взаимная диффузия между слоями Mo и FeCrAl при 1200 °C привела к образованию диффузионного слоя FeCrMo, что сопровождалось образованием пустот Киркендалла в покрытии FeCrAl. Krejčí и др. исследовали диффузионный барьер CrN, осажденную магнетронным распылением, как барьер против взаимной диффузии Cr-Zr при паровом высокотемпературном окислении [74]. Было обнаружено, что под покрытием образовался тонкий слой ZrN из-за внутренней диффузии азота, образующегося при распаде CrN до фазы Cr<sub>2</sub>N. Слой CrN толщиной 13 мкм препятствовал диффузии Cr в сплав Zr и демонстрировал высокую стойкость к окислению при температурах выше эвтектики Cr-Zr (1350 °C) в течение лишь короткого периода времени. Tang и др. показали, что прослойка TiC толщиной 500 нм смягчает быструю диффузию Al из покрытия Ti<sub>2</sub>AlC в сплав Zry-4, что привело к длительной стойкости покрытия Ti<sub>2</sub>AlC/TiC к окислению под воздействием пара при температуре 800 °C [75]. Однако, как Ti<sub>2</sub>AlC, так и Ti<sub>2</sub>AlC/TiC покрытия продемонстрировали низкие показатели защиты от окисления при температурах выше 1000 °C.

Таким образом, вышеперечисленные результаты подтверждают перспективность подхода нанесения барьерных диффузионных слоев между основным слоем и подложкой. В последующих пунктах будут разобраны основные варианты барьерных слоев.

### 2.3.1 Барьерные слои на основе тугоплавких металлов

В настоящее время уделяется особое внимание применению тугоплавких металлов в качестве диффузионных барьеров. К таким металлам относят те, что имеют температуру плавления выше 1850 °С: ниобий, молибден, о котором будет идти речь дальше, тантал, вольфрам, рений, ванадий, гафний, рутений, родий, иридий и осмий. Однако многие из них не подходят по критерию сечения захвата тепловых нейтронов. Так, например, у родия сечение захвата – 143,5 барн, рения – 94 барн, гафния – 104 барн, иридия – 211 барн [10]. В то же время у циркония это значение составляет 0,18 барн.

Исаев и др. высказали мнение, что использование ванадия, рутения и осмия в качестве диффузионного барьера неоправданно, поскольку они не как не препятствуют взаимной диффузии и к тому же образуют хрупкие интерметаллические фазы с хромом и цирконием [14]. Высокая диффузионная подвижность приведет к растворению барьера на границе раздела барьер/оболочка. Образование интерметаллических фаз приведет к растрескиванию и расслаиванию покрытия. Эти факторы приведут к потере защитных свойств покрытия.

Использование чистых Nb и W в качестве диффузионного барьера эффективно, поскольку система подложка/барьер/покрытие будет иметь низкую взаимную диффузию вплоть до 1500 °С. Однако Nb и W имеют определенные недостатки. Система Zr-Nb имеет постоянную взаимную растворимость при температурах выше 1100 °С. Поэтому целесообразно ограничить взаимодействие ниобия и циркония другим промежуточным слоем.

В системе циркония и вольфрама образуется одна промежуточная фаза  $W_2Zr$  и твердые растворы на основе W и Zr.  $W_2Zr$  образуется в результате перитектической реакции из расплава при температуре 2160 °С. Эвтектическое равновесие на стороне Zr наблюдается при 10% (ат.) W и температуре 1739 °С. Растворимость Zr в (W) при эвтектической температуре

составляет около 3,5% (ат.) и уменьшается с понижением температуры до 1,4% и 0,9% (ат.) при 2000 и 1500 °С. Растворимость W в ( $\beta$ -Zr) составляет около 4% (ат.) при эвтектической температуре и 0,25% (ат.) при эвтектоидной температуре. Растворимость W в ( $\alpha$  - Zr) пренебрежимо мала.

При высоких температурах возникает непрерывный ряд твердых растворов (Cr, W) с распадом на два твердых раствора (Cr) и (W) при температуре ниже 1677 °С и содержании 50% (ат.) W. Двухфазная область (Cr) + (W) при 500 °С простирается от 5 до 95% (ат.) W [76].

### 2.3.2 Барьерный слой Мо

Кандидатом на роль барьерного слоя, как говорилось ранее, может выступать молибден. Мо имеет высокую температуру плавления (2623 °C), самое малое среди тугоплавких металлов сечение захвата тепловых нейтронов (2.5 барн) [10], небольшой коэффициент диффузии в цирконий (в сравнении с хромом).

В работе [15] проводилось комплексное изучение системы Cr/Mo, в которой также осуществлялось сравнение с покрытием, включающим в себя только Cr. В обоих случаях толщина слоя Cr составляла 8 мкм, а барьерный слой имел толщину порядка 3 мкм. В работе [40] производились исследования с покрытием FeCrAl, где так же применялся барьерный слой из Мо, однако толщина основного покрытия составляла 100 мкм, барьерного - 12 - 15 мкм. При таких больших толщинах эффективно предотвращается взаимная диффузия между подложкой и покрытиями на протяжении десятка минут.

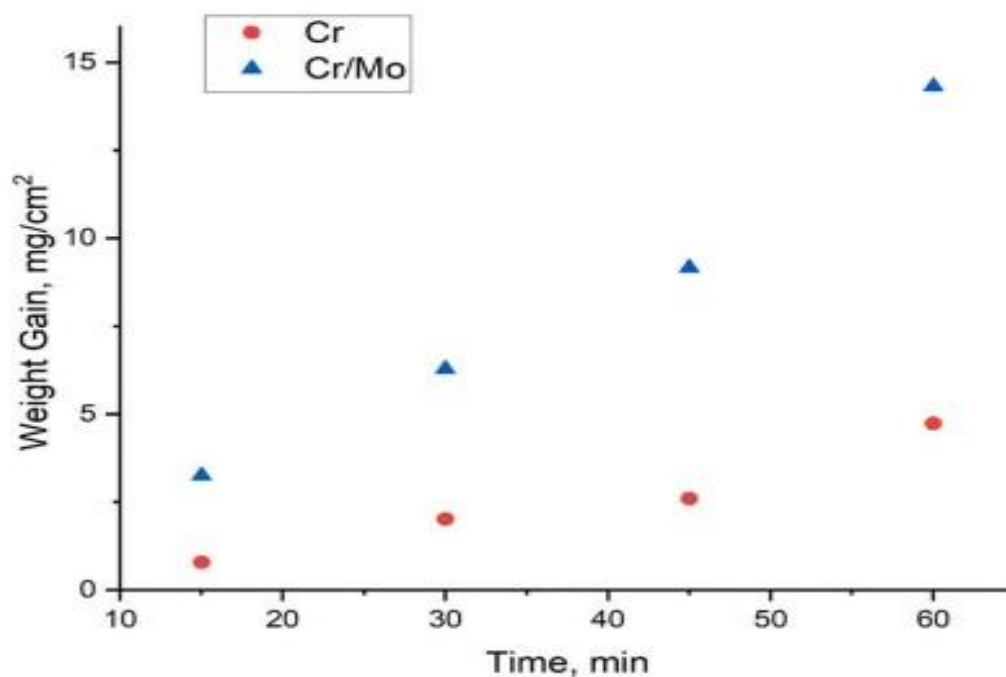


Рисунок 10 - Привес Zr-сплава с покрытием Cr и Cr/Mo после окисления при 1100 °C в зависимости от времени окисления [15].

На Рисунок 10 показан привес сплава с нанесенными на циркониевый сплав покрытиями Cr и Cr/Mo. Образцы окислялись при температуре 1100 °С. Прекрасно видно, что образец с нанесенным Cr менее подвержен окислению, нежели образец с покрытием Cr/Mo. По сравнению с покрытием с барьерным слоем, образец с хромом имеет привес в 3 раза меньше .

Использование барьерного слоя Mo между Cr и Zr может быть оправдано для предотвращения взаимной диффузии хрома и циркония на протяжении одного часа. Тем не менее, в работе [15] было выяснено, что в процессе ВТ окисления молибден диффундирует как в хром, так и в цирконий, образуя фазы Cr<sub>3</sub>Mo и Mo<sub>2</sub>Zr.

Проведенные в этой же работе рентгенофазовые исследования показали, что Mo диффундирует через фазу β-Zr, образуя на начальной стадии твердый раствор β-Zr(Mo). Затем достигается предел растворимости Mo в β-Zr, на границе слой Mo/сплав Zr образуется фаза Mo<sub>2</sub>Zr. Далее рост слоя Mo–Zr становится медленнее, так как кинетика диффузии Mo через Mo<sub>2</sub>Zr меньше, чем через β-Zr [78]. Таким образом, быстрый рост междиффузионного слоя Mo–Zr, содержащего Mo<sub>2</sub>Zr, общей толщиной ~15 мкм происходит на начальном этапе ВТ окисления (15 мин), затем Mo<sub>2</sub>Zr выступает в качестве барьерного слоя для последующей диффузии и растворения Mo в β - Zr. Общая толщина слоя Mo–Zr составляет ~20 мкм после ВТ окисления в течение 60 мин.

СЭМ (Рисунок 11) показал большую толщину взаимодиффузионного слоя Zr–Mo для сплава Zr с Cr/Mo-покрытием по сравнению со слоем Zr–Cr для сплава Zr с однослойным Cr-покрытием. Это связано с сильно различающейся степенью растворимости Cr (~5 ат.%) и Mo (~11 ат.%) в фазе β-Zr при 1100 °С [79,80]. Таким образом, Mo диффундирует на большую глубину на начальном этапе до формирования слоя Mo<sub>2</sub>Zr, который ограничивает последующую взаимную диффузию Mo и Zr. Такая же тенденция была выявлена для системы Cr–Zr.



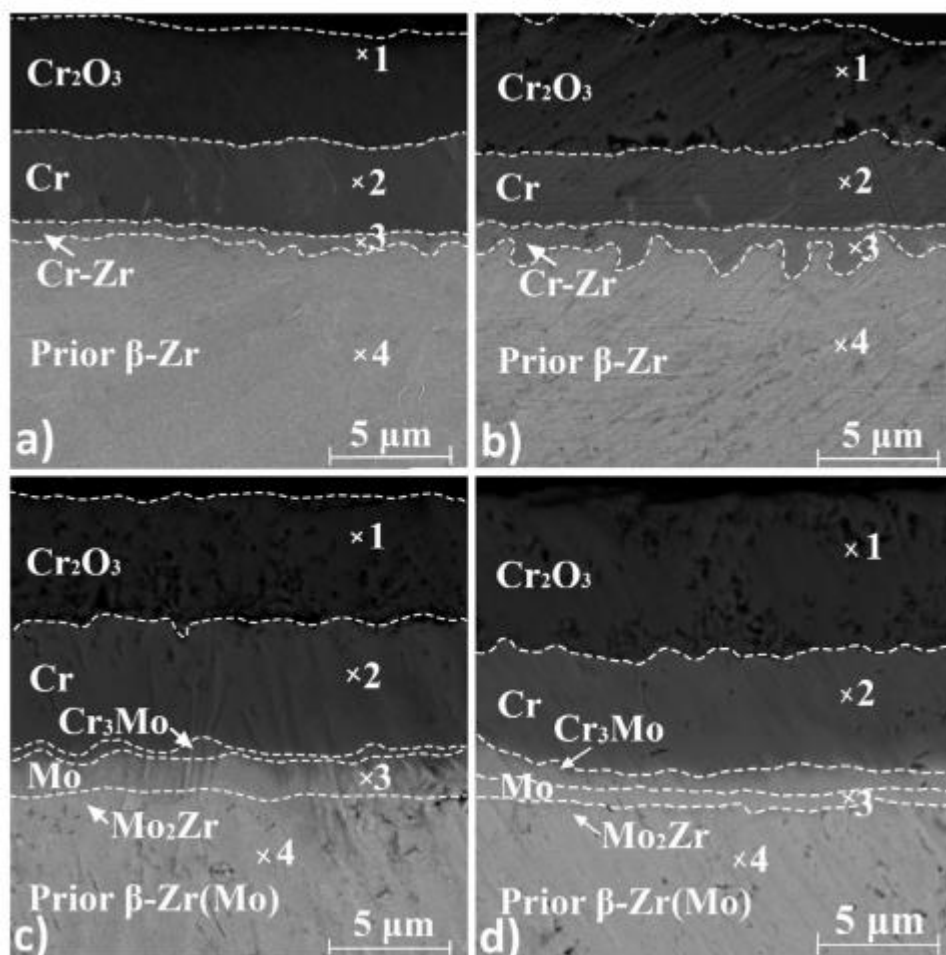


Рисунок 11 - СЭМ-изображения образцов сплава Zr после высокотемпературного окисления: (а) Cr в течение 30 мин; (б) Cr в течение 60 мин; (с) Cr/Mo в течение 30 мин; (д) Cr/Mo в течение 60 мин. [15].

Поскольку оба типа покрытий (Cr и Cr/Mo) имеют одинаковую толщину внешнего слоя  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  после высокотемпературного окисления в течение 30 и 60 мин, подслоя Mo не влияет на окислительную стойкость образцов сплава Zr с толщиной внешнего слоя Cr 8 мкм. Однако ограничение взаимной диффузии Cr-Zr за счет осаждения подслоя Mo привело к большей толщине (~ 5 мкм) остаточного слоя Cr после ВТ-окисления в течение 60 мин по сравнению с толщиной образцов сплава Zr с покрытием Cr (~ 3,3 мкм).

По данным РФА (Рисунок 12) и СЭМ для системы Cr-Mo-Zr в вакууме и при ВТ окислении на воздухе образование слоя Mo-Zr за счет взаимной

диффузии может вызывать ускоренное окисление образцов сплава Zr под покрытием. Обнаружена большая длина глубины проникновения O (~530 мкм) под Cr/Mo-покрытием по сравнению с однослойным Cr-покрытием (~200 мкм) из-за наличия непокрытой области образцов. Этот эффект оказывает существенное влияние на прирост массы образцов с Cr/Mo-покрытием при ВТ-окислении на воздухе (рис.3).

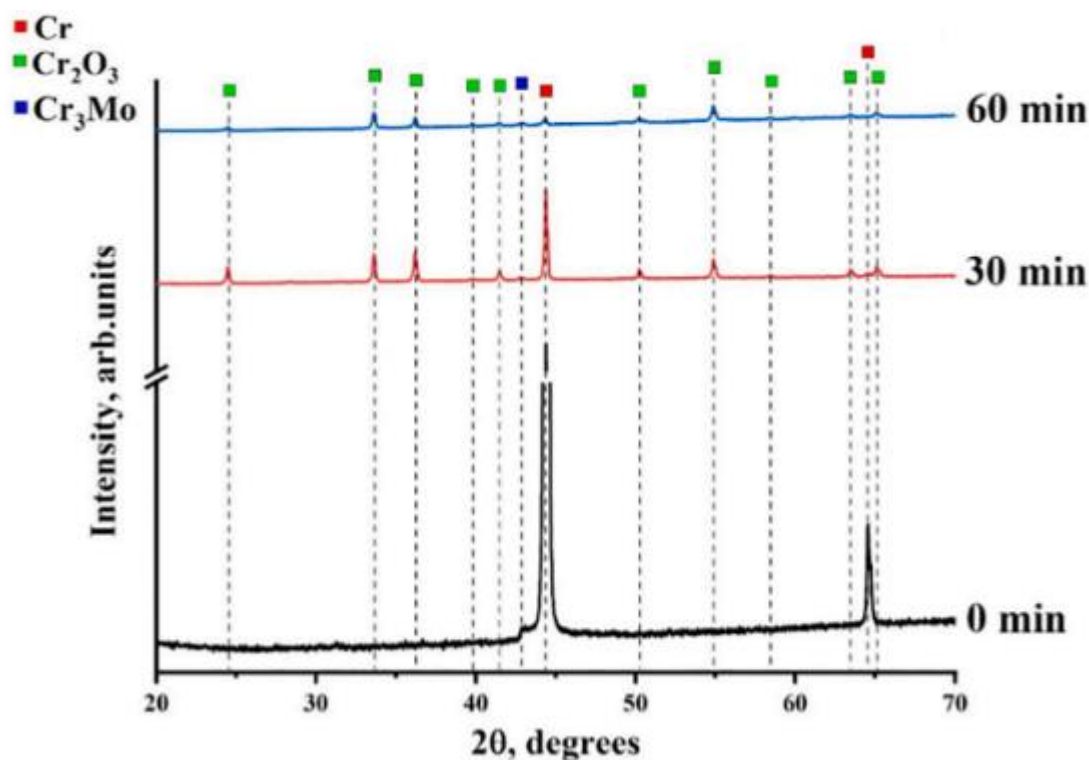


Рисунок 12 - Дифракционный спектр сплава Zr с Cr/Mo-покрытия после окисления на воздухе при 1100 °C [15].

Авторы утверждают, что нанесение покрытия Cr/Mo может воспрепятствовать взаимной диффузии хром и циркония при температуре 1100 °C по крайней мере в течении 60 минут. Тем не менее, наблюдалась диффузия молибдена одновременно и в хром, и цирконий посредством образования фаз Cr<sub>3</sub>Mo и Mo<sub>2</sub>Zr. Толщина Mo – Zr увеличивается с увеличением длительности окисления, что подтверждается расчетами, проведенными в работе [78]. In situ PCA показал, что Mo диффундирует через β – Zr, образуя в начальной стадии твердый раствор β – Zr(Mo). Затем достигается предел растворимости Mo в β – Zr, при этом образуется фаза

Mo<sub>2</sub>Zr на границе раздела Mo/Zr. Последующий рост слоя Mo – Zr замедляется, поскольку диффузия Mo через Mo<sub>2</sub>Zr меньше, чем через β – Zr [78]. Следовательно, быстрый рост диффузионного слоя Mo – Zr, содержащего Mo<sub>2</sub>Zr (~15 мкм), возникает в начальной стадии ВТ окисления, потом Mo<sub>2</sub>Zr выступает барьером для последующей диффузии и растворения Mo. Конечная толщина Mo – Zr составила ~20 мкм после 60 минутного окисления при 1100 °С.

Тем самым образование слоя Mo – Zr может привести к ускоренному окислению циркониевого сплава. По сравнению с хромовым покрытием, образцов с покрытием Cr/Mo была обнаружена большая глубина проникновения кислорода, примерно 200 мкм и 530 мкм соответственно. Этот эффект оказывает существенное влияние на привес Cr/Mo покрытия в течении высокотемпературного окисления на воздухе. Полученные результаты свидетельствуют высокую восприимчивость системы Mo – Zr к окислению в воздушной среде.

### **2.3.3 Барьерные слои на основе нитрида хрома**

Барьерный эффект CrN-содержащего промежуточного покрытия на предотвращение взаимодиффузии Cr и Zr был оценен некоторыми исследователями. Барьерный эффект CrN-содержащего промежуточного покрытия на предотвращение взаимодиффузии Cr - Zr был оценен некоторыми исследователями. Покрытие Cr-CrN/ TiSiN-Cr было изготовлено в работе[81].

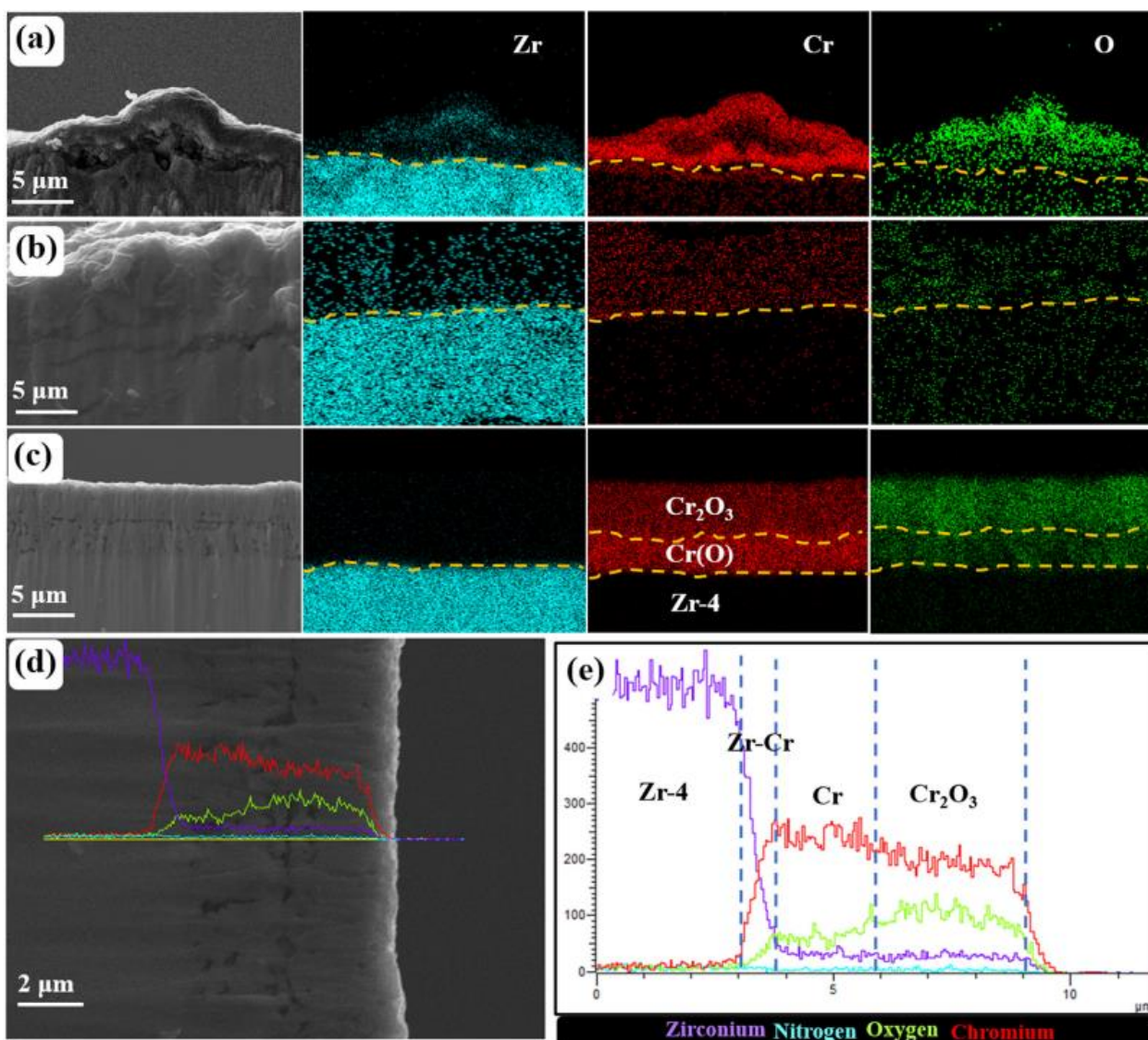


Рисунок 13 - СЭМ изображения поперечного сечения и EDS карты образцов с покрытием после окисления при 1200 °С (а) образец с покрытием Cr (б) образец с покрытием CrN; (с) образец с покрытием Cr/CrN; (д) и (е) поперечное сечение и EDS линейная развертка образца с Cr/CrN покрытие после окисления при 1200 °С [83].

Помимо этого, смешанные оксидные слои не смогли подавить диффузию Zr наружу.

Сиделев и др. [82] изготовили многослойную структуру CrN/Cr в качестве диффузионного барьера. Они сообщили, что интердиффузия Cr-Zr может быть незначительно ограничена слоем CrN/Cr из-за образования промежуточного слоя  $\alpha$ -Zr (N) при температуре ниже 1200 °С. Однако при более высоких температурах наблюдалось образование Cr<sub>2</sub>Zr из-за

недостаточного количества CrN для формирования непрерывного Zr-N-содержащего диффузионного барьера. О подходе к нанесению многослойного покрытия CrN/Cr без внешнего покрытия Cr было обозначено в статье [83]. К сожалению, одновременное разложение тонкого слоя CrN в каждой части многослойной структуры привело к образованию пор в структуре покрытия. Следовательно, ни диффузия кислорода внутрь, ни диффузия Zr наружу не могут быть ограничены.

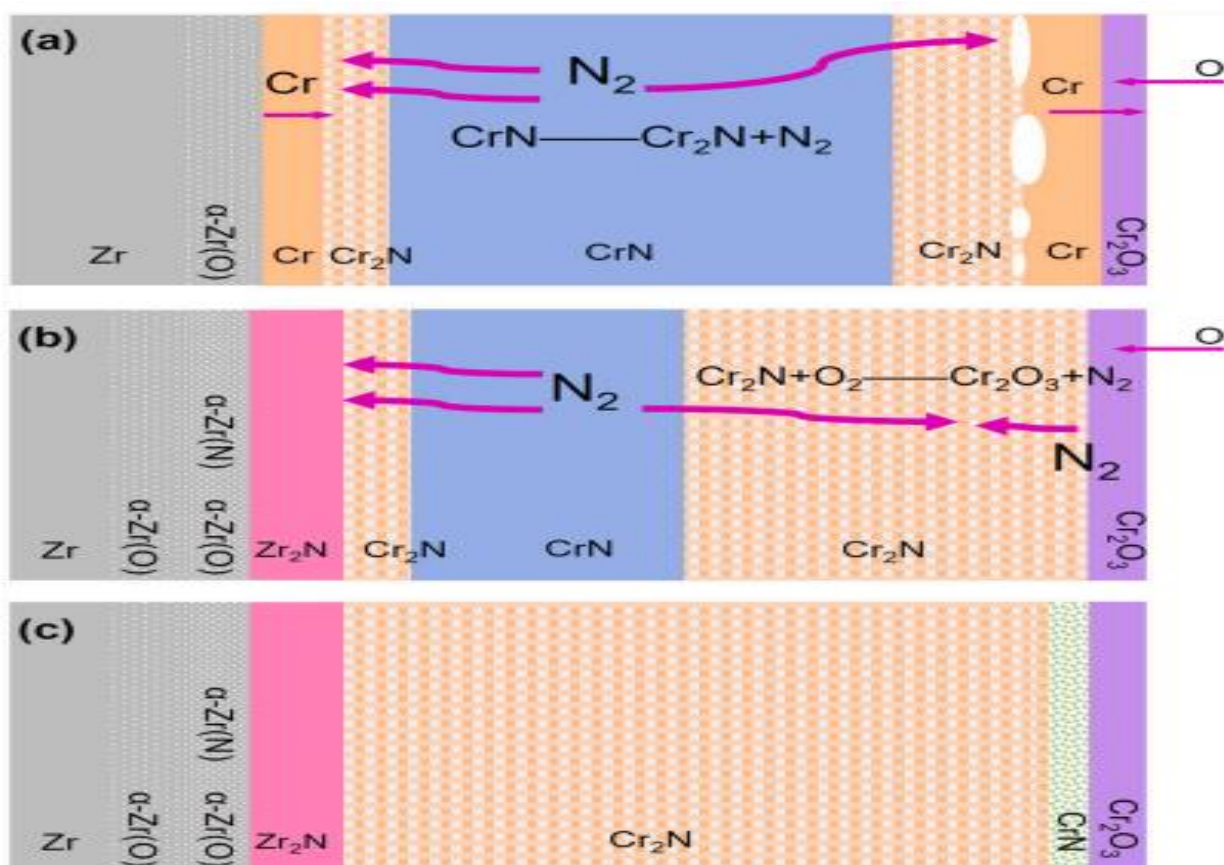


Рисунок 14 - Схематическая диаграмма процесса деградации покрытия Cr-CrN-Cr в паровой среде [84].

В работе [84] рассматривался подход по нанесению многослойного покрытия Cr – CrN – Cr. По утверждениям авторов Взаимная диффузия Cr-Zr была успешно ограничена слоем CrN. Типичные признаки взаимодиффузии Cr-Zr, включая слой Cr<sub>2</sub>Zr, преципитаты Cr в Zr-подложке, пустоты Киркендалла под слоем Cr<sub>2</sub>Zr и диффузию Zr вдоль границ зерен в Cr-покрытии, не наблюдаются в образцах с покрытием Cr-CrN-Cr после

высокотемпературного отжига. Внешнее и внутреннее Cr покрытие было преобразовано в  $\text{Cr}_2\text{N}$  под действием азота, который образовался в результате разложения CrN. На границе раздела между остаточным покрытием и Zr-подложкой образовался слой  $\text{Zr}_2\text{N}$ , который действовал как диффузионный барьер для взаимной диффузии Cr-Zr. Возможность образования слоя  $\text{Zr}_2\text{N}$  определяется температурой воздействия, временем воздействия и концентрацией азота. Сплав Zr с покрытием Cr-CrN-Cr демонстрирует отличную устойчивость к окислению в среде пара НТ до 1400 °С. После воздействия среды пара высокой температуры типичная структура образца сплава Zr с покрытием Cr-CrN-Cr включает  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , CrN,  $\text{Cr}_2\text{N}$ ,  $\text{Zr}_2\text{N}$ ,  $\alpha\text{-Zr(O)}$  и  $\alpha\text{-Zr(N)}$  смешанную фазу,  $\alpha\text{-Zr(O)}$  и подложку Zr (снаружи внутрь). Испытание на обрастание проводилось в имитируемой рабочей среде в течение 168 ч. По сравнению с образцом сплава Zr без покрытия, средняя толщина слоя грязи на образце сплава Zr с покрытием Cr-CrN-Cr уменьшилась с 7,2 мкм до 1,5 мкм, что указывает на то, что устойчивость к обрастанию поверхности покрытия Cr лучше, чем поверхности  $\text{ZrO}_2$ .



## **Глава 3. Материалы и методы исследования**

### **3.1 Подготовка образцов**

Перед осаждением покрытия образцы подвергались механической подготовке на полировально – шлифовальной машине. Затем образцы проходили дополнительную очистку ультразвуком, обезжиривание при помощи флаттера и изопропилового спирта (99,9%) и сушку в специальном сушильном шкафу. Уже в вакуумной камере (давление не менее  $3 \times 10^{-3}$  Па) подложки подвергались бомбардировке ионами аргона в течение 20 минут с использованием ионного источника с холловским дрейфом электронов. Ионная очистка проводилась при следующих параметрах: ионный ток  $I = 45$  мА, напряжение  $U = 3$  кВ и давление аргона  $P = 0,11$  Па, длительность обработки – 15 мин. Для выбора режимов осаждения танталовых покрытий варьировались:

### **3.2 Осаждение покрытий**

Перед нанесением покрытий в камере предварительно был получен остаточный вакуум не менее  $3 \times 10^{-3}$  Па. Для подбора режимов нанесения покрытий на образцы циркониевого сплава применялся метод магнетронного распыления с использованием ионно-плазменной установки, разработанной в Томском Политехническом Университете.

- потенциал смещения на подложках из циркониевого сплава и монокристаллического кремния (использовался как образец-свидетель) в диапазоне плавающего потенциала до -300 В;

- температура подложек в диапазоне от 150 до 350 °С (выбор температуры был выполнен, исходя из данных по допустимой технологической температурной обработке циркониевых оболочек из сплава Э110).

Из анализа массива экспериментальных данных было выбрано два режима осаждения Ta покрытий, которые далее были использованы для получения двухслойных покрытий Cr (8 мкм)/Ta (3 мкм). Для сравнения поведения образцов при окислении дополнительно получали образцы из циркониевого сплава с однослойным покрытием из хрома, толщиной 8 мкм. Покрытия из Cr осаждали с помощью мультикатодного магнетронного распыления с источником питания постоянного тока. В качестве мишеней использовались диски из Cr (99,95%), диаметром 90 мм. Режим осаждения Cr покрытий был выбран исходя из ранее опубликованных результатов [82]. При осаждении Cr/Ta покрытий, слои из Ta получали путём одиночного магнетронного распыления Ta (99,95 %) мишени, диаметром 90 мм.

Следует отметить, что ввиду крепления образцов в держателе при нанесении на них покрытий, часть поверхности Zr образцов не имела защитного покрытия (площадь непокрытой области составляла порядка 5-10 мм<sup>2</sup>). Для измерения температуры образцов в процессе осаждения покрытий использовался инфракрасный пирометр Optris CT laser 3MH1CF4.

В итоге оптимальные параметры для осаждения защитных хромовых покрытий были следующие: плотность мощности разряда – 39 Вт/см<sup>2</sup>; потенциал смещения на подложке – (-50 В); ток ионов на подложку – 65 мА/см<sup>2</sup>; максимальная температура подложки – 320 °С.

Для формирования барьерного танталового подслоя оптимальными являются следующие режимы: плотность мощности разряда – 39 Вт/см<sup>2</sup>; потенциал смещения на подложке – (-50 В); ток ионов на подложку – 16 мА/см<sup>2</sup>; максимальная температура подложки – 180 °С.

Общая толщина однослойного покрытия хрома составила ~8 мкм, а с Cr/Ta – ~ 11 мкм (внешний слой хрома составляет ~8 мкм, а подслой Ta ~3 мкм). Таким образом, были сформированы покрытия с идентичной толщиной внешнего защитного хромового покрытия.



### 3.3 Фазовые состояния исследуемых образцов

Танталовые барьерные подслои с различной ориентацией формировались путём варьирования потенциала смещения, температурой подложки, а также с помощью использования одиночного и дуального DC магнетронного распыления.

Аналогичные процедуры были применены для анализа преимущественной ориентации танталовых покрытий в зависимости от температуры подложки

В результате проделанной работы было установлено, что изменение значений потенциала смещения от 0 до (-100 В) приводит к изменению кристаллической фазы в танталовом подслое. Дальнейшее увеличение потенциала смещения не приводит к изменению фазового состава или ориентации кристаллитов в барьерном подслое.

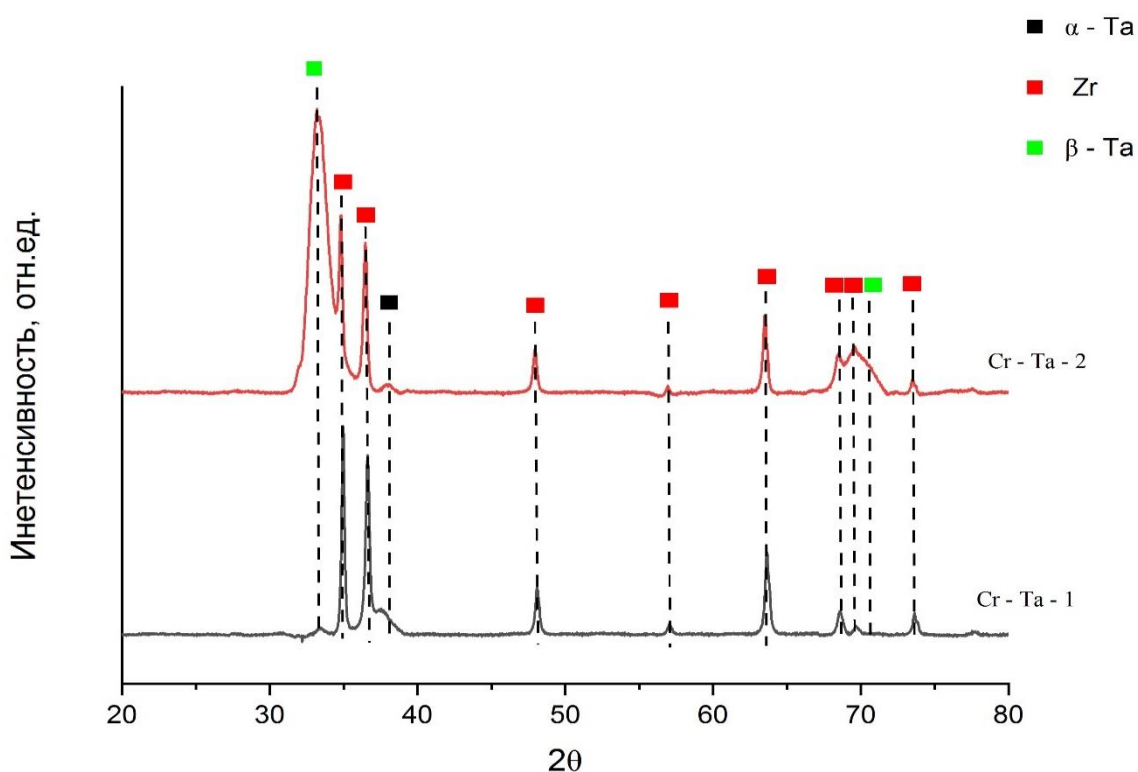


Рисунок 15 - Дифрактограммы образцов циркониевого сплава Zr-1Nb с танталовыми барьерными слоями, осажденные при потенциалах смещения 0 В (черный) и -100 В (красный).

На Рисунок 15 представлены дифрактограммы контрольных образцов циркониевого сплава Zr-1Nb с танталовыми барьерными слоями, осажденные в различных условиях. По данным РФА видно, что образцы существенно отличаются друг друга. Покрытие, осажденное при потенциале смещения 0 В, содержит фазу  $\alpha$ -Та с объемно-центрированной кубической решеткой. Слой, осажденный при потенциале смещения -100 В, характеризуется фазой  $\beta$ -Та с тетрагональной модификацией. В дальнейшем серия образцов, осажденных при потенциале смещения 0 В, и защитными покрытиями хрома обозначается как Cr-Ta-1, серия образцов, осажденных при потенциале смещения -100 В, и защитными покрытиями хрома – Cr-Ta-2.

Анализ кристаллической структуры Та покрытий в зависимости от температуры подложек показал, что в таком узком исследуемом диапазоне температур (150-350 °С) не обнаружено влияния температуры подложки на кристаллическую структуру покрытий.

### **3.4 Высокотемпературное окисление**

Были проведены высокотемпературные коррозионные испытания на воздухе и в потоке водяного пара при температурах 1100 и 1200-1400°С, соответственно. Также был проведен анализ фазового и элементного состава, микроструктуры и механических характеристик образцов после окисления и оценка деградации исследуемых защитных покрытий в результате окисления. Высокотемпературное окисление на воздухе проводилось в атмосферной печи (ATS 3210, Applied Test Systems Inc., Батлер, Пенсильвания, США) при нагреве на воздухе от 500 до 1100 °С со скоростью нагрева ~20 °С/мин и последующей изотермической выдержкой в течение 15, 30, 45 и 60 минут. После окисления образцы охлаждались со скоростью ~20 °С/мин до комнатной температуры.

Высокотемпературные испытания в потоке водяного пара при 1200 °С проводились на установке LOCA345 (ОАО "ВНИИНМ", Россия). Образцы

выдерживались в зоне предварительного нагрева при температуре 300 °С в течение 300 с, затем перемещались в высокотемпературную зону печи и нагревались до 1200 °С со скоростью 20 °С/с. Отсчет времени окисления начинался с момента нагрева образцов до 1197 °С. Во время испытаний расход пара составлял 4,0 мг/см<sup>2</sup>, а температура образцов поддерживалась на уровне 1200±3 °С. По достижении времени окисления образцы закаливались водой. Продолжительность испытаний составляла 1000-2000 с.

Высокотемпературное окисление в водяном паре при 1250-1400 °С было осуществлено на установке GASPAR (АО "ЛУЧ", Россия), состоящей из керамической трубы Ø28 × 2 мм<sup>2</sup>, установленной в печи с графитовым нагревателем. В трубку вводился пар с массовым расходом 40 мг/с. В экспериментах образцы непосредственно помещались в трубку и нагревались со скоростью 33 °С/с. Образцы окислялись в течение 120-300 с. Затем образцы отводили в холодную зону печи для охлаждения до температуры 900 °С в паре со скоростью 20 °С/с. По достижении 900 °С образцы закаливали в дистиллированной воде.

### 3.5 Характеристика образцов

Прирост массы образцов измеряли на аналитических весах CP 124S (Sartorius, Goettingen, Германия) с точностью 10<sup>-4</sup> г. Измерение прироста массы образцов осуществлялось с учетом непокрытой части (без защитного покрытия в месте крепления). Таким образом прирост массы был рассчитан с применением следующих формул:

$$W_{Cr} = \frac{\Delta m_{Cr}}{S_{Cr}}, \quad (3.1)$$

$$\Delta m_{Cr} = \Delta m - S_{un} \cdot W_{Zr}, \quad (3.2)$$

где  $S_{Cr}$  – площадь части образца с Cr покрытием (в см<sup>2</sup>);  $\Delta m_{Cr}$  – прирост массы части образца с Cr покрытием (в мг);  $\Delta m$  – прирост массы всего образца

(в мг);  $S_{\text{un}}$  – площадь непокрытой части образца (в  $\text{см}^2$ );  $W_{\text{Zr}}$  – прирост массы непокрытого сплава Zr (в мг).

Микроструктура и элементный состав образцов после окисления были проанализированы с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA3 (Tescan, Брно, Чешская Республика) и приставки для энергодисперсионного анализа Ultim Max 40 (Oxford Instruments, Хай-Уиком, Великобритания). Также для анализа микроструктуры поперечных шлифов образцов после окисления дополнительно была использована оптическая микроскопия (AXIOVERT 200MAT, Zeiss). Структура и фазовый состав были исследованы методом рентгеновской дифракции на дифрактометре XRD-7000S (Shimadzu, Киото, Япония) в конфигурации Брэгга-Брентано с  $\text{CuK}\alpha$ -излучением (длина волны  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ) при 40 кВ и 30 мА. Для определения фазового состава образцов использовалась база данных PDF4+ 2021 и программное обеспечение SLeve.

Были проведены *in situ* дифракционные исследования фазовых превращений в системе Cr/Ta/Zr в процессе линейного нагрева в вакууме до температуры 1250 °С с последующей выдержкой для выявления механизмов взаимной диффузии Cr, Ta и Zr.

Исследования *in situ* структурно-фазовых превращений были проведены на станции “Прецизионная дифрактометрия II” Института ядерной физики СО РАН на канале № 6 синхротронного излучения накопителя электронов ВЭПП-3. Экспериментальные образцы были исследованы при длине волны 1,0084 Å в процессе линейного нагрева в вакууме в диапазоне температур 25-1250 °С со скоростью 50 °С/мин. Для *in situ* исследований были специально подготовлены образцы однослойного Cr и двухслойного Cr/Ta покрытий на циркониевом сплаве Э110 с размерами 10 x 10 x 0,5 мм<sup>3</sup>. Выбор толщин барьерного Ta слоя и защитного Cr покрытия подбирались таким образом, чтобы интенсивности отраженных рентгеновских лучей на дифрактограммах от Zr, Cr и Ta были сопоставимыми. Оценка глубины проникновения излучения при длине волны 1,0084 Å показала, что толщины

барьерного слоя и защитного покрытия должны составлять 0,5 мкм и 1 мкм соответственно, общая толщина Cr и Cr/Ta покрытий составляла 1,5 мкм.

## **Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **Введение**

На нынешнем этапе развития науки и техники перспективность любого исследования определяется не только его новизной, но и коммерческой привлекательностью. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Очевидно и то, что эта коммерческая привлекательность заключается не только в создании чего-то нового или улучшении чего-то уже ранее созданного, но и то, как быстро сумеет разработчик выйти на рынок, при этом решив: будет ли проект востребован, какова будет его цена, какой потребуется бюджет для реализации и какие будут сроки осуществления задуманного.

В наше время остро стоит вопрос о безопасности ядерных реакторов. Авария на Фукусиме дала толчок к отмене ядерной программе в странах Европы, остальные страны же приняли решение поиска способов сделать станции безопаснее. Главной проблемой, возникшей на Фукусиме было отсутствие теплоносителя из – за того, что резервные источники питания не смогли обеспечить достаточно энергии для функционирования охлаждения. Как следствие, температура в реакторе возросла до такой степени, что начал происходить пароциркониевая реакция, из – за которой циркониевые топливные оболочки окислялись и разрушались.

Данная работа посвящена изучению покрытия Cr/Ta, призванного быть барьером для высокотемпературного окисления топливных оболочек. Исследования проводятся при температурах 1200 °С, на которой и происходит разрушения ТВЭЛа. Образцы окисляются в среде перегретого пара и воздуха, дабы проверить коррозионную стойкость образцов при всех возможных сценариях.

В случае данного НИР стоит делать ряд допущений, поскольку тема работы связана с ядерной энергетикой, которая полностью контролируется государством. Это важно для решения вопроса финансирования, применения и востребованности технологии. Так же, например, во Франции основной обслуживающей компанией является Areva, однако она в большей мере принадлежит государству. В зарубежной практике только в США ядерные станции управляются частными компаниями, государство выступает лишь как регулятор.

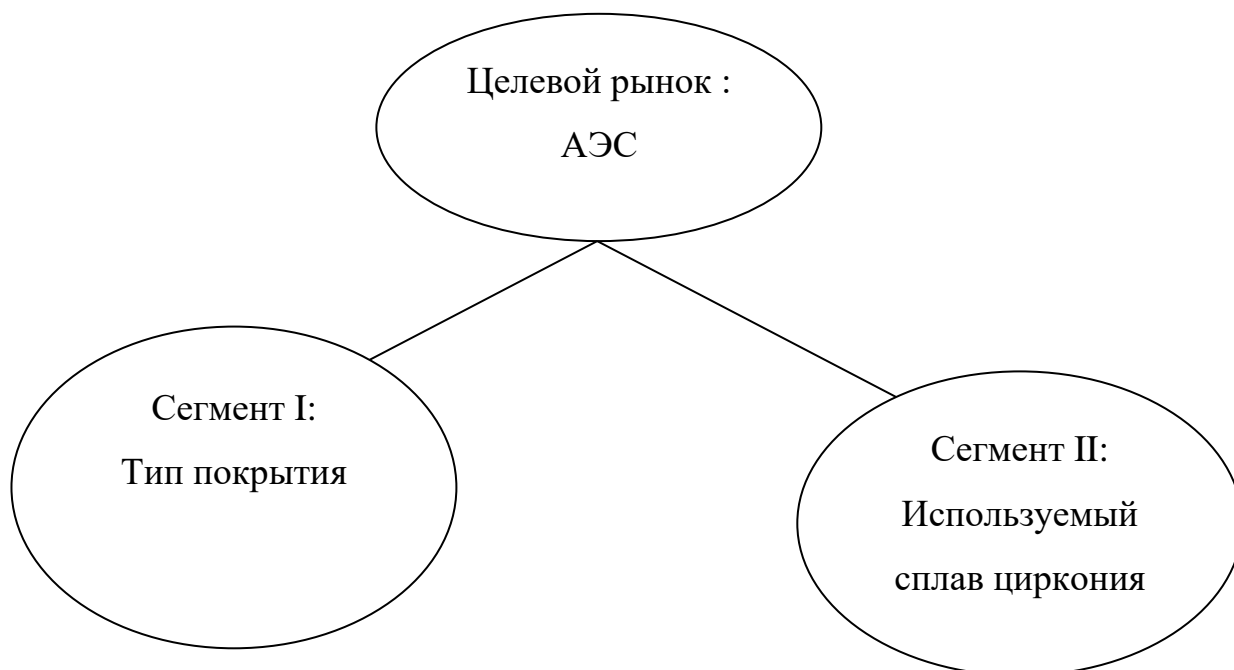
Таким образом, данный раздел нацелен на решение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- Определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- Планирование научно-исследовательских работ;
- Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

**Цель НИР:** Установить закономерности и механизмы окисления циркониевого сплава Э110 с покрытием Cr/Ta на воздухе и в среде перегретого водяного пара.

**5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения**

**5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**



На представленной выше схеме отмечены два критерия, по которым будет осуществляться сегментирование рынка.

Таблица 4 - Карта сегментирования рынка по нанесению покрытий на оболочки ТВЭЛов

		Используемый сплав циркония		
		Э110	Zircaloy 4	M5A
Тип покрытия	Cr/Ta			
	Cr/Mo			
	Cr/CrN/Cr			
	Cr			

Ячейки, закрашенные оранжевым цветом обозначают российские институты, разрабатывающие покрытия для отечественного сплава Э110,



подобных научных групп много, для примера можно взять научную группу Д.В. Сиделева (Томский политехнический университет).

Зеленым цветом обозначена научная группа Brachet (Areva), которая является своего рода вектором в изучении этой области, поэтому французская группа занимает широкий сегмент на рынке.

Голубым цветом обозначена группа Майера (США), которая занимается разработкой покрытий для американских типов реакторов..

Из таблицы 1 видно, что полностью не занят сегмент хром – танталовых покрытий. На данный момент нет научных работ, посвященных такой паре материалов. Причем, нет работ посвященных покрытиям как на отечественном сплаве (Э110), так и на иностранных (Zircaloy и M5A).

### **5.1.2 Анализ конкурентных технических решений**

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов

В рассматриваемой работе в качестве конкурентов были выбраны научная группа Brachet ( $B_{к1}$ ) и научная группа кого-то ( $B_{к2}$ ). Группа Brachet обладает довольно большим опытом и финансированием, однако до сих пор их научные работы сконцентрированы на модифицировании хромовых покрытий, не до конца справляющихся с возложенной на них задачей.

Вторая группа занята разработкой диффузионного барьера между хромовым покрытием и циркониевой подложкой, однако ими предлагается использование карбида кремния. Несмотря на то, что материал хорошо справляется с задачей диффузионного барьера, адгезионные свойства CrN значительно хуже остальных предложенных вариантов, в силу того, что CrN – керамика.

Наша разработка обладает хорошими адгезионными свойствами, но в то же время так же использует идею диффузионного барьера.

Расчет показателей конкурентоспособности проводился по следующей формуле

$$K = \sum_i B_i \cdot V_i$$

где  $B_i$  – балл  $i$ -го показателя;

$V_i$  – вес показателя.

Таблица 5 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерий оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентноспособность		
		БФ	Бк1	Бк2	КФ	Кк1	Кк2
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Эффективность метода нанесения покрытия	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
2. Улучшение прочности топливной оболочки	0,05	4	3	3	0,2	0,15	0,15
3. Устойчивость к окислению в среде пара	0,2	4	3	3	0,8	0,6	0,6
4. Устойчивость к окислению в воздушной среде	0,2	3	4	4	0,6	0,8	0,8
5. Адгезия покрытия	0,15	5	5	2	0,75	0,75	0,30
6. Влияние покрытия на энергетическую эффективность реактора	0,1	4	3	2	0,4	0,3	0,2
7. Простота получения покрытия	0,05	3	4	4	0,15	0,2	0,2
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,025	5	4	4	0,125	0,1	0,1
2. Стоимость нанесения покрытия	0,025	3	5	5	0,075	0,125	0,125
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
4. Финансирование научного исследования	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>44</b>	<b>43</b>	<b>4,05</b>	<b>3,925</b>	<b>3,425</b>

Согласно вышеприведенному расчету видно, что предлагаемая технология танталового диффузионного барьера имеет более высокий показатель конкурентоспособности (4,05). Это обусловлено следующим

рядом факторов: покрытия улучшает механические свойства топливной оболочки, надёжность, покрытия имеют хорошие адгезионные свойства, конкурентоспособность и большой предполагаемый срок эксплуатации.

### 5.1.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Результаты исследования приведены в SWOT-анализ (таблица).

Таблица 6 - SWOT матрица

<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
С1. Финансирование исследования Российским научным фондом;	Сл1. Сложность испытания образцов в условиях реального реактора;
С2. Уникальность исследования;	Сл2. Дороговизна одно из используемых материалов для массового производства;
С3. Востребованность исследования в области ядерной энергетики;	Сл3. Трудности реализации технологии в промышленном масштабе;
С4. Возможность кооперации с другими университетами и научными центрами России	Сл4. Применение исследуемого материала (тантала) не исследовано.
С5. Доступность методов исследования;	Сл.5. Необходимость квалифицированных кадров для реализации технологии на промышленно уровне.
С6. Опытные и квалифицированные руководители исследования;	
С7. Большая выборка образцов, подвергаемых испытаниям;	
<b>Возможности</b>	<b>Угрозы</b>
В1. В случае положительно результата исследования, возникнет большой спрос в ядерной энергетике на разрабатываемое покрытие.	У1. Спад интереса к ядерной промышленности на мировом рынке. Подобная тенденция намечена в странах Европы;
В2. Выход на международный рынок;	У2. Неэффективность покрытия;
В3. Дальнейшее финансирование исследования с целью улучшения свойств покрытия;	У3. Возникновение аналогичного покрытия;

Таблица 7 - Интерактивная матрица "Сильные стороны - возможности проекта"

Сильные стороны проекта								
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	B1	-	+	+	-	-	-	0
	B2	-	+	+	0	-	0	0
	B3	+	+	+	-	+	0	-

Таблица 8 - Интерактивная матрица "Сильные стороны - угрозы проекта"

Сильные стороны проекта								
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	У1	+	+	0	-	-	-	-
	У2	-	+	+	-	-	-	-
	У3	-	+	+	-	-	-	-

Таблица 9 - Интерактивная матрица "Слабые стороны - возможности проекта"

Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	-	0	0	-	0
	B2	-	-	0	-	-
	B3	-	+	-	-	-

Таблица 10 - Интерактивная матрица "Слабые стороны - угрозы проекта"

Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	У1	0	+	+	+	0
	У2	+	+	+	+	+
	У3	-	0	0	0	-

Таблица 11 - SWOT - анализ

	<p><b>Сильные стороны:</b></p> <p>С1. Финансирование исследования Российским научным фондом;</p> <p>С2. Уникальность исследования;</p> <p>С3. Востребованность исследования в области ядерной энергетики;</p> <p>С4. Возможность кооперации с другими университетами и научными центрами России</p>	<p><b>Слабые стороны</b></p> <p>Сл1. Сложность испытания образцов в условиях реального реактора;</p> <p>Сл2. Дороговизна одно из используемых материалов для массового производства;</p> <p>Сл3. Трудности реализации технологии в промышленном масштабе;</p>
--	---	---

	<p>С5. Доступность методов исследования;</p> <p>С6. Опытные и квалифицированные руководители исследования;</p> <p>С7. Большая выборка образцов, подвергаемых испытаниям;</p>	<p>Сл4. Применение исследуемого материала (тантала) не исследовано.</p> <p>Сл.5. Необходимость квалифицированных кадров для реализации технологии на промышленно уровне</p>
<p><b>Возможности</b></p> <p>В1. В случае положительно результата исследования, возникнет большой спрос в ядерной энергетике на разрабатываемое покрытие.</p> <p>В2. Выход на международный рынок;</p> <p>В3. Дальнейшее финансирование исследования с целью улучшения свойств покрытия;</p>	<p>Соотнося возможности и сильные стороны, можно сказать, что, учитывая актуальность и уникальность проекта, проект можно считать довольно перспективным.</p>	<p>Учитывая все возможности и слабости, можно выделить одну главную – сложность и дороговизна реализации концепции проекта в промышленном масштабе. Однако ведутся разработки, в будущем способные помочь избавиться от этой слабости.</p>
<p><b>Угрозы</b></p> <p>У1. Спад интереса к ядерной промышленности на мировом рынке. Подобная тенденция намечена в странах Европы;</p> <p>У2. Неэффективность покрытия;</p> <p>У3. Возникновение аналогичного покрытия;</p>	<p>Не смотря на общий спад интереса к ядерной промышленности в развитых странах, общая тенденция развития этой отрасли является положительной. Однако с этим развитием не исключено и возникновение непосредственного конкурента, выдвигающего похожее по составу покрытие. Однако важнейшей угрозой, с которой сложно что-то сделать, является неэффективность покрытия.. Разработки еще ведутся, а посему еще неизвестно, будет ли использование тантала решением проблемы.</p>	<p>Первая слабость проекта кроет в себе огромную опасность. Если лабораторные испытания покажут, что покрытие эффективно – это еще не значит, что в условиях реактора оно будет проявлять себя так же хорошо. А энергетическая неэффективность ядерной реактора, а также несоответствующие требованиям свойства топливных оболочек может привести к аварии. Слабости, касающиеся дороговизны и сложности реализации не являются столь критичными, поскольку ядерная промышленность в нашей стране хорошо финансируется, на материалах и технологиях экономии нет.</p>

### **Вывод по SWOT- анализу:**

В ходе анализа было выяснено, что проект является довольно перспективным и востребованным, однако при реализации проекта могут возникнуть трудности, некоторые из которых не представляют столь большой проблемы (реализация в странах запада), так и с довольно серьезными – неэффективность покрытия. В случае, если покрытие будет выполнять защитную функцию, проект будет иметь довольно большой успех, что приведет к дальнейшему финансированию исследований. Даже в случае неуспеха, такие компании как Росатом, заинтересованы в финансировании научных групп, занимающихся подобными исследованиями, поскольку в перспективе это может принести довольно хорошую прибыль.

## 5.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы приведён в таблице 5.3. Работа выполнялась студентом (инженер) под руководством научного руководителя.

Таблица 12 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей.

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель проекта
Выбор направления исследований	2	Поиск литературы и публикаций по схожей тематике	Инженер (дипломник)
	3	Календарное планирование проекта	Инженер (дипломник)
	4	Составление методики экспериментов	Руководитель проекта
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Теоретическое обоснование использования промежуточного слоя из тантала	Руководитель, инженер (дипломник)
	6	Проведение экспериментов по окислению образцов в среде воздуха при высоких температурах	Инженер (дипломник)
	7	Проведение экспериментов по окислению образцов в среде воздуха при высоких температурах	Инженер (сторонняя организация 1)
	8	Механическая обработка образцов	Инженер

			(дипломник)
	9	Применение оптического и сканирующего электронного микроскопа, а также рентгеноструктурного спектрометра для изучения структуры покрытий	Инженер (дипломник), Инженер (сторонняя организация 2), Руководитель
Обобщение и оценка результатов	10	Формулирование механизма диффузии в случае исследуемого покрытия	Руководитель, инженер (дипломник)
	11	Оценка эффективности покрытия	Руководитель, инженер (дипломник)
Оформление отчета по НИР	12	Составление пояснительной записки к НИР.	Инженер (дипломник)

### 5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления бюджета.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{max}i}}{5}$$

где  $t_{\text{ож}i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{\text{mini}}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\text{max}i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_r$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как



удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$  - численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

**Диаграмма Ганта** – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  - продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  - коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}$$


Где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;


$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

Исполнитель 1 – руководитель проект 

Исполнитель 2 – инженер (дипломник) 

Исполнитель 3 – инженер (сторонняя организация 1) 

Исполнитель 4 – инженер (сторонняя организация 2) 

	1 февраля	4 февраля	21 февраля	24 февраля	1 марта	10 марта	19 марта	26 марта	11 апреля	23 апреля	1 июня
Составление и утверждение технического задания	■										
Поиск литературы и публикаций по схожей тематике		■									
Календарное планирование проекта			■	■							
Составление методики экспериментов				■	■						
Теоретическое обоснование использования промежуточного слоя из тантала					■	■					
Проведение экспериментов по окислению образцов в среде воздуха при высоких температурах						■	■				
Проведение экспериментов по окислению образцов в среде воздуха при высоких температурах							■	■			
Механическая обработка образцов								■	■		
Применение оптического и сканирующего электронного микроскопа, а также рентгеноструктурного спектрометра для изучения структуры покрытий									■	■	
Формулирование механизма диффузии в случае исследуемого покрытия										■	■
Составление пояснительной записки к НИР.							■	■	■	■	■

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей, а также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из исполнителей

### 5.3. Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научного исследования учитывается полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

1. материальные затраты НТИ;
2. затраты на специальное оборудование;
3. амортизационные отчисления;
4. основная заработная плата исполнителей;
5. дополнительная заработная плата исполнителей;
6. отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
7. накладные расходы.

#### 5.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

В данную статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы (15-25% от стоимости материалов).

Значения цен на материальные ресурсы были установлены по действующим прейскурантам или договорным ценам.

Таблица 13 - Материальные затраты

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во, ед.	Сумма, руб.
Листы шлифовальные	120	12	1440
Емкость с эпоксидная смолой	1140	1	11
Танталовая мишень	70000	1	70000
Хромовая мишень	35000	1	35000
Образцы сплава циркония Э110	250	14	3500
Итого:			109951

### 5.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стенов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Для выполнения данной работы нового оборудования не приобреталось, все использованное оборудование являлось собственностью отделения экспериментальной физики НИИ ТПУ. Поэтому необходимо рассчитать амортизационные отчисления для использованного оборудования.

Расчет амортизации производился следующим образом:

$$H_a = \frac{1}{n}$$

где  $n$  – срок полезного использования (СПИ) в количестве лет.

Ежемесячные амортизационные отчисления:

$$A_M = \frac{H_a \cdot И}{12}$$

где  $И$  – первоначальная стоимость оборудования (ПСО), тыс.руб.

Результаты расчетов занесены в таблицу 11

Таблица 14 - Амортизационные отчисления.

Наименование оборудования	Цена, тыс.	Кол-во.	Сумма, тыс. руб.	Срок полезного использования	Норма амортизации	Ежемесячные отчисления, тыс. руб
Вакуумная система (со всеми составляющими)	10000	1	10000	10	0.1	83
Блоки питания для магнетронно-распылительной системы	1000	2	2000	10	0.1	17
Магнетроны	30	2	60	5	0.2	1
Шлифовальная машина	50	1	50	20	0.05	0.21
Микроскоп оптический	50	1	50	20	0.05	0.21
Печь автоклавная	500	1	500	10	0.1	4.2
<b>Итого:</b>						<b>106</b>

Таким образом, амортизационные затраты на специальное оборудование в ходе научного исследования в сумме на специальное оборудование составили 106 тыс. рублей.

### 5.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме и дополнительная заработная плата научно-производственного персонала.

Баланс рабочего времени представлен в таблице 12.

Таблица 12. Баланс рабочего времени.

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	265
<b>Календарное число нерабочих дней</b>		
выходные дни	52	82
праздничные дни	14	14
<b>Потери рабочего времени</b>		
отпуск	45	52
невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	254	217

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата (12-20% от  $Z_{\text{осн}}$ ).

Основная заработная плата  $Z_{\text{осн}}$  одного работника рассчитывается по следующей формуле

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}$$

где  $T_{\text{раб}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 24 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя);

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{ТС}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}$$

где  $Z_{\text{ТС}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3;

$k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

$k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3

Расчет основной заработной платы представлен в таблице 5.8

Руководителем в данном случае выступает Сыртанов М.С. доцент, к.т.н, оклад которого составляет 37700, оклад инженера примем равным 13900 в

соответствии с нормами ТПУ. Премияльные коэффициент и коэффициент доплат учитывать не будем.

### 5.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12-0,15).

Результаты расчета представлены в таблице 13

Таблица 12 - Расчет основной заработной платы.

Исполнители	$Z_{mc}$	$k_{np}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{dn}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.	$Z_{доп}$ , руб.	$Z_{зн}$ , руб.
Руководитель	37700	-	-	1,3	49010	2007	45	90315	10837,8	101152,8
Инженер	13900	-	-	1,3	18070	866	102	88332	10599,84	98931,84
Итого по статье								178647	21437,6	200084,64

### 5.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:



$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}})$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Отчисления на социальные нужды (30% от статьи заработной платы) составили 60025 руб.

### 5.3.6 Контрагентные расходы

Контрагентные расходы включают затраты, связанные с выполнением каких-либо работ по теме сторонними организациями (контрагентами, субподрядчиками). В рассматриваемом случае подразумеваются следующие расходы:

- Окисление образцов в среде перегретого пара в институте ВНИИНМ, г. Москва;
- Использование оптического микроскопа, ТПУ;
- Использование структурного электронного микроскопа, ТПУ;

В таблице 15 представлены цена за час работы и общий расчет затрат.

Таблица 15 - Контрагентные расходы

	Цена за человеко-час	Время работы	Общая стоимость
Окисление образцов в "ВНИИНМ"	4000	7	28000
Оптическая микроскопия высокого разрешения	1000	3	3000
Структурная электронная микроскопия	2000	4	8000
Итого		39000	

### 5.3.7 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии и т.д. Их величина определяется по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (\text{сумма статей 1:7})$$

$k_{\text{накл}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов возьмём в размере 16%.

$$\begin{aligned} Z_{\text{накл}} &= 0,16 \cdot (109951 + 105580 + 178647 + 21437,6 + 60025 + 39000) \\ &= 78912 \text{ руб.} \end{aligned}$$

### 5.3.8 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект представлен в таблице 15.

Таблица 15. Расчет бюджета затрат НИИ.

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты	111040
Амортизационные отчисления	109 200
Затраты на основную заработную плату	178 647
Затраты на дополнительную заработную плату	21437,6
Страховые отчисления	60 025
Накладные расходы	70364
Бюджет затрат НИИ	490028

## 5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Показатели экономической эффективности проекта учитывают финансовые последствия его осуществления для предприятия, реализующего данный проект. В этом случае показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения. Бюджетная эффективность характеризуется участием государства в проекте с точки зрения расходов и доходов бюджетов всех уровней.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

В качестве вариантов исполнения были выбраны похожие с Cr/Ta ( $\Phi_{pi}=490028$ ) покрытием технологические решения: покрытие с использованием

одно лишь хрома ( $\Phi_{p2}=390000$ ), и покрытие с использованием высокоэнтропийных покрытий ( $\Phi_{p3}=620000$ ).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп1}} = \frac{490028}{620000} = 0,79$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп2}} = \frac{390000}{620000} = 0,63$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп3}} = \frac{620000}{620000} = 1$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разы.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Далее в таблице 16 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта, где аналог 1 – технология Cr покрытий без диффузионного слоя, аналог 2 – покрытия на основе высокоэнтропийных мишеней.

Таблица 16. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта.

Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
Критерии				
1.Адгезионная прочность покрытий	0,25	5	5	3
2.Простота получения	0,15	4	5	2
3.Надежность	0,2	5	3	4
4.Долговечность	0,3	5	3	5

5.Влияние на энергетику реактора	0,1	3	4	3
Итого	1	22	20	17

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,1 \cdot 3 = 4,65 \quad (5.26)$$

$$I_{p2} = 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,2 \cdot 3 + 0,3 \cdot 3 + 0,1 \cdot 4 = 3,6 \quad (5.27)$$

$$I_{p3} = 0,25 \cdot 3 + 0,15 \cdot 2 + 0,2 \cdot 4 + 0,3 \cdot 5 + 0,1 \cdot 3 = 3,05 \quad (5.28)$$

Интегральный показатель эффективности разработки ( $I_{\text{фин}}^p$ ) и аналога ( $I_{\text{фин}}^a$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{фин}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{ф}}^p} = \frac{4,65}{0,79} = 5,89 \quad (5.29)$$

$$I_{\text{фин}}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_{\text{ф}}^p} = \frac{3,6}{0,63} = 5,7 \quad (5.30)$$

$$I_{\text{фин}}^{a2} = \frac{I_m^p}{I_{\text{ф}}^p} = \frac{3,05}{1} = 3,05 \quad (5.31)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{фин}}^p}{I_{\text{фин}}^{ai}} \quad (5.32)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$  – сравнительная эффективность проекта;

$I_{\text{фин}}^p$  – интегральный показатель разработки;

$I_{\text{фин}}^{ai}$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

В таблице 5.11 представлена сравнительная эффективность разработки, аналог 1 – технология осаждения покрытий CrAlN с помощью метода катодного дугового испарения, аналог 2 – магнетронное реактивное осаждение покрытий CrAlN.

Таблица 17. Сравнительная эффективность разработки.

№	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,79	0,63	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65	3,6	3,05
3	Интегральный показатель эффективности	5,89	5,7	3,05
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,27	1,59	1

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения, поставленного в данной технической задаче с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

## Заключение

1. В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент» был выполнен анализ конкурентоспособности. Данный анализ подтвердил конкурентоспособность применения технологии покрытий Cr/Ta, используемых как защитное покрытие для топливных оболочек реакторов типа ВВР связи с более высокими показателями механических и функциональных характеристик поверхности изделий.

2. Был проведен SWOT анализ, позволивший выявить сильные и слабые стороны проекта, возможности и угрозы. В ходе анализа было выяснено, что проект обладает большим количеством сильных сторон и возможностей, несмотря на то, что присутствует довольно явная угроза неэффективности покрытия.

3. Было осуществлено построение график – плана НТИ, в ходе которого было выяснено, что реализовать проект можно во временных рамках с 1 февраля по 1 июня, основная работа будет выполнена студентом – дипломником и научным руководителем.

4. Бюджет проекта составил примерно 490 тыс. рублей. Основу стоимости закладывают амортизационные отчисления и мишени для магнетронного распыления.

5. Определены показатели ресурсоэффективности, интегральный финансовый показатель, интегральный показатель эффективности и сравнительная эффективность вариантов исполнения, значения которых свидетельствуют о достаточно высокой эффективности реализации технического проекта.

## **Глава 6 Социальная ответственность**

В работе проводится установление закономерностей и механизмов окисления циркониевого сплава Э110 с покрытием Cr/Ta на воздухе и в среде перегретого водяного пара. Все исследования проводятся в лаборатории 106 физического корпуса Томского Политехнического Университета.

### **6.1 Правовые вопросы обеспечения безопасности**

Знание и строгое соблюдение правил техники безопасности являются обязательными для всего персонала. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа, и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом [85].

Квалификационной комиссией проводится проверка знаний правил техники безопасности после обучения на рабочем месте. Проверяемому сотруднику, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение.

Проведение всех видов инструктажа должно оформляться в журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктажа, с указанием даты проведения инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж

По данной теме рассматриваются специальные законодательные и нормативные документы:

- инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В;
- инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВД

Согласно [86], продолжительность работ не должна превышать 40 часов в неделю, таким образом, при шестидневной рабочей неделе продолжительность



рабочего дня должна составлять не более 7 часов. Обязательное социальное страхование работников регламентируется [87, 88]. Работодатели обязуются обеспечить своим подчиненным социальное страхование от возможных производственных несчастных случаев. Также представленный вид страхования может применяться в случае возникновения профессионального заболевания. Работники могут получать выплаты на основаниях, указанных в [86]

### 6.1.1 Организация рабочей зоны исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ, должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 27.

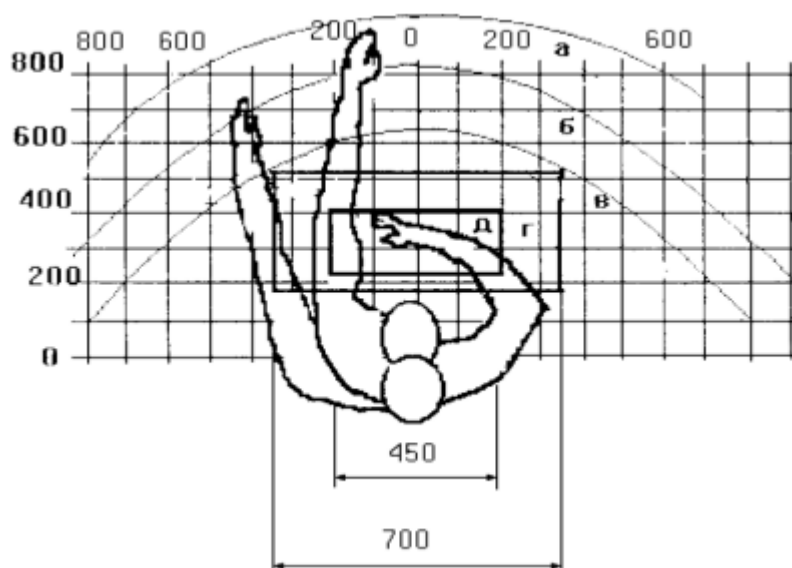


Рисунок 27 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зонах г/д;

- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);
- документация – в зоне легкой досягаемости ладони;
- слева в зоне в(слева) размещается литература и документация, необходимая при работе;
- в выдвижных ящиках стола размещается литература, которая не используется постоянно.

Для проектирования письменного стола должны быть учтены следующие требования:

- высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм;
- высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм;
- рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм;
- пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно–поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем. Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране [89].

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;

- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

## 6.2 Производственная безопасность

При работе на экспериментальной установке, предназначенной для процессов ионно-плазменного азотирования и магнетронного осаждения, имеют место опасные и вредные производственные факторы [90]. Опасные и вредные факторы при работе с экспериментальной установкой и нормативные документы, их регулирующие сведены в таблице 18.

Таблица 18. Опасные и вредные факторы при работе с экспериментальной ионно-плазменной установкой

<b>Факторы</b>		<b>Нормативные документы</b>
<b>Вредные</b>	<b>Опасные</b>	
Повышенный уровень шума		ГОСТ 12.1.029-80 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация» [92]
Отсутствие естественного света		СанПин 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» [104]
	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность» [99]
Отклонение показателей микроклимата		СанПин 2.2.4.548-96. «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [95]

## 6.2.1 Опасные и вредные производственные факторы

### 1. Расчет искусственного освещения

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Лабораторное помещение, в котором осуществлялась работа, имеет следующие параметры (таблица 19).

Таблица 19. Параметры помещения

Длина (A), м	Ширина (B), м	Высота (H), м	Высота рабочей поверхности над полом ( $h_{pn}$ ), м
8	4	6	0,8

Рассчитаем площадь помещения  $S$ :

$$S = A \cdot B = 8 \cdot 4 = 32 \text{ м}^2. \quad (6.1)$$

Выбираем светильник ALS.OPL 418 HF ES1 [91], световой поток которой равен  $\Phi_{\text{ЛД}} = 1350$  Лм. Светильник имеет 4 лампы мощностью 18 Вт, длина светильника равна 640 мм, ширина – 640 мм. Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda$ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем  $\lambda=1,1$ , расстояние светильников от перекрытия  $h_c = 0,3$  м. Определяем расчетную высоту светильника над рабочей поверхностью по формуле:

$$h = H - h_c - h_{pn} = 6 - 0,3 - 0,8 = 4,9 \text{ м}. \quad (6.2)$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами светильников  $L$  рассчитываем по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 4,9 = 5,39 \text{ м}. \quad (6.3)$$

Расстояние от крайнего ряда светильников до стены:

$$L = L/3 = 1,8 \text{ м}. \quad (6.4)$$

Определяем индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{8 \cdot 4}{2,6 \cdot (8 + 4)} = 1,03. \quad (6.5)$$

Зная коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор  $\rho_c=50\%$ , свежепобеленного потолка  $\rho_{\Pi}=70\%$  и пола – 20 %, коэффициент использования светильника равен 0,51. Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли  $K_3$  равен = 1,5. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп  $Z = 1,1$ .

Тогда количество светильников, необходимых для установки в лаборатории 106 физического корпуса ТПУ равно:

$$N = \frac{E \cdot S \cdot K_3}{\eta \cdot n \cdot \Phi_{\text{лд}}} = \frac{200 \cdot 32 \cdot 1,5}{0,51 \cdot 4 \cdot 1350} = 3,49 = 4, \quad (6.6)$$

где  $E$  – требуемая горизонтальная освещенность, лк;  $S$  – площадь помещения, м;  $K_3$  – коэффициент запаса;  $U$  – коэффициент использования;  $\Phi_{\text{лд}}$  – световой поток одной лампы, лм;  $\eta$  – коэффициент использования светильника.

Световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 8 \cdot 4 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{6 \cdot 4 \cdot 0,51} = 1294 \text{ лм}. \quad (6.7)$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi}{\Phi_{\text{лд}}} \leq 20\% = -10\% \leq \frac{1350 - 1294}{1350} \leq 20\%. \quad (6.8)$$

Таким образом:  $-10\% \leq -4,14\% \leq 20\%$ , необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Размещаем светильники в 1 ряда по 4 штук. На рисунке 28 изображен план размещения светильников с люминесцентными лампами в лаборатории 106 физического корпуса ТПУ.

Таким образом, освещение в лаборатории 106 физического корпуса ТПУ соответствует установленным нормам [104].

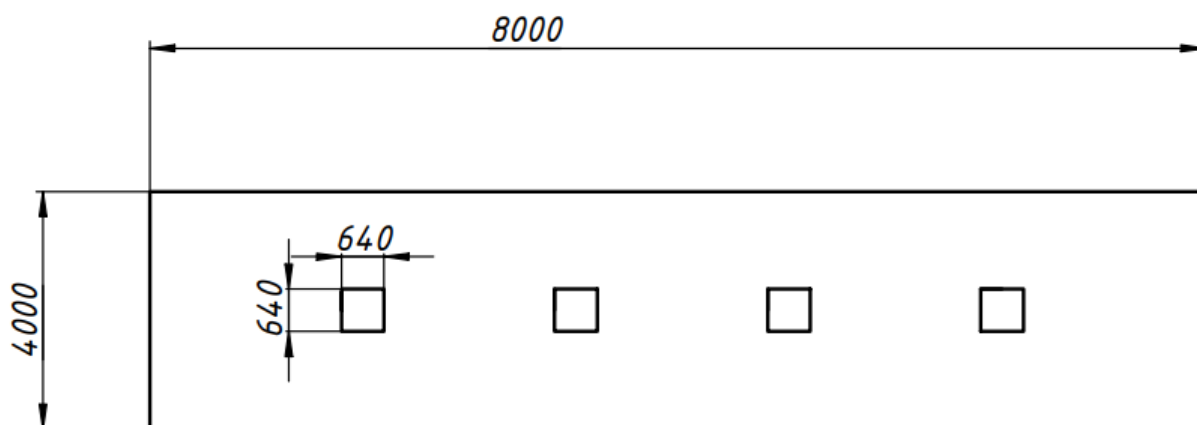


Рисунок 28 - План размещения светильников в лаборатории 106 физического корпуса ТПУ.

## 2. Шум

Производственным шумом называется шум на рабочих местах, на участках или на территориях предприятий, который возникает во время производственного процесса. Следствием вредного действия производственного шума могут быть: профессиональные заболевания, повышение общей заболеваемости, снижение работоспособности, повышение степени риска травм и несчастных случаев, связанных с нарушением восприятия предупредительных сигналов, нарушение слухового контроля функционирования технологического оборудования, снижение производительности труда. При работе механических и электромеханических изделий часто возникают шумы. Шумы, возникающие при работе экспериментальной установки, связаны с вращением движущихся частей форвакуумного и турбомолекулярного насоса. Согласно [92] предельный уровень шума для научной деятельности не должен превышать 75 дБ (таблица 20).

Таблица 20. Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных видов трудовой деятельности

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука в (дБ)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	
Работа, требующая сосредоточенности	103	91	83	77	73	70	68	66	75

Согласно ГОСТ 12.4.318-2019 (ISO 4869-3:2007) «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты органа слуха. Упрощенный метод измерения акустической эффективности противошумных наушников для оценки качества» [93] – в качестве средств коллективной защиты применяются следующие методы: изменение направленности излучения шума, рациональная планировка помещения позволяющая увеличить расстояние до источника шума и уменьшить его воздействие на человека, акустическая обработка помещения, а также применение звукоизоляции. 57 Работающих в шумоопасных зонах, администрация снабжает средствами индивидуальной защиты, которыми являются специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противошумовые каски, защитное действие которых основано на изоляции и поглощения звука.

Работающих в шумоопасных зонах, администрация снабжает средствами индивидуальной защиты, которыми являются специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противошумовые каски, защитное действие которых основано на изоляции и поглощения звука.

В помещении 106 третьего учебного корпуса уровень шума во время работы не превышает установленных норм [92], поэтому применение дополнительной защиты не требуется.



### 3. Отклонение показателей микроклимата

Параметрами, характеризующими микроклимат, являются: температура воздуха, температура поверхности установки, относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха. Перегрев организма наступает при высокой температуре воздуха и высокой относительной влажности, которые сопровождаются низкой подвижностью воздушной массы. При наступлении переохлаждения снижается температура тела, происходит сужение кровеносных сосудов, возникают сбои в работе сердечно - сосудистой системы [94].

Согласно [95] выполняемые работы относятся к Iб категории работ. К данной категории относятся работы с интенсивностью энергозатрат 121-150 ккал/ч (140-174 Вт), производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением. Температура наружных поверхностей технологического оборудования, ограждающих устройств, с которыми соприкасается в процессе труда человек, не превышает 450°С. Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений представлены в таблице 21 и таблице 22, соответственно.

Таблица 21 - Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих

Период года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения потока воздуха, м/с
Холодный	21-23	60-40	0,1
Теплый	22-24	60-40	0,1

Таблица 22. Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих

Период года	Температура воздуха, °С		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения потока воздуха, м/с	
	Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше допустимых величин		для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более
Холодный	19,9 -20,9	23,1-24,0	15-75	0,1	0,2
Теплый	20,0-21,9	24,1-28,0	15-75	0,1	0,3

Для создания оптимальных метеорологических условий применяется кондиционер, который поддерживает оптимальные параметры микроклимата автоматически, независимо от меняющихся условий. В холодное время года для поддержания в помещении оптимальной температуры воздуха применяется отопление.

Рассчитаем объем помещения

$$V = S \cdot H = 32 \cdot 6 = 192 \text{ м}^3. \quad (6.9)$$

Кратность воздухообмена для производственных помещений согласно [97], определяется как

$$K_v = \frac{L_{\text{возд}}}{V_{\text{помещ}}}, \quad (6.10)$$

где  $L_{\text{возд}}$  – расчётный воздухообмен помещения, м<sup>3</sup>/ч;

$V_{\text{помещ}}$  – объем помещения, м<sup>3</sup>.

Расчётный воздухообмен помещения вычисляют по формуле:

$$L = L_0 \cdot N, \quad (6.11)$$

где  $L_0$  — нормативный воздухообмен на 1 человека, м<sup>3</sup>/(чел·ч);

$N$  – количество людей в помещении.

Для лабораторий нормативный воздухообмен на 1 человека в производственных помещениях с естественным проветриванием составляет 30

$\text{м}^3/(\text{чел}\cdot\text{ч})$  [97], в лаборатории 106 физического корпуса Томского политехнического университета постоянно находятся 3 человек, однако в лаборатории также регулярно пребывают студенты, поэтому рассчитаем воздухообмен для 8 человек.

$$L = 30 \cdot 8 = 240 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (6.12)$$

Следовательно кратность воздухообмена равна

$$K_{\text{в}} = \frac{240}{192} \approx 1,25 \text{ ч}^{-1}. \quad (6.13)$$

Поскольку кратность воздухообмена равна не целому числу, округлим его. Округление следует производить в большую сторону. Таким образом  $K_{\text{в}} = 2 \text{ ч}^{-1}$ . Подберем систему кондиционирования со следующей производительностью

$$L = 2 \cdot 192 = 384 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (6.14)$$

Выбран вентилятор ФЬОРДИ ПРО ВПУ-300 ЕС/2,2-220/1-BLG с производительностью  $400 \text{ м}^3/\text{ч}$  [96].

Таким образом, микроклимат в лаборатории 106 физического корпуса ТПУ соответствует установленным нормам [95].

#### **4.Электробезопасность**

Неисправность проводки установки может стать причиной поражения электрическим током. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. Пороговый не отпускающий ток составляет 50 Гц (6-16мА). Защита от воздействия электрического тока осуществляется путем проведения организационных, инженерно - технических и лечебно-профилактических мероприятий. Электробезопасность должна обеспечиваться конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты. Используемое помещение относится к классу с повышенной опасностью, так как в данном помещении возможно одновременное

прикосновения человека. к имеющей соединение с землей металлоконструкцией здания с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования с другой стороны. Граничные значения напряжений, при повышении которых требуется выполнение защиты от косвенного прикосновения для помещений с повышенной опасностью составляет  $>25$  В переменного тока и  $>60$  В постоянного тока. Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия: содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами, а также своевременно проводить техническое обслуживание и соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием.

В качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием согласно [98] и [99] могут быть использованы: изоляция токоведущих частей, малое напряжение в электрических цепях, защитное заземление, зануление, защитное отключение, применение разделяющих трансформаторов, использование оболочек и блокировок для предотвращения возможности случайного прикосновения к токоведущим частям и ошибочных действий или операций, защитные средства и предохранительные приспособления. В качестве индивидуальных защитных средств, в случаях, когда необходимо произвести техническое обслуживание оборудование используется диэлектрические перчатки. В качестве дополнительного оборудования возможно использование диэлектрических ковриков.

Согласно ПЭУ [99] лаборатория 106 относится к первой категории электробезопасности, ввиду нормального микроклимата, малого количества токопроводящих поверхностей, а также отсутствия работ за установками, где требуется напряжение выше 1000 В.

## **5. Пожаровзрывобезопасность**

Строительно-планировочные меры определяются огнестойкостью зданий и сооружений (выбор материалов конструкций по степени огнестойкости). В зависимости от степени огнестойкости определяются наибольшие

дополнительные расстояния от выходов для эвакуации при пожарах. Технические меры: 1) соблюдение противопожарных норм для систем отопления, освещения, электрического обеспечения и т.д. 2) использование разнообразных защитных систем; 3) соблюдение параметров технологических процессов и режимов работы оборудования.

Организационные меры представляют собой проведение инструктажа персонала по пожарной безопасности, соблюдение мер пожарной безопасности. Для предупреждения возникновения пожара необходимо соблюдать следующие правила пожарной безопасности: правильная эксплуатация оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации. Согласно СНиП 21-01-97 [100] , по взрывоопасности и пожароопасности помещение относится к классу В4, т.е. к помещениям, в которых находятся (обращаются) горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть В помещении для тушения возгораний предусмотрено использование углекислотного огнетушителя ОУ-3 для тушения возгораний классов А, В и электроустановок до 1000 В при температуре воздуха  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . На рисунке 29 представлен план эвакуации из лаборатории. Состояние лаборатории 106 физического корпуса ТПУ соответствует нормам и пожаробезопасности [100]

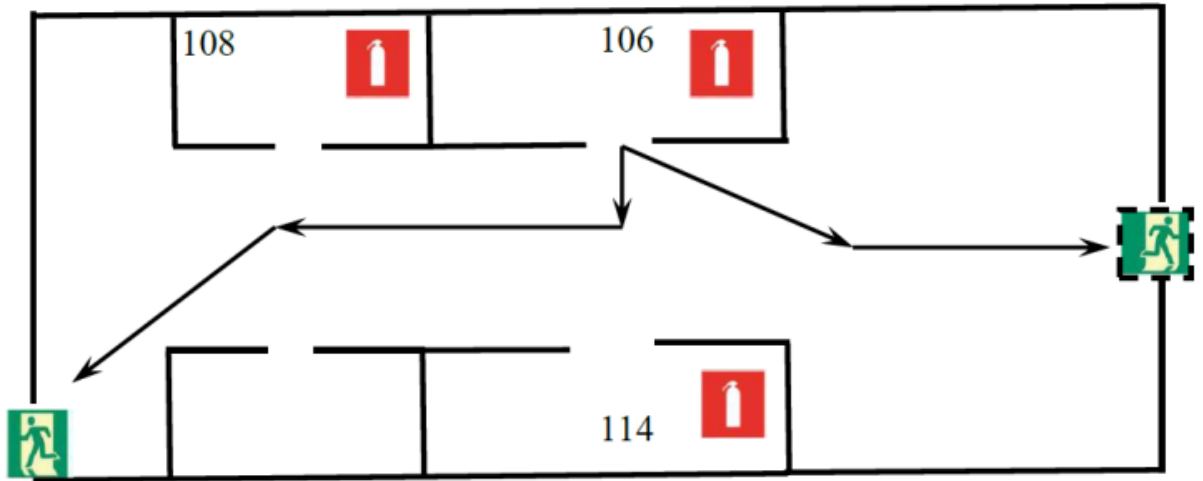


Рисунок 29 - План эвакуации рабочих помещений.

### 6.3 Аварийные и чрезвычайные ситуации

Чрезвычайная ситуация - это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, распространения заболевания, представляющего опасность для окружающих, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей [102].

В лаборатории расположено несколько вакуумных камер, на которых работа не осуществляется, однако они так же представляют опасность для присутствующих. Помимо этого в этой же лаборатории расположен вытяжной шкаф, в котором осуществляются работы. В таблице 23 занесены возможные аварийные и чрезвычайные ситуации (АС и ЧС), которые могут возникнуть в лаборатории 106 физического корпуса ТПУ, меры по предотвращению, меры по ликвидации последствий АС и ЧС

Таблица 23. Возможные АС и ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории 106 физического корпуса ТПУ, меры по предотвращению, меры по ликвидации последствий АС и ЧС

Тип АС и ЧС	Меры предотвращения АС и ЧС	Меры по ликвидации последствий АС и ЧС
Химическое отравление из – за неисправности вытяжного шкафа	– Следите за исправностью вытяжного шкафа и целостностью используемых перчаток; – проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности; – отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ.	– Вызвать МЧС (тел. 112); – отключить электропитание, выключить вентиляцию; – закрыть двери и окна; – Для защиты органов дыхания используйте противогаз, а при его отсутствии – ватно-марлевую повязку или подручные изделия из ткани, смоченные в воде, 2-5%-ном растворе пищевой соды (для защиты от хлора), 2%-ном растворе лимонной или уксусной кислоты (огнетушитель ВП, УК или П) или песком. При невозможности – начать эвакуацию людей из помещения;

		– сообщить об аварии администрации лаборатории и института.
Пожар	– проведение периодических инструктажей по электробезопасности; – содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами.	– обесточить установку, переместив в нижнее положение ручку рубильника; – отключить подачу водоохлаждения; – вызвать МЧС (моб. 112).
Удушение человека или взрыв вследствие разгерметизации газовых баллонов	– проведение периодических инструктажей по работе с газовыми баллонами; –устанавливать баллоны вертикально и на расстоянии не менее 1 метра от радиаторов и не менее 5 метров от источников тепла с открытым огнём [103].	– покинуть помещение, оставив включенной вентиляцию до полного исчезновения запаха; – вызвать МЧС (моб. 112).



## Заключение

В данном разделе были рассмотрены следующие вредные и опасные факторы:

- Шум [92,93];
- Микроклимат [95,97];
- Физические и нервно-психологические перегрузки [87, 88,89];
- Освещенность [103];
- Электробезопасность [98,99];
- Пожаровзрывобезопасность [100, 101].

На основании которых было вынесено суждение о том, что аудитория 222 11 корпуса ТПУ отнесена:

- По электробезопасности к классу 1 “помещения без повышенной опасности” [98];
- По пожаровзрывоопасности к категории В4 [100].

Помимо этого, в разделе описан перечень возможных чрезвычайных и аварийных ситуаций, меры их предотвращения и меры по ликвидации последствий АС и ЧС. Возможные чрезвычайные ситуации:

- Химическое отравление из – за неисправности вытяжного шкафа;
- Пожар;
- Удушение человека или взрыв вследствие разгерметизации газовых баллонов.

Таким образом, в рабочем помещении возможно безопасное проведение исследовательской деятельности с минимум рисков, которые тоже были рассмотрены.

.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самойлов О. Б., Усынин Г. Б., Бахметьев А. М. Безопасность ядерных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 280 с.
2. Murty, K., Charit, I., 2008. Structural materials for Gen-IV nuclear reactors: challenges and opportunities. *J. Nucl. Mater.* 383, 189–195. NEA/OECD, 2016. Implementation of Defence in depth at Nuclear power plants, NEA No. 7248.
3. Cheng, B., 2012. Fuel behaviour in severe accidents and Mo-alloy based cladding designs to improve accident tolerance, TopFuel 2012., Manchester, UK.
4. Hallstadius, L., Johnson, S., Lahoda, E., 2012. Cladding for high performance fuel. *Prog. Nucl. Energy* 57, 71–76.
5. Kim, W.J., Hwang, H.S., Park, J.Y., Ryu, W.S., 2003. Corrosion behaviors of sintered and chemically vapor deposited silicon carbide ceramics in water at 360 °C. *J. Mater. Sci. Lett.* 22, 581–584.
6. Terrani, K.A., Zinkle, S.J., Snead, L.L., 2014b. Advanced oxidation-resistant iron-based alloys for LWR fuel cladding. *J. Nucl. Mater.* 448, 420–435.
7. Pint, B.A., Unocic, K.A., Terrani, K.A., 2015b. Effect of steam on high temperature oxidation behaviour of alumina-forming alloys. *Mater. High Temp.* 32, 28–35. Rezaee, S., Rashed, G.R., Golozar, M., 2013. Electrochemical and oxidation behaviour.
8. Brachet, J., Idarraga-Trujillo, I., Flem, M. L., Saux, M. L., Vandenberghe, V., Urvoy, S., Rouesne, E., Guilbert, T., Toffolon-Masclat, C., Tupin, M., Phalippou, C., Lomello, F., Schuster, F., Billard, A., Velisa, G., Ducros, C., & Sanchette, F. (2019). Early studies on Cr-Coated Zircaloy-4 as enhanced accident tolerant nuclear fuel claddings for light water reactors. *Journal of Nuclear Materials*, 517, 268–285. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.02.018>
9. H.-G. Kim, I.-H. Kim, Y.-I. Jung, D.-J. Park, J.-Y. Park, Y.-H. Koo, Adhesion property and high-temperature oxidation behavior of Cr-coated Zircaloy-4 cladding tube prepared by 3D laser coating, *J. Nucl. Mater.* 465 (2015) 531–539.
10. Sears, V.F., 1992. Neutron scattering lengths and cross sections. *Neutron News* 3, 26–37.
11. F. Qi, Z. Liu, Q. Li, H. Yu, P. Chen, Y. Li, Y. Zhou, C. Ma, C. Tang, Y. Huang, B. Zhao, H. Lu, Pellet-cladding mechanical interaction analysis of Cr-coated Zircaloy cladding, *Nucl. Eng. Des.* 367 (2020) 110792.
12. D. Arias, J.J.Bo.A.P.D. Abriata, The Cr– Zr (Chromium-Zirconium) system, *Bull. Alloy Phase Diagr.* 7 (1986) 237–244.

13. Jianqiao Yang , Martin Steinbruck , Chongchong Tang , Mirco Gro " be , Junkai Liua , Jinming Zhang , Di Yun , Shuzhong Wang Review on chromium coated zirconium alloy accident tolerant fuel cladding // *Journal of Alloys and Compounds*. - 2022. - №895
14. Rafael Isayev, Pavel Dzhumaev Interaction of a diffusion barrier from the refractory metals with a zirconium alloy and a chrome coating of an accident tolerant fuel // *Nuclear Engineering and Design*. - 2023. - №407
15. M.S. Syrtanov , E.B. Kashkarov , A.V. Abdulmenova , D.V. Sidelev High-temperature oxidation of Zr–1Nb zirconium alloy with protective CrMo coating // *Surface Coatings Technology*. - 2022. - №439
16. Rezwani, A.A., Tonks, M.R., Short, M.P., 2020. Evaluations of the performance of multi metallic layered composite cladding for the light water reactor accident tolerant fuel. *J. Nucl. Mater.* 535, 152136
17. Marion, L.E., Ducros, C., Sanchette, F., 2018. Multilayer material resistant to oxidation in a nuclear environment.
18. Krishnan, R., & Asundi, M. (1981). Zirconium alloys in nuclear technology. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences Section C: Engineering Sciences*, 4(1), 41–56. <https://doi.org/10.1007/bf02843474>
19. Whitmarsh, C. L. (1962). REVIEW OF ZIRCALOY-2 AND ZIRCALOY-4 PROPERTIES RELEVANT TO N.S. SAVANNAH REACTOR DESIGN. <https://doi.org/10.2172/4827123>
20. Garde, A. M., Comstock, R. J., Pan, G., Baranwal, R., Hallstadius, L., Cook, T., & Carrera, F. J. (2010). Advanced Zirconium Alloy for PWR Application. *Journal of Astm International*, 7(9), 103030. <https://doi.org/10.1520/jai103030>
21. Novikov, V., Markelov, V., Gusev, A., Malgin, A., Kabanov, A., Pimenov, Y., 2011a. Some results on the properties investigations of zirconium alloys for WWER - 1000 fuel cladding. In: 9 International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, Bulgaria Nikulina, A. (2004). Zirconium alloys in nuclear power engineering. *Metal Science and Heat Treatment*, 46(11–12), 458–462. <https://doi.org/10.1007/s11041-005-0002-x>
22. Markov, D., Smirnov, V., Smirnov, A., Polenok, V.P.S., Strozhuik, A., 2005. Results of post-irradiation examination of VVER fuel assembly structural components made of E110 and E635 alloys. In: 6th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, pp. 19–23
23. Sabol, G.P., Kilp, G.R., Balfour, M.G., Roberts, E., 1989. Development of a cladding alloy for high burnup. ASTM STP 1023, pp. 227–244.

24. Sabol, G.P., Comstock, R.J., Weiner, R.A., Larouere, P., Stanutz, R.N., 1994. In-Reactor Corrosion Performance of ZIRLOTM and Zircaloy-4, Zirconium in the Nuclear Industry. In: Tenth International Symposium, ASTM International.
25. Sabol, G.P., 2005. ZIRLOTM – an alloy development success. *J. ASTM Int.* 2, 1–22.
26. Doriot, S., Gilbon, D., Béchade, J., Mathon, M. H., Legras, L., & Mardon, J. (2005). Microstructural Stability of M5<sup>TM</sup> Alloy Irradiated up to High Neutron Fluences. *Journal of Astm International*, 2(7), 12332. <https://doi.org/10.1520/jai12332>
27. Mardon, J., Garner, G., Hoffmann, P., 2010. M5 a breakthrough in Zr alloy, 2010 LWR Fuel Performance Meeting/Top-Fuel/WRFPM.
28. Mardon, J.-P., Charquet, D., Senevat, J., 2000. Influence of composition and fabrication process on out-of-pile and in-pile properties of M5 alloy, Zirconium in the Nuclear Industry. In: Twelfth International Symposium, ASTM International.
29. Gilbon, D., Soniak, A., Doriot, S., & Mardon, J. (2000). Irradiation Creep and Growth Behavior, and Microstructural Evolution of Advanced Zr-Base Alloys. In *ASTM International eBooks* (pp. 51–23). <https://doi.org/10.1520/stp14294s>
30. Brachet, J.C., Portier, L., Hivroz, J., Hamon, D., Guilbert, T., Bedel, T., Yvon, P., Mardon, J., Jacques, P., 2002. Influence of hydrogen content on the a = b phase transformation temperatures and on the thermal-mechanical behavior of Zy4, M4 (ZrSnFeV), and M5<sup>TM</sup> (ZrNbO) alloys during the first phase of LOCA transient. *Zirconium in the Nuclear Industry. ASTM STP 1423*, pp. 673–701
31. Le Saux, M., Vandenberghe, V., Crebier, P., Brachet, J., Gilbon, D., Mardon, J., Jacques, P., Cabrera, A., 2013. Influence of steam pressure on the high temperature oxidation and post-cooling mechanical properties of Zircaloy-4 and M5<sup>TM</sup> cladding (LOCA conditions). In: 17th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry.
32. Thomazet, J., Dalmais, A., Bossis, D., Godlewski, J., Blat, M., Miquet, A., 2005. The Corrosion of the Alloy M5<sup>TM</sup>: An Overview. In: Proceedings of IAEA Technical Committee Meeting on Behaviour of High Corrosion Resistance Zr-Based Alloys, Buenos Aires
33. Mardon, J.P., Dunn, B., 2007. Overview of the M5——— Alloy behavior under RIA and LOCA Conditions. In: Proceedings of the 2007 LWR Fuel Performance Meeting, San Francisco, USA.
34. Garat, V., Deuble, D., Dunn, B., Mardon, J.P., 2012. Quantification of the margins provided by M5 cladding in accidental conditions. In: Society, E.N. (Ed.), 2012 LWR Fuel performance Meeting Manchester, United Kingdom.

35. Pasamehmetoglu, K. O., Massara, S., Costa, D., Bragg-Sitton, S., Moatti, M., Kurata, M., Iracane, D., Ivanova, T. A., Bischoff, J., Delafoy, C., Brachet, J., Chauvin, J., Coulon-Picard, E., Forgeron, T., Gonnier, C., Lorrette, C., Bragg-Sitton, S., Cheng, B., Csontos, A. A., . . . Zvonarev, Y. (2018). State-of-the-Art Report on Light Water Reactor Accident-Tolerant Fuels. In *Nuclear Science*. Organization for Economic Cooperation and Development. <https://doi.org/10.1787/9789264308343-en>
36. Zhong, W., Mouche, P. A., Han, X., Heuser, B. J., Kumar, M. K., & Was, G. S. (2016). Performance of iron–chromium–aluminum alloy surface coatings on Zircaloy 2 under high-temperature steam and normal BWR operating conditions. *Journal of Nuclear Materials*, *470*, 327–338. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.11.037>
37. Kim, H., Yang, J., Kim, W., & Koo, Y. (2016a). Development Status of Accident-tolerant Fuel for Light Water Reactors in Korea. *Nuclear Engineering and Technology*, *48*(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.11.011>
38. Maloy, S. A., Weaver, J. H., El-Atwani, O., Wang, Y., & Mara, N. A. (2018). Microstructure and mechanical properties of FeCrAl alloys under heavy ion irradiations. *Journal of Nuclear Materials*, *503*, 250–262. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.03.002>
39. Gigax, J. G., Kennas, M., Kim, H., Maier, B. F., Yeom, H., Johnson, G. A., Sridharan, K., & Shao, L. (2019). Interface reactions and mechanical properties of FeCrAl-coated Zircaloy-4. *Journal of Nuclear Materials*, *519*, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.03.004>
40. Park, D. I., Kim, H., Jung, Y., Park, J. T., Yang, J., & Koo, Y. (2016). Behavior of an improved Zr fuel cladding with oxidation resistant coating under loss-of-coolant accident conditions. *Journal of Nuclear Materials*, *482*, 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2016.10.021>
41. Khatkhatay, F., Jiao, L., Jian, J., Zhang, W., Jiao, Z., Gan, J., Zhang, H., Zhang, X., & Wang, H. (2014). Superior corrosion resistance properties of TiN-based coatings on Zircaloy tubes in supercritical water. *Journal of Nuclear Materials*, *451*(1–3), 346–351. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.04.010>
42. Kashkarov, E., Nikitenkov, N. N., Sutygina, A. N., Bezmaternykh, A. S., Kudiiarov, V. N., Syrtanov, M. S., & Pryamushko, T. (2018). Hydrogenation behavior of Ti-implanted Zr-1Nb alloy with TiN films deposited using filtered vacuum arc and magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, *432*, 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.035>
43. Tunes, M. A., Da Silva, F. M. A., Camara, O., Schön, C. G., Sagás, J., Fontana, L., Donnelly, S. E., Greaves, G., & Edmondson, P. D. (2018). Energetic particle irradiation study of TiN coatings: are these films appropriate for accident tolerant fuels? *Journal of Nuclear Materials*, *512*, 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.10.013>

44. Xiao, W., Chen, H., Liu, X., Tang, D., Deng, H., Zou, S., Ren, Y., Zhou, X., & Lei, M. (2019). Thermal shock resistance of TiN-, Cr-, and TiN/Cr-coated zirconium alloy. *Journal of Nuclear Materials*, 526, 151777. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.151777>
45. Alat, E., Motta, A. T., Comstock, R. J., Partezana, J. M., & Wolfe, D. A. (2015). Ceramic coating for corrosion (c3) resistance of nuclear fuel cladding. *Surface & Coatings Technology*, 281, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.08.062>
46. Alat, E., Motta, A. T., Comstock, R. J., Partezana, J. M., & Wolfe, D. A. (2016). Multilayer (TiN, TiAlN) ceramic coatings for nuclear fuel cladding. *Journal of Nuclear Materials*, 478, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2016.05.021>
47. Alat, E., Brova, M. J., Younker, I., Motta, A. T., Fratoni, M., & Wolfe, D. M. (2019). Neutronic and mechanical evaluation of rare earth doped and undoped nitride-based coatings for accident tolerant fuels. *Journal of Nuclear Materials*, 518, 419–430. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.02.044>
48. Daub, K., Van Nieuwenhove, R., & Nordin, H. (2015). Investigation of the impact of coatings on corrosion and hydrogen uptake of Zircaloy-4. *Journal of Nuclear Materials*, 467, 260–270. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.09.041>
49. Van Nieuwenhove, R., Andersson, V., Balak, J., & Oberlander, B. (2018). In-Pile Testing of CrN, TiAlN, and AlCrN Coatings on Zircaloy Cladding in the Halden Reactor. In *ASTM International eBooks* (pp. 965–982). <https://doi.org/10.1520/stp159720160011>
50. Terrani, K. A., Pint, B. A., Parish, C. M., Silva, C. M., Snead, L. L., & Katoh, Y. (2014). Silicon Carbide Oxidation in Steam up to 2 MPa. *Journal of the American Ceramic Society*, 97(8), 2331–2352. <https://doi.org/10.1111/jace.13094>
51. Kashkarov, E., Syrtanov, M., Murashkina, T., Kurochkin, A. V., Shanenkova, Y., & Obrosova, A. (2019). Hydrogen Sorption Kinetics of SiC-Coated Zr-1Nb Alloy. *Coatings*, 9(1), 31. <https://doi.org/10.3390/coatings9010031>
52. Michau, A., Maury, F., Schuster, F., Nuta, I., Gazal, Y., Boichot, R., & Pons, M. (2018). Chromium Carbide Growth by Direct Liquid Injection Chemical Vapor Deposition in Long and Narrow Tubes, Experiments, Modeling and Simulation. *Coatings*, 8(6), 220. <https://doi.org/10.3390/coatings8060220>
53. Maier, B. F., Yeom, H., Johnson, G. A., Dabney, T., Walters, J., Xu, P., Romero, J., Shah, H. H., & Sridharan, K. (2019). Development of cold spray chromium coatings for improved accident tolerant zirconium-alloy cladding. *Journal of Nuclear Materials*, 519, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.03.039>

54. Wei, T., Zhang, R., Yang, H., Liu, H., Qiu, S., Wang, Y., Peinan, D., He, K., Hu, X., & Dong, C. (2019). Microstructure, corrosion resistance and oxidation behavior of Cr-coatings on Zircaloy-4 prepared by vacuum arc plasma deposition. *Corrosion Science*, *158*, 108077. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.06.029>
55. Chen, S., He, X., & Yuan, C. (2020). Recent studies on potential accident-tolerant fuel-cladding systems in light water reactors. *Nuclear Science and Techniques*, *31*(3). <https://doi.org/10.1007/s41365-020-0741-9>
56. Park, D. I., Jung, Y., Park, J. T., Lee, Y. H., Rha, S., & Kim, H. (2020). Microstructural characterization of accident tolerant fuel cladding with Cr–Al alloy coating layer after oxidation at 1200 °C in a steam environment. *Nuclear Engineering and Technology*, *52*(10), 2299–2305. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.04.005>
57. Grosse, M., Stueber, M., Seifert, H. J., & Steinbrück, M. (2017). Protective coatings on zirconium-based alloys as accident-tolerant fuel (ATF) claddings. *Corrosion Reviews*, *35*(3), 141–165. <https://doi.org/10.1515/correv-2017-0010>
58. Ivanova SV, Glagovsky EM, Nikonorov KY, Belugin II, Khazov IA. Methods to increase corrosion stability and wear resistance. In: Proceeding of LWR Fuel Performance Meeting/TopFuel, Charlotte, USA, September 15–19, 2013: 334–350
59. Idarraga-Trujillo I, Flem MLE, Brachet JC, Saux MLE, Hamon D, Muller S, Vandenberghe V, Tupin M, Papin E, Monsifrot E, Billard A, Schuster S. Assessment at CEA of coated nuclear fuel cladding for LWRs with increased margins in LOCA and beyond LOCA conditions. In: Proceeding of LWR Fuel Performance Meeting/ TopFuel, Charlotte, USA, September 15–19, 2013: 860–867.
60. Sidelev, D. V., Kashkarov, E., Syrtanov, M., & Krivobokov, V. P. (2019). Nickel-chromium (Ni–Cr) coatings deposited by magnetron sputtering for accident tolerant nuclear fuel claddings. *Surface & Coatings Technology*, *369*, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.057>
61. Opila, E. J., Jacobson, N. S., Myers, D. L., & Copland, E. (2006). Predicting oxide stability in high-temperature water vapor. *JOM*, *58*(1), 22–28. <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0063-3>
62. Chen, H., Wang, L., & Zhang, R. (2020). Application and Development Progress of Cr-Based Surface Coatings in Nuclear Fuel Element: I. Selection, Preparation, and Characteristics of Coating Materials. *Coatings*, *10*(9), 808. <https://doi.org/10.3390/coatings10090808>



63. Doyle, P., Raiman, S. S., Rebak, R. B., & Terrani, K. A. (2017). Characterization of the Hydrothermal Corrosion Behavior of Ceramics for Accident Tolerant Fuel Cladding. In *The minerals, metals & materials series*. Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68454-3\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68454-3_23)
64. J.C. Brachet, E. Rouesne, J. Ribis, T. Guilbert, S. Urvoy, G. Nony, C. Toffolon Masclet, M. Le Saux, N. Chaabane, H. Palancher, High temperature steam oxidation of chromium-coated zirconium-based alloys: kinetics and process, *Corros. Sci.* 167 (2020), 108537.
65. Bin, H., MA, Yan, J., Zhao, Y., Liu, T., Ren, Q., Yehong, L., Zuo, J., Liu, G., & Yao, M. (2021). Oxidation behavior of Cr-coated zirconium alloy cladding in high-temperature steam above 1200 °C. *Mater. Degrad.*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s41529-021-00155-8>
66. Han, X., Chen, C., Tan, Y., Feng, W., Peng, S., & Zhang, H. (2020). A systematic study of the oxidation behavior of Cr coatings on Zry4 substrates in high temperature steam environment. *Corrosion Science*, 174, 108826. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108826>
67. Krejci, J., Sevecek, M., Kabátová, J., & Namburi, H. K. (2018). EXPERIMENTAL BEHAVIOR OF CHROMIUM-BASED COATINGS. *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/publication/328066345\\_EXPERIMENTAL\\_BEHAVIOR\\_OF\\_CHROMIUM-BASED\\_COATINGS](https://www.researchgate.net/publication/328066345_EXPERIMENTAL_BEHAVIOR_OF_CHROMIUM-BASED_COATINGS)
68. Wang, Y., Zhou, W., Wen, Q., Ruan, X., Luo, F., Bai, G., Qing, Y., Zhu, D., Huang, Z., Zhang, Y., Liu, T., & Li, R. (2018). Behavior of plasma sprayed Cr coatings and FeCrAl coatings on Zr fuel cladding under loss-of-coolant accident conditions. *Surface & Coatings Technology*, 344, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.016>
69. Zhong, W., Mouche, P. A., Han, X., Heuser, B. J., Kumar, M. K., & Was, G. S. (2016b). Performance of iron–chromium–aluminum alloy surface coatings on Zircaloy 2 under high-temperature steam and normal BWR operating conditions. *Journal of Nuclear Materials*, 470, 327–338. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.11.037>
70. Gigax, J. G., Kennas, M., Kim, H., Maier, B. F., Yeom, H., Johnson, G. A., Sridharan, K., & Shao, L. (2019b). Interface reactions and mechanical properties of FeCrAl-coated Zircaloy-4. *Journal of Nuclear Materials*, 519, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.03.004>
71. Bhanumurthy, K., Kale, G., & Khera, S. K. (1991). Reaction diffusion in the zirconium-iron system. *Journal of Nuclear Materials*, 185(2), 208–213. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(91\)90337-7](https://doi.org/10.1016/0022-3115(91)90337-7)
72. Wang, X., Wei, K., Guan, H., Xu, C., Xue, W., Zhang, Y., & Wang, R. (2021). High temperature oxidation of Zr 1Nb alloy with plasma electrolytic oxidation coating in 900–1200 °C



steam environment. *Surface & Coatings Technology*, 407, 126768. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126768>

73. Han, X., Wang, Y., Peng, S., & Zhang, H. (2019). Oxidation behavior of FeCrAl coated Zry-4 under high temperature steam environment. *Corrosion Science*, 149, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.01.004>

74. Krejčí, J., Kabátová, J., Manoch, F., Kočí, J., Cvrček, L., Málek, J., Krum, S., Šutta, P., Bublíková, P., Halodova, P., Namburi, H. K., & Ševeček, M. (2020). Development and testing of multicomponent fuel cladding with enhanced accidental performance. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(3), 597–609. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.08.015>

75. Maier, B. F., Garcia-Diaz, B. L., Hauch, B., Olson, L. N., Sindelar, R. L., & Sridharan, K. (2015). Cold spray deposition of Ti<sub>2</sub>AlC coatings for improved nuclear fuel cladding. *Journal of Nuclear Materials*, 466, 712–717. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.06.028>

76. Predel, B., n.d. Cr-Zr (Chromium-Zirconium): Datasheet from Landolt-Bornstein " - Group IV Physical Chemistry · Volume 5D: "Cr-Cs – Cu-Zr" in SpringerMaterials ([https://doi.org/10.1007/10086090\\_1030](https://doi.org/10.1007/10086090_1030)). [https://doi.org/10.1007/10086090\\_1030](https://doi.org/10.1007/10086090_1030).

77. Yeom, H., Maier, B. F., Johnson, G. A., Dabney, T., Walters, J., & Sridharan, K. (2018). Development of cold spray process for oxidation-resistant FeCrAl and Mo diffusion barrier coatings on optimized ZIRLO™. *Journal of Nuclear Materials*, 507, 306–315. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.05.014>

78. Puente, A. E. P. Y., Dickson, J. L., Keiser, D. D., & Sohn, Y. S. (2014). Investigation of interdiffusion behavior in the Mo–Zr binary system via diffusion couple studies. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 43, 317–321. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.12.017>

79. Dryepontdt, S. N., Unocic, K. A., Hoelzer, D. T., Massey, C. P., & Pint, B. A. (2018). Development of low-Cr ODS FeCrAl alloys for accident-tolerant fuel cladding. *Journal of Nuclear Materials*, 501, 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.12.035>

80. De Farias Azevedo, C. R. (2011). Selection of fuel cladding material for nuclear fission reactors. *Engineering Failure Analysis*, 18(8), 1943–1962. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.06.010>

81. Liu, J., Hao, Z., Cui, Z., Ma, D., Lu, J., Cui, Y., Li, C., Liu, W., Xie, S., Huang, P., Bai, G., & Yun, D. (2021). Investigation of the oxidation mechanisms of superlattice Cr–CrN/TiSiN–Cr multilayer coatings on Zircaloy substrates under high-temperature steam atmospheres. *Corrosion Science*, 192, 109782. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109782>

82. Sidelev, D. V., Ruchkin, S., Syrtanov, M. S., Kashkarov, E., Shelepov, I., Malgin, A., Polunin, K. K., Stoykov, K., & Mokrushin, A. A. (2022). Protective Cr coatings with CrN/Cr multilayers for zirconium fuel claddings. *Surface & Coatings Technology*, 433, 128131. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128131>
83. Li, Z., Liu, C., Chen, Q., Yang, J., Liu, J., Yang, H., Zhang, W., Zhang, R., He, L., Long, J., & Chang, H. (2021). Microstructure, high-temperature corrosion and steam oxidation properties of Cr/CrN multilayer coatings prepared by magnetron sputtering. *Corrosion Science*, 191, 109755. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109755>
84. Yang, J., Shang, L., Sun, J., Bai, S., Wang, S., Liu, J., Yun, D., & Ma, D. (2023). Restraining the Cr-Zr interdiffusion of Cr-coated Zr alloys in high temperature environment: A Cr/CrN/Cr coating approach. *Corrosion Science*, 214, 111015. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111015>
85. ГОСТ 12.0.004-2015 ССБТ. Организация обучения безопасности труда. Общие положения.
86. Трудовой Кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. От. 01.04.2019).
87. Федеральный закон «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний» от 24.07.1998 N 165-ФЗ (последняя редакция).
88. Федеральный закон «Об основах обязательного социального страхования» от 16.07.1999 N 165-ФЗ (последняя редакция).
89. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года).
90. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
91. Светильник ALS.OPL 418 HF ES1 [Электронный ресурс] // Интернет-магазин «ЭТМ» URL: <https://www.etm.ru/cat/nn/2423476> (Дата обращения 10.04.2023).
92. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Санитарные нормы. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
93. ГОСТ 12.4.318-2019 (ISO 4869-3:2007). Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты органа слуха. Упрощенный метод измерения акустической эффективности противошумных наушников для оценки качества.

94. Беляков Г. И. Охрана труда и техника безопасности [Электронный ресурс]: учебник для прикладного бакалавриата/ГИ Беляков.—3-е изд., перераб. и доп.—Мультимедиа ресурсы (10 директорий; 100 файлов; 740МВ).—Москва: Юрайт, 2016.—1 Мультимедиа CD-ROM.—Бакалавр. Прикладной курс.— Электронные учебники издательства» Юрайт».— Электронная копия печатного издания.—Системные требования: Pentium 100 MHz, 16 Mb RAM //М.: Юрайт.– 2017. – Т. 404.
95. СанПин 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
96. Приточная установка ФЬОРДИ ПРО ВПУ-300 ЕС/2,2-220/1-BLG [Электронный ресурс] // Интернет-магазин «Благовест» URL: [https://blagovest.ru/catalog/ventilyatsionnye\\_ustanovki/pritochnye\\_ustanovki/fordi\\_vpu/pritochnaya\\_ustanovka\\_fordi\\_pro\\_vpu\\_300\\_es\\_2\\_2\\_220\\_1\\_blg/](https://blagovest.ru/catalog/ventilyatsionnye_ustanovki/pritochnye_ustanovki/fordi_vpu/pritochnaya_ustanovka_fordi_pro_vpu_300_es_2_2_220_1_blg/).
97. СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование».
98. ГОСТ 12.1.030 – 81. ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
99. ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
100. СНиП 21-01-97 Пожарная безопасность зданий и сооружений.
101. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.
102. Федеральный закон от 30.12.2008 N 309-ФЗ, от 01.04.2020 N 98-ФЗ)
103. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Инструкция по охране труда при хранении и эксплуатации газовых баллонов [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://docs.cntd.ru/document/1200039245> (Дата обращения 10.04.2023)
104. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.