



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 03.03.02 Физика

ООП/ОПОП Физика

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

Тема работы
<b>Коррозионная стойкость сварных соединений из циркониевого сплава Э110 с защитным хромовым покрытием</b>

УДК 621.793:669.296:669.26:620.193

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б91	Гусев Кирилл Сергеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий ЛПМОБВЭ	Кашкаров Егор Борисович	к.ф.-м.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Былкова Татьяна Васильевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Склярова Е.А.	к.п.н., доцент		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП/ОПОП

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
<b>УК(У)-1</b>	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.
<b>УК(У)-2</b>	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений.
<b>УК(У)-3</b>	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовать свою роль в команде.
<b>УК(У)-4</b>	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке.
<b>УК(У)-5</b>	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах.
<b>УК(У)-6</b>	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни.
<b>УК(У)-7</b>	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
<b>УК(У)-8</b>	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций.
<b>УК(У)-9</b>	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи.
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
<b>ОПК(У)-1</b>	Способен применять естественно-научные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в инженерной деятельности, связанной с проектированием и конструированием, технологиями производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов
<b>ОПК(У)-2</b>	Способен осуществлять профессиональную деятельность с учетом экономических, экологических, интеллектуально правовых, социальных и других ограничений на всех этапах жизненного цикла технических объектов и процессов
<b>ОПК(У)-3</b>	Способен использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач.
<b>ОПК(У)-4</b>	Способен понимать сущность и значение информации в развитии современного общества, осознавать опасность и угрозу, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности.
<b>ОПК(У)-5</b>	Способен использовать основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации и навыки работы с компьютером как со средством управления информацией.
<b>ОПК(У)-6</b>	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением

	информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности.
<b>ОПК(У)-7</b>	Способен использовать в своей профессиональной деятельности знание иностранного языка.
<b>ОПК(У)-8</b>	Способен критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости направление своей деятельности.
<b>ОПК(У)-9</b>	Способен получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах и других малых коллективах исполнителей.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
<b>ПК(У)-1</b>	Способностью использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин
<b>ПК(У)-2</b>	Способностью проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта
<b>ПК(У)-3</b>	Готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований
<b>ПК(У)-4</b>	Способность применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин
<b>ПК(У)-5</b>	Способность пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в избранной области физических исследований
<b>ПК(У)-6</b>	Способность понимать и использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований
<b>ПК(У)-7</b>	Способность участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме
<b>ПК(У)-8</b>	Способность понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования



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

ООП/ОПОП 03.03.02 Физика

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП/ОПОП

\_\_\_\_\_ Склярова Е.А.  
(Подпись) (Дата) (ФИО)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

Обучающийся:

Группа	ФИО
0Б91	Гусев Кирилл Сергеевич

Тема работы:

<b>Коррозионная стойкость сварных соединений из циркониевого сплава Э110 с защитным хромовым покрытием</b>	
<i>Утверждена приказом директора (дата, номер)</i>	

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b> <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 функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<p>Объект исследования: лазерно-лучевые сварные соединения из циркониевого сплава Э110 с хромовым покрытием</p> <p>Методы исследования: высокотемпературная печь ATS 3210, сканирующий электронный микроскоп MIRA3, оптический микроскоп AXIOVERT 200MAT, дифрактометр XRD-7000S, автоматизированная установка Gas Reaction Controller (GRC), твердомер Pruftechnik KB-30S</p>
<p><b>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке</b> <i>(аналитический обзор литературных источников с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Литературный обзор</li> <li>2. Подготовка образцов</li> <li>3. Нанесение покрытий</li> <li>4. Проведение окисления и наводороживания образцов</li> <li>5. Проведение структурно-фазового анализа</li> <li>6. Проведение механических испытаний</li> <li>7. Анализ данных</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Былкова Татьяна Васильевна
Социальная ответственность	Антоневич Ольга Алексеевна

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

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Заведующий ЛПМОБВЭ	Кашкаров Е.Б.	к. ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0Б91	Гусев Кирилл Сергеевич		



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 (ООП/ОПОП) 03.03.02 Физика

Уровень образования бакалавриат

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 2022/2023 учебного года)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Обучающийся:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0Б91	Гусев Кирилл Сергеевич

Тема работы:

<b>Коррозионная стойкость сварных соединений из циркониевого сплава Э110 с защитным хромовым покрытием</b>
--

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
21.11.22	Аналитический обзор литературы	20
11.02.22	Проведение экспериментальной части исследования	25
26.03.22	Анализ данных	30
29.05.23	Социальная ответственность	10
29.05.23	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
30.05.23	Заключение	5

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий ЛПМОБВЭ	Кашкаров К.Б.	к. ф.-м.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП/ОПОП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Склярова Е.А.	к.п.н., доцент		

**Обучающийся**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б91	Гусев Кирилл Сергеевич		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 108 с., 23 рис., 23 табл., 153 источников.

Ключевые слова: лазерно-лучевые швы, циркониевый сплав Э110, авария с потерей теплоносителя, хромовое покрытие, высокотемпературное окисление, наводороживание.

Объектом исследования являются лазерно-лучевые сварные соединения из циркониевого сплава Э110 с хромовым покрытием.

Цель работы: установление закономерностей коррозии и механических свойств лазерно-лучевых сварных соединений из циркониевого сплава Э110 с хромовым покрытием.

В ходе работы было нанесено хромовое покрытие на лазерно-лучевые швы из циркониевого сплава Э110 методом магнетронного распыления, проведены испытания образцов на высокотемпературное окисление на воздухе при температуре 1100 °С и на наводороживание в диапазоне температур 360-900 °С, исследованы структурно-фазовое состояние и механические свойства образцов до и после высокотемпературных испытаний.

В результате работы показано, что покрытие из хрома снижает диффузию кислорода вглубь лазерно-лучевых сварных соединений из циркониевого сплава Э110 и является защитным вплоть до 90 мин высокотемпературного окисления. Осаждение покрытий позволяет снизить энергию активации и скорость сорбции водорода при наводороживании, что в значительной мере снижает количество гидридов в образцах при температуре до 450 °С. При температуре 900 °С концентрация гидридов в образцах повышается ввиду снижения скорости десорбции водорода защитным покрытием при медленном охлаждении образцов.

## Оглавление

Введение.....	11
Глава 1. Литературный обзор по защитным покрытиям .....	14
1.1 Циркониевые сплавы в атомной промышленности.....	14
1.2 Сварные соединения .....	19
1.3 Защитные покрытия.....	25
Глава 2. Материалы и методы.....	30
2.1 Подготовка образцов .....	30
2.2 Осаждение покрытий.....	31
2.3 Высокотемпературное окисление и характеристика образцов .....	32
2.4 Наводороживание образцов .....	32
2.5 Методы исследования структурно-фазового состояния образцов .....	32
2.6 Механические испытания образцов .....	33
Глава 3. Экспериментальная часть.....	34
3.1 Высокотемпературное окисление лазерно-лучевых сварных соединений из сплава Э110 с хромовым покрытием.....	34
3.1.1 Коррозионный привес образцов .....	34
3.1.2 Микроструктура поперечного сечения образцов .....	35
3.1.3 Механические свойства образцов .....	38
3.1.4 Обсуждение результатов по высокотемпературному окислению лазерно-лучевых швов.....	41
3.2 Наводороживание лазерно-лучевых сварных соединений из сплава Э110 с хромовым покрытием .....	44
3.2.1 Кинетика наводороживания образцов .....	44
3.2.2 Фазовый состав наводороженных образцов.....	46
3.2.3 Микроструктура наводороженных образцов .....	48
3.2.4 Механические свойства образцов после наводороживания.....	51
3.2.5 Обсуждение результатов по наводороживанию лазерно-лучевых швов .....	53



Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	59
4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	59
4.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований .....	61
4.3 Планирование научно-исследовательских работ.....	62
4.4 Определение трудоемкости выполнения работ .....	63
4.5Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой эффективности исследования .....	70
Глава 5. Социальная ответственность.....	74
5.1 Введение.....	74
5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	74
5.2.1 Правовые норма трудового законодательства.....	74
5.2.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны .....	75
5.2.3 Методические рекомендации при работе в аналитических лабораториях.....	76
5.3 Производственная безопасность .....	77
5.3.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.....	77
5.3.2 Производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой или низкой температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги тканей организма человека .....	78
5.3.3 Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий .....	79

5.3.4	Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего .....	80
5.3.5	Производственные факторы связанные с акустическим колебаниями в производственной среде .....	81
5.3.6	Производственные факторы, связанные с отсутствием или недостатком необходимого искусственного освещения.....	83
5.3.7	Опасные производственные факторы, связанные с силами и энергией механического движения .....	84
5.4	Экологическая безопасность.....	85
5.5	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	87
5.5.1	Анализ возможных ЧС .....	87
5.5.2	Наиболее вероятная ЧС .....	88
5.6	Заключение по разделу «Социальная ответственность» .....	89
	Заключение .....	91
	Список литературы .....	93

## Введение

Циркониевые сплавы с легирующими элементами такими как Sn или Nb используются в качестве основного конструкционного материала для тепловыделяющих сборок (ТВС), в которые входят тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) и дистанцирующие решётки, в водо-водяных реакторах (ВВЭР) из-за их соответствующих механических свойств, хорошей радиационной и коррозионной стойкости при нормальных условиях эксплуатации ( $\sim 360$  °C и 18,6 МПа) [1]. Однако возможные аварии могут привести к повышению температуры активной зоны реактора, что приведет к ускоренному окислению циркониевых сплавов и последующему водородному охрупчиванию, поскольку сплавы циркония могут быстро взаимодействовать с водяным паром при температурах выше 861 °C. При данной температуре начинается происходить самоподдерживающаяся пароциркониевая реакция с выделением взрывоопасного водорода. Это может привести к разрушению ТВЭЛов и дистанцирующих решёток.

На сегодняшний день продолжают проводиться исследования материалов-кандидатов для водо-водяных реакторов [2-7]. Основное внимание уделяется их устойчивости к окислению в аварийных условиях, например, при аварии с потерей теплоносителя, как это произошло на АЭС Фукусима [8-10]. Новый тип ядерного топлива, так называемое толерантное топливо, должно обладать повышенной устойчивостью к высокотемпературному окислению и водородному охрупчиванию. Краткосрочная стратегия развития толерантного топлива заключается в нанесении защитного покрытия на ТВС из циркониевых сплавов. Многочисленные исследования показали, что нанесение защитных Cr-покрытий на циркониевые сплавы повышает стойкость к высокотемпературному окислению [11-23].

Однако механические свойства циркониевых сплавов могут ухудшаться в следствие водородного охрупчивания и их последующего растрескивания из-за образования гидридов даже при нормальных условиях эксплуатации

[24,25]. Водород может образовываться в ходе радиолиза воды и окисления циркониевых сплавов, а затем диффундировать в циркониевые сплавы. Образование гидридов может значительно ухудшить пластичность циркониевых сплавов даже в том случае, если гидриды распределены однородно и ориентированы по окружности или в плоскостном направлениях [26]. Содержание водорода также сильно влияет на микроструктурные изменения и механическое поведение предшествующей  $\beta$ -Zr фазы, образующейся при охлаждении после высоких температур [27-29]. Большой интерес представляет поведение циркониевых сплавов с защитными покрытиями при наводороживании, поскольку покрытия могут влиять на условия наводороживания и тем самым влиять на содержание водорода и распределение гидридов.

Однако особое внимание должно быть уделено защите элементов, имеющих сварные соединения, поскольку сварка применяется, в частности, для изготовления дистанцирующих решёток [30]. Несмотря на то, что было проведено большое количество исследований по определению соответствующих параметров сварки циркониевых сплавов [31-34], структурные свойства сварных соединений будут отличаться. Хорошо известно [35], что сварной материал имеет три типичные области, такие как сварной шов (СШ), зоны термического воздействия (ЗТВ) и объемный сплав (ОС). Быстрое затвердевание сварных соединений может привести к формированию столбчатой микроструктуры, что приводит к снижению коррозионной стойкости сварных швов [31,36]. Коррозионная стойкость сварных швов из циркониевых сплавов настолько низка, что существует необходимость наносить защитное покрытие на их поверхность.

Влияние осаждения хромового покрытия на стойкость при высокотемпературном окислении (при 1100 °С) сварных швов, выполненных методом лазерно-лучевой сварки из циркониевого сплава, было ранее изучено в [12], где было установлено, что микроструктура сварного сплава не изменяется при осаждении хромового покрытия методом магнетронного

распыления, а стойкость к высокотемпературному окислению сварных швов может быть повышена путём нанесения хромового покрытия толщиной 8 мкм.

Однако данные испытания отличались небольшой продолжительностью испытаний, которые составила 2-10 мин. Поскольку осаждение хромового покрытия рассматривается как способ вызвать дополнительное время для предотвращения разрушения ТВС при температурах 1200-1300 °С [11], то коррозионную стойкость сварных швов с хромовым покрытием необходимо изучать при большей продолжительности испытаний.

Также, принимая во внимание влияние сварки на характеристики циркониевых сплавов, необходимо оценить поведение при наводороживании сварных швов с хромовым покрытием в широком диапазоне температур, включая нормальную эксплуатацию (360 °С) и аварийные условия (450 и 900 °С). Кроме того, необходимо оценить механические свойства сварных швов из циркониевого сплава после высокотемпературного окисления и наводороживания, так как это важно для сохранения целостности ТВС в аварийных условиях.

Таким образом, целью данной работы является исследование коррозионной стойкости и механических свойств лазерно-лучевых сварных соединений из циркониевого сплава Э110 с хромовым покрытием.

## **Глава 1. Литературный обзор по защитным покрытиям**

### **1.1 Циркониевые сплавы в атомной промышленности**

Среди различных источников энергии ядерная энергия является наиболее эффективной для замены ископаемого топлива и сокращения выбросов углекислого газа во всем мире. Для развития атомной энергетики и достижения сокращения выбросов углекислого газа в будущем, поддержание безопасной работы ядерных реакторов становится первоочередной задачей.

Эпоха использования циркониевых сплавов в атомной промышленности продолжается с середины 1940-х годов. Металлические материалы, используемые в активных зонах реакторов в качестве оболочки ядерного топлива, должны отвечать определённым требованиям. Они предотвращают контакт теплоносителя (водяного пара) с топливом (диоксид урана), а также предотвращают выделение продуктов деления, образующихся во время облучения. Поэтому такие материалы должны обладать повышенной устойчивостью к коррозии, соответствующими механическими свойствами, хорошей теплопроводностью и низким сечением захвата тепловых нейтронов [37]. Сплавы на основе циркония активно используются в атомной энергетике в качестве топливной оболочки в ВВЭР [38-42].

Ко второй половине 1950-х годов сформировались и применялись две основные группы циркониевых сплавов. Первая – это сплавы системы Zr-Sn (Zircaloy-1, Zircaloy-2 и Zircaloy-3) в США и странах Европы, вторая – сплавы системы Zr-Nb в Советском Союзе [43]. Цирконий ценится за свои соответствующие механические свойства, низкое значение сечения захвата тепловых нейтронов (~0,2 барн), высокой стойкостью к облучению и окислению [44-47] при нормальных условиях эксплуатации реакторов с водой под давлением (~360 °C, 18,6 МПа) [48,49].

В настоящее время большинство циркониевых сплавов для атомной промышленности являются усовершенствованными версиями систем Zr-Sn (Zircaloy-2 и Zircaloy-4) и Zr-Nb (E110, E125, M5, Zr-2.5Nb), либо

многокомпонентными (E635, ZIRLO, NDA, MDA и др.) [48]. Химические составы приведены в таблице 1. Среди них можно выделить ZIRLO с типичным химическим составом (% по массе): 0,5-2 ниобия, 0,7-1,5 олова, 0,07-0,14 железа и 0,03-0,14 по меньшей мере никеля и хрома, а остальное – цирконий [50-51].

Циркониевые сплавы используются в качестве конструкционных материалов для ТВЭЛов и дистанцирующих решеток, объединенных в ТВС. Их микроструктура и термические свойства хорошо изучены и обобщены в многочисленных статьях, монографиях и справочниках [1,52-59].

**Таблица 1** – Базовый химический состав коммерческих циркониевых сплавов для ядерной энергетики.

Сплав	Состав, масс. % (Zr – основа)					
	Ниобий	Олово	Железо	Кислород	Хром	Никель
Zircaloy-2	–	1,2-1,7	0,07-0,20	0,09-0,16	0,05-0,15	0,03-0,08
Zircaloy-4	–	1,2-1,7	0,18-0,24	0,09-0,16	0,07-0,13	–
E110	0,9-1,1	–	–	0,06	–	–
M5	0,9-1,2	–	–	0,125	–	–
E125	2,4-2,7	–	–	0,05	–	–
Zr-2,5Nb	2,4-2,8	–	–	0,125	–	–
E635	0,69-1,10	1,1-1,3	0,30-0,45	0,08	–	–
ZIRLO	1,0-1,2	1,0-1,1	0,09-0,10	0,15	–	–
NDA	0,1	1,0	0,27	0,09-0,13	0,16	–
MDA	0,45-0,55	0,7-0,9	0,18-0,24	0,09-0,13	0,07-0,13	–

Кислород хорошо растворим в  $\alpha$ -фазе и стабилизируется при высокой температуре (рисунок 1).

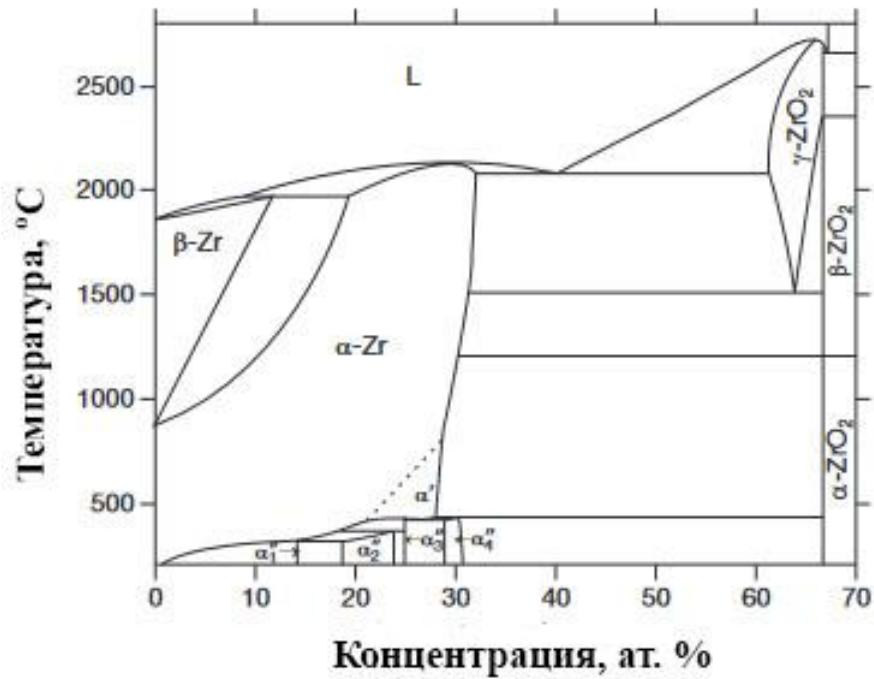


Рисунок 1 – Бинарная фазовая диаграмма Zr-O

Использование кислорода для упрочнения материалов редко встречается в металлургии по сравнению с использованием азота. Однако использование азота сильно бы ухудшило коррозионную стойкость, поэтому азот стараются максимально удалить из материала. Целью добавления кислорода является повышение предела текучести без ухудшения коррозионной стойкости. Обычно его добавляют в концентрации в диапазоне 600-1200 ppm. Высокие концентрации кислорода (> 2000 ppm) снижают пластичность сплавов, поэтому добавлять выше 1500 ppm не рекомендуется. Кроме того, атомы кислорода взаимодействуют с дислокациями при умеренных температурах, что приводит к упрочнению в температурных диапазонах, зависящих от скорости деформации [58]. В системе Zr-O единственным стабильным оксидом является  $ZrO_2$ . Моноклинная фаза стабильна при температурах примерно до 1200 °C, выше которых она переходит в тетрагональную структуру.

Олово имеет максимальную растворимость в гексагонально-плотно упакованной структуре циркония 9 масс. % при 940 °C (рисунок 2).



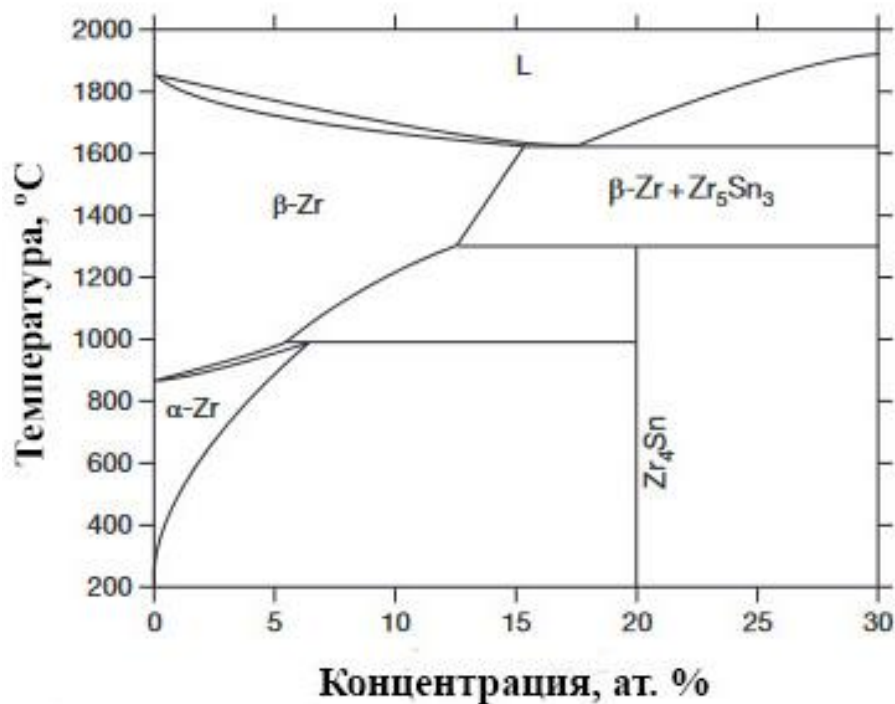
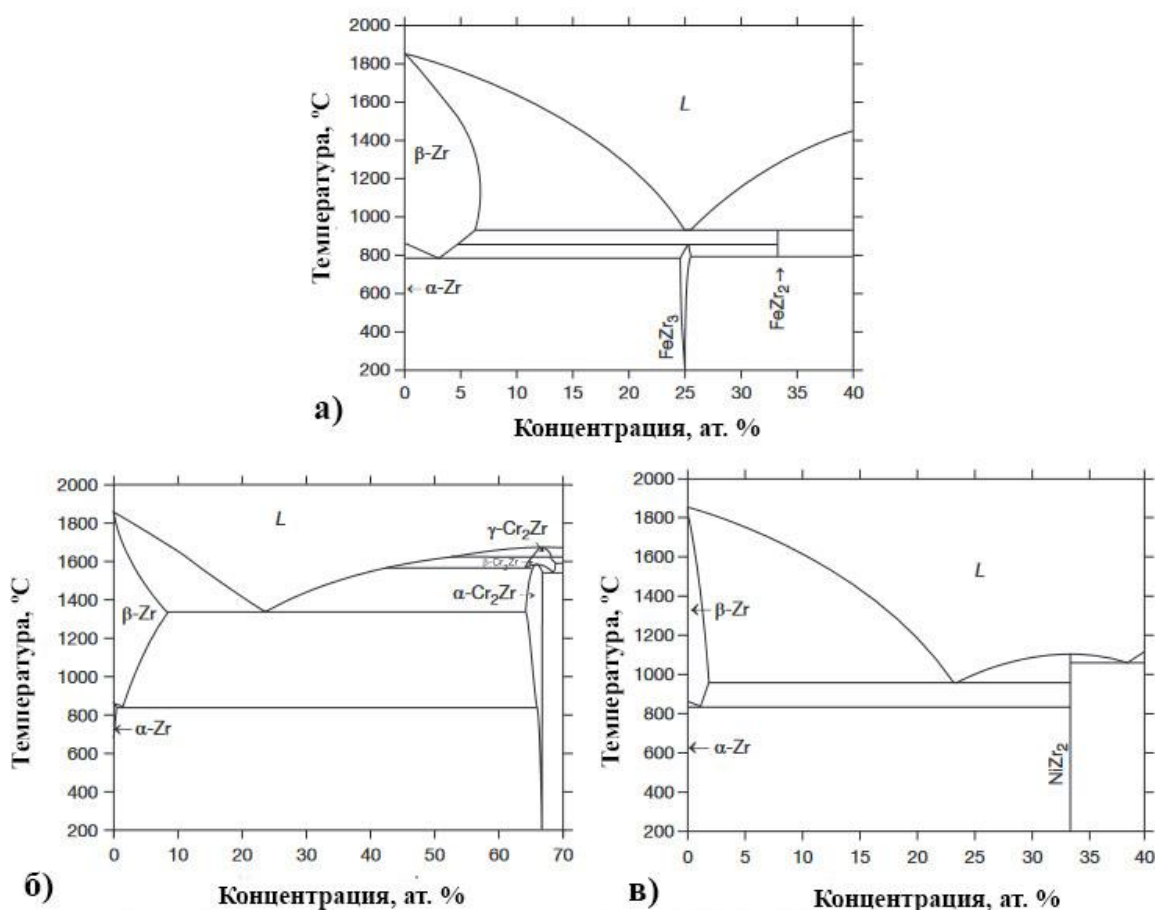


Рисунок 2 – Бинарная фазовая диаграмма Zr-Sn

Первоначально олово добавлялось в концентрации 1,2-1,7% для повышения коррозионной стойкости, особенно для смягчения вредного воздействия азота. Количество олова, необходимое для компенсации влияния 300 ppm азота, составляет около 1 масс. %. Однако в цирконии, не содержащем азота, было замечено, что олово ухудшает коррозионную стойкость. Поэтому сегодня наблюдается тенденция по снижению олова, но лишь незначительном, чтобы сохранить свойства ползучести.

Железо, хром и никель при их обычных концентрациях полностью растворимы в β-фазе (рисунок 3).



а – Zr-Fe; б – Zr-Cr; в – Zr-Ni

Рисунок 3 – Бинарные фазовые диаграммы

Однако в  $\alpha$ -фазе их растворимость очень низка: около 120 ppm для железа и 200 ppm для хрома при температуре максимальной растворимости [59]. В чистых бинарных системах получаются различные фазы:  $ZrFe_2$  и  $ZrCr_2$  – фазы Лавеса с кубической или гексагональной структурой, а  $Zr_2Ni$  – фаза Цинтля с объёмноцентрированной тетрагональной структурой.

Сплавы Zr-Nb были разработаны в Канаде, России и США, с первоначальной высокой концентрацией Nb (до 4%). Для ВВЭР они показали плохое поведение, и разработка сплавов Zr-Nb была вскоре прекращена в США. Zr-2,5Nb оказался вполне удовлетворительным благодаря низкой сорбции водорода во время эксплуатации, и инженерная оптимизация этого сплава была продолжена в Канаде и России. Zr-1Nb был разработан в этих

странах и показывал хорошие результаты. Возобновление интереса к таким сплавам в западном мире в 1990-х годах привело к разработке сплава Zr-1Nb с контролируемыми добавками железа и серы. Сплав M5 также используется в реакторах ВВЭР, обладая превосходной коррозионной стойкостью, по сравнению с прежним Zry-4 [60].

Однако, авария на АЭС «Фукусима» показала, что циркониевые сплавы имеют риск аварии, связанный со взрывом водорода из-за их сильного окисления и выделения водорода при пароциркониевой реакции [14].

С тех пор была разработана концепция толерантного топлива, направленная на повышение коррозионной стойкости циркониевых сплавов, снижение роста температуры в активной зоне, снижение выделения водорода и продление времени на устранение последствий аварии [61].

## **1.2 Сварные соединения**

Сварка является одной из наиболее важных процедур при производстве ТВС [52]. На сегодняшний день в этой области разработано мало стандартов [62,63] и руководств, которые содержат лишь общие требования к процессам сварки, расходным материалам и методам контроля качества. Однако функциональные свойства (механические характеристики, а также стойкость к нейтронному излучению, поглощению водорода, замедленному гидридному растрескиванию, коррозии, коррозионному растрескиванию и высокотемпературному окислению) СШ и ЗТВ часто ниже, чем у ОС.

Кроме того, производственные несплошности в сварных швах циркониевых сплавов, не обнаруженные методами неразрушающего контроля, в некоторых случаях приводят к преждевременному выходу из строя ТВС [30]. Такие аварии происходят и по настоящее время и включают в себя в основном дефекты торцевых заглушек и сварки. По данным Всемирной ядерной ассоциации [30], в настоящее время в эксплуатации находится около 440 ядерных реакторов и еще около 50 реакторов находятся в стадии строительства. Например, активная зона реактора ВВЭР мощностью 1100 МВт

может содержать 193 ТВС, состоящие из более чем 50 000 топливных стержней. Учитывая типичные конструкции ТВС, каждая из них включает порядка сотен тысяч сварных соединений. Типичный жизненный цикл ТВЭЛов составляет около нескольких лет, после чего они подлежат замене. Несмотря на то, что ядерная промышленность добилась значительных улучшений, снизив количество аварий примерно на 60% за 20 лет до 2006 года – около 14 утечек на миллион загруженных стержней. По состоянию на начало 2014 года 97% американских атомных электростанций не имели аварий, по сравнению с 71% в 2007 году [30], однако количество аварий все еще не равно нулю, поскольку ежегодный показатель аварий в США составляет примерно один на миллион (т.е. пять стержней в год) [30].

Как было упомянуто выше, циркониевые сплавы используются в качестве основного конструкционного материала для ТВЭЛов и дистанционирующих решеток, объединенных в ТВС. Их конструкция и размеры определяются типом ядерных реакторов и подробно описаны в работах [64-66]. Некоторые примеры показаны на рисунке 4.

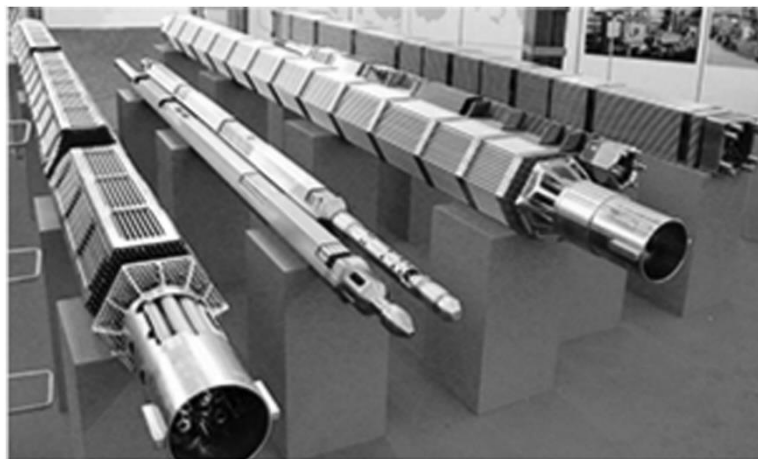


Рисунок 4 – Различные типы ТВС для ядерных реакторов.

Сварка применяется для соединения торцевых заглушек с трубками ТВЭЛов с обеих сторон, деталей дистанцирующих решеток и всех частей ТВС в единую конструкцию. Иногда также используются трубки с продольными сварными швами. Порядок сварки определяется производственными

размерами и конструкцией соединений, а также требованиями к качеству и экономической целесообразности. Две типичные конструкции сварных соединений и места сварки показаны на рисунке 5. В большинстве случаев применяется электронно-лучевая сварка и контактно-стыковая сварка, хотя иногда используется газовая дуговая сварка вольфрамовым электродом.

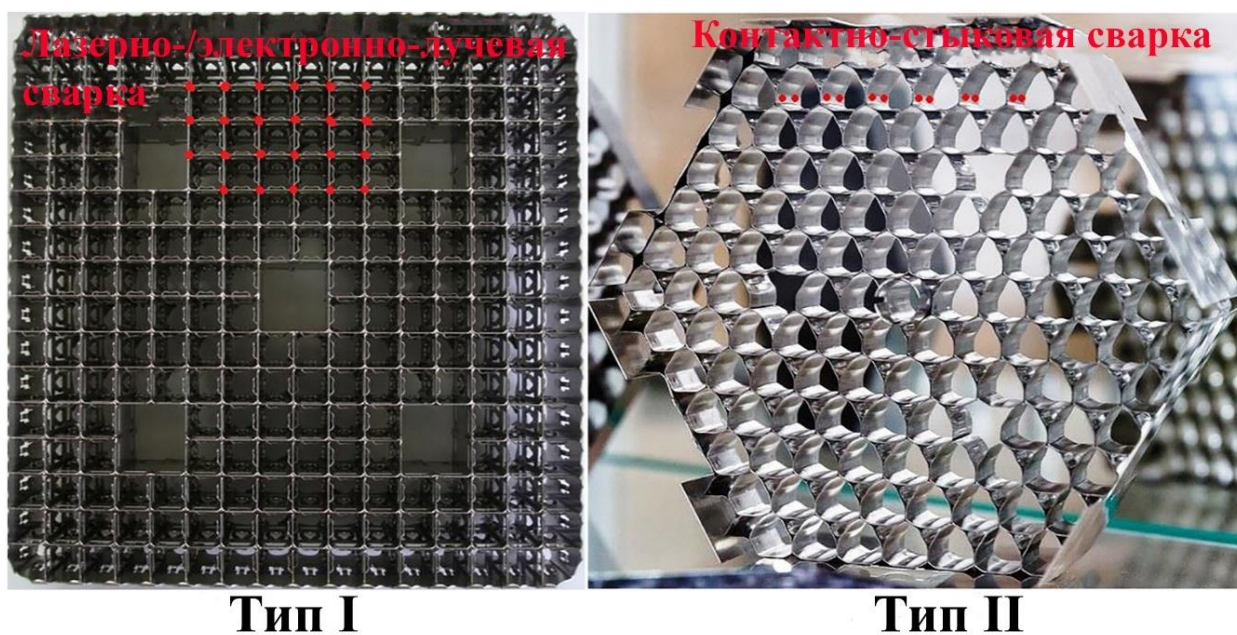


Рисунок 5 – Типичные места и методы сварных соединений в ТВС

Большинство дистанцирующих решёток представляют собой набор пересекающихся пластин с прорезями, соединенных электронно-лучевой или лазерно-лучевой сваркой, а также ячейки в четырех- или шестигранных ободах, объединенных контактной точечной сваркой. Кроме того, электронно-лучевая сварка используется для толстостенных деталей из циркониевых сплавов.

Требования к сварным швам ТВС варьируются в зависимости от возможных последствий их разрушения [63]. Все швы делятся на четыре категории. Первая (уплотнительные швы топливных стержней) и вторая (уплотнительные швы между частями ТВС, а также топливными стержнями) категории должны обладать герметичностью, прочностью и стойкостью к коррозии, эрозии, тепловым, вибрационным и ударным нагрузкам. Другие

сварные швы между частями ТВС, а также топливными стержнями относятся к третьей категории. Они не обязательно должны быть герметичными. К фиксирующим сварным швам четвертой категории предъявляются требования только по прочности, а также по коррозионной, эрозионной и тепловой стойкости.

Химический и фазовый составы, текстура, размеры зерен и другие параметры металла оказывают большое влияние на перечисленные выше функциональные свойства как СШ, так и к ЗТВ [64-67]. Все они зависят как от термических циклов, которые определяют загрязнение СШ и ЗТВ атмосферными газами, а также наличие мартенситных фаз и остаточных напряжений [64-67]. Пластичность, вязкость и коррозионная стойкость сварных швов резко снижаются, если были нарушены оптимальные условия сварки. Например, водород, азот и кислород образуют поры и снижают механические свойства швов. Одновременное присутствие водорода и высоких остаточных напряжений приводит к образованию замедленного гидридного растрескивания. Следовательно, содержание примесей в СШ ограничивается содержанием примесей в ОС [56,57].

При нагреве циркониевых сплавов до высоких температур (особенно в области  $\beta$ -фазы) в металле происходит рост зёрен. При сварке эта проблема усугубляется относительно низкой теплопроводностью. В результате увеличивается продолжительность пребывания СШ и ЗТВ в этом диапазоне температур, рост зерна и количество поглощенных газов из атмосферы. Следует отметить, что в большинстве случаев требуется послесварочная термическая обработка, особенно для сплавов Zr-Nb [30]. Лазерно-лучевая сварка все больше разрабатывается и внедряется благодаря высокой плотности энергии. Еще одним преимуществом является отсутствие обязательного использования вакуумных камер. Это значительно упрощает процесс сварки.

Среди недостатков следует отметить возможное нарушение стабильного тепловыделения при сварке из-за поглощения энергии лазерного луча

облаками металлической плазмы, испаряемой из сварочной ванны, и изменения коэффициента отражения на поверхности кромок. Также отсутствует возможность изменения направления лазерного луча магнитными полями. Для этой цели используются системы, включающие зеркала и оптику, но они имеют значительно меньшую скорость перемещения фокуса луча, чем при электронно-лучевой сварке [52].

С другой стороны, оптические волокна позволяют производить сварку дистанционно. Например, это было сделано в горячих камерах при выполнении ремонтных сварных соединений на отработавших ТВС [68,69]. Кроме того, предъявляются жесткие требования к чистоте поверхности и подготовке кромок, а также к их подгонке из-за малой ширины шва и небольшого объема сварочной ванны [70].

Сварка торцевых заглушек к трубкам ТВЭЛов [68,69], пластин дистанцирующих решёток [71-73], и термопар [52] являются основными областями применения лазерно-лучевой сварки для изготовления ТВС. Другой областью применения данной сварки является часть процесса заполнения ТВЭЛов гелием. Этот процесс осуществляется по схеме "прожиг отверстия в оболочке → откачка воздуха и заполнение гелием под давлением → заварка отверстия" с использованием той же лазерной установки [52].

Как и после электронно-лучевой сварки, СШ лазерно-лучевой сварки обычно включает фазы закалки  $\alpha'$  и  $\beta$ -Zr, структуру Видманштаттена, а также в некоторых случаях осажденные частицы второй фазы  $Zr_3Fe$ ,  $Zr(Nb, Fe)_2$  и  $Zr(Fe, Cr)_2$  [31,74,75]. Пористость является распространенным типом несплошности в сварных швах. Вероятность ее образования снижается путем расфокусировки лазерного луча и смещения фокуса над сварочной ванной. Однако это снижает эффективность процесса и его преимущества перед электронно-лучевой сваркой, особенно учитывая высокую стоимость оборудования [52]. Кроме того, чрезвычайно остро стоит проблема загрязнения СШ атмосферными газами, особенно для сплавов Zr-Nb [34,76,77]. Увеличение расхода инертного газа не позволяет решить эту

проблему, поэтому в некоторых случаях приходится использовать сварочные камеры [31,32,75]. В свою очередь, это еще больше снижает эффективность процесса лазерно-лучевой сварки. Таким образом, целесообразность использования лазерно-лучевой сварки определяется как качеством сварных швов, так и экономическими причинами. Однако можно прогнозировать более широкое применение для соединения деталей из циркониевых сплавов, учитывая значительный прогресс в разработке машин с точки зрения их стабильности, эффективности работы и некоторого снижения стоимости.

Обычно зона сварки защищается потоками инертного газа при лазерно-лучевой сварке [68]. К защите циркониевых сплавов предъявляются повышенные требования, учитывая их высокую чувствительность к загрязнению атмосферными газами при нагреве выше 300 °С. Для сварки циркония и его сплавов используются только инертные газы (аргон, гелий или их смеси). Однако в настоящее время не существует четких рекомендаций по выбору защитного газа для каждого конкретного случая. Чистота газа должна быть не менее 99,99%, максимальная влажность – 40 ppm, точка росы – 50 °С или ниже. Однако в атомной промышленности согласно стандарту [63] точка росы должна быть ниже -61 °С, а объемная доля влаги – не более  $9 \cdot 10^{-4}$  %.

Основные физические свойства аргона, гелия и их смесей в различных пропорциях при комнатной и повышенной температурах представлены в работе [78]. Их большие различия и множество возможных вариантов защитных свойств приводят к вариациям в процессах формирования сварного шва и, как следствие, функциональных свойств СШ. Плотность защитного газа оказывает большое влияние на его эффективность в каждом конкретном случае. Аргон примерно на треть тяжелее воздуха и в десять раз тяжелее гелия. После выдувания из сопла аргон образует защитный слой над зоной сварки. На него меньше влияют сквозняки и ветер. Гелий поднимается вокруг сопла благодаря своему малому весу. Для обеспечения эквивалентной эффективности защиты расход гелия должен быть в два-три раза больше, чем



расход аргона. Такое же соотношение справедливо для смесей с высоким содержанием гелия [30].

Применительно к лазерно-лучевой сварки процессы формирования СШ делятся на два основных типа в зависимости от соотношения подводимого тепла и объема расплавленного металла. Первый тип – режим проводимости; он реализуется при сварке толстостенных деталей. В этом случае сварочная ванна образуется при распространении энергии лазерного луча вглубь металла за счет теплопроводности. Ее температура находится в диапазоне между точками плавления и испарения свариваемых металлов. Как правило, сварные швы имеют полукруглое поперечное сечение с небольшим отношением ширины к глубине. Второй тип, шпоночный, используется для сварки относительно небольших и тонкостенных деталей. В этом случае отношение подводимого тепла к объему сварочной ванны велико, а температура на ее поверхности часто превышает температуру кипения.

### **1.3 Защитные покрытия**

Плотность энергии в активной зоне ВВЭР составляет до 50-75 МВт/м<sup>3</sup>, а тепловая мощность стандартного ВВЭР может достигать 3000 МВт [79]. Например, было подсчитано, что после остановки реактора на десять дней в активной зоне реактора остается около 0,2% тепла в виде термического разложения [80]. Если остановить насосы, с помощью которых теплоноситель циркулирует в активной зоне реактора, то её температура резко начнёт возрастать. В этом случае ТВЭЛы из циркониевых сплавов начнут подвергаться интенсивному окислению в паросодержащей среде, что приводит к их деградации, выделению водорода и большого количества тепла, что может привести к взрыву реактора, как произошло на АЭС Фукусима.

С тех пор была выдвинута концепция толерантного топлива, направленная на повышение коррозионной стойкости циркониевых сплавов, снижение роста температуры, выделения водорода и продление времени на устранения последствий аварии [61]. Существует две методики развития

толерантного топлива. Первая из них – это краткосрочная стратегия, направленная на нанесение защитных покрытий на поверхности ТВЭЛов из циркониевых сплавов, а вторая – разработка новых материалов для замены циркониевых сплавов. Однако, разработка и проверка нового типа материалов занимает очень длительный период. Преимущества нанесения защитного покрытия на ТВЭЛы в том, что оно может значительно повысить коррозионную стойкость циркониевых сплавов во время, например, аварий с потерей теплоносителя (~1200 °С) и практически не влияет на исходную конструкцию ТВЭЛов и химический состав воды [15, 81].

До настоящего времени было разработано множество типов материалов для покрытий, включая покрытия на основе МАХ-фаз [82-84], карбидные покрытия [85,86], нитридные покрытия [87,88], покрытия из чистого металла [89-91] и покрытия из сплавов [92-94]. Предыдущие исследования показывают, что покрытия на основе МАХ-фаз такие, как Ti-Al-C и Cr-Al-C, подвержены растрескиванию во время термообработки, водной коррозии и высокотемпературного парового окисления [95,96]. Покрытия SiC нестабильны при 350 °С/20 МПа из-за растворения продуктов коррозии [97]. Кроме того, покрытие SiC обладает повышенной хрупкостью, поэтому оно может растрескаться при тепловом ударе. Покрытия из нитридов металлов, такие как CrN, распадаются на Cr<sub>2</sub>N и N<sub>2</sub> при температурах от 500 °С до 975 °С, что приводит к образованию трещин [18,98]. Для покрытия FeCrAl температура эвтектики Fe-Zr составляет около 900 °С, что явно ниже температуры аварии с потерей теплоносителя [99-101]. По сравнению с другими покрытиями, хромовое покрытие имеет ряд преимуществ:

- Повышенная коррозионная стойкость из-за возникновения оксидной пленки Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, сформированной на поверхности покрытия во время высокотемпературного окисления;

- Хорошая адгезия с циркониевыми сплавами. На данных сплавах с хромовым покрытием не было обнаружено его отслоения после деформаций в условиях нормальной эксплуатации или аварии [102].

– Сечение захвата тепловых нейтронов хрома составляет 2,9 барн, что ниже, чем у других альтернативных материалов покрытия [14].

– Модуль упругости у хрома примерно в два раза выше, чем у циркония, что способствует повышению общей жесткости [103].

– Температура эвтектики Cr-Zr составляет около 1332 °С [104], что выше аварийных температур, но, с другой стороны, определяет верхний температурный предел для защитного эффекта покрытия.

Хотя циркониевые сплавы с Cr-покрытием были разработаны для повышения коррозионной стойкости ТВЭЛов в аварийных условиях, они также должны обладать теми же или лучшими свойствами, что и непокрытый сплав при длительной нормальной эксплуатации. Большинство зарегистрированных коррозионных испытаний [102, 105-109], проводились в водяном пару под давлением при температуре 360 °С и давлении 18,6 МПа что соответствует нормальным условиям эксплуатации ВВЭР. Также, учитывая продолжительность эксперимента, некоторые испытания проводились в среде воды под давлением или пара при температурах от 250 °С до 500 °С [110,111].

На рисунке 6 представлен внешний вид некоторых образцов из циркониевого сплава с Cr-покрытием после окисления в водной или паровой средах при различных давлениях.

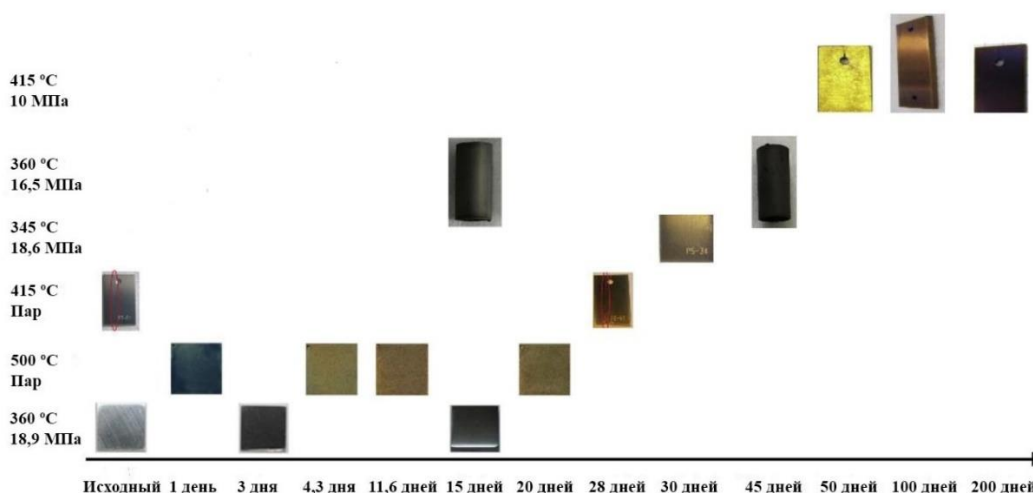


Рисунок 6 – Фото циркониевых образцов с Cr-покрытием после испытаний в водной и паровой средах при различных давлениях [102, 105-111].

Видно, что большинство образцов имеют золотистый цвет, что говорит о том, что толщина слоя  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  на поверхности составляет около нескольких сотен нанометров [106] (учитывая тот факт, что длина волны желтого цвета составляет около 580-596 нм). Кроме того, после испытаний не было обнаружено трещин или отслоения Cr-покрытия. В местах царапин не было обнаружено усиленной коррозии циркониевого сплава несмотря на то, что образец был намеренно поцарапан на поверхности [106]. В работе [110] также провели аналогичный эксперимент по исследованию влияния ранее существовавших трещин на коррозионную стойкость образца с Cr-покрытием. После выдержки образца при нормальных условиях ВВЭР под трещиной образовалась небольшая зона  $\text{ZrO}_2$ , а сколов или трещин покрытия обнаружено не было.

В аварийных условиях температура активной зоны может быстро повышаться до 1200 °С из-за выделяющегося тепла во время парациркониевой реакции. Во время повышения температуры коррозионная стойкость покрытия является одним из ключевых показателей для его оценки. Оксидные пленки, сформированные снаружи, должны быть химически стабильными в паровой среде, чтобы ограничить диффузию кислорода, иона гидроксида, а также водорода в циркониевый сплав. Кроме того, при повторном введении теплоносителя в реактор покрытие должно быть физически стабильным (без разрушений, вызванных термоударами, таких как трещины или явная деформация) [14].

Поведение хрома при высокотемпературном окислении в паровой среде отличается от поведения в среде чистого кислорода или сухого воздуха. Наличие азота может повлиять на кинетику окисления хромового покрытия [112]. Известно, что кинетика окисления чистого хрома в кислородсодержащей паровой среде имеет параболическое поведение [113]. Рост  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  регулируется диффузией ионов хрома через решетку этого оксида,

а также диффузией кислорода по границам зерен к границе раздела оксид/металл.

Авария с потерей теплоносителя приводит к повышению температуры оболочки ТВЭЛа, что впоследствии увеличивает напряжения в трубках, находящихся под давлением. Авария с потерей теплоносителя способствует превращению оставшегося теплоносителя в пар, что в свою очередь приводит к почти адиабатическим тепловым граничным условиям. В результате этого температура повышается почти с постоянной скоростью. Кроме того, повышенные температуры усиливает окисление оболочки.

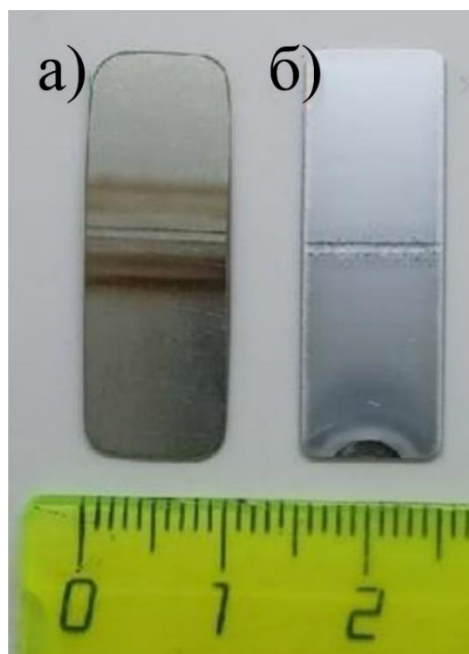
Устойчивость Cr-покрытий к высокотемпературному паровому окислению в условиях моделирования аварий с потерей теплоносителя является областью активных исследований [102, 105-111]. Было показано, что Cr-покрытия в диапазоне толщины 10-20 мкм не оказывают существенного влияния на нейтронику, несмотря на большое сечение поглощения тепловых нейтронов хромом [114]. Поэтому для применения желательны покрытия менее 30 мкм, хотя в настоящее время существуют ограничения для тонких покрытий из-за ограничений в методах осаждения.

Осаждение высококачественных покрытий на поверхностях большой длины, такие как у ТВЭЛов, также остается сложной задачей, поскольку у типичные методы осаждения (магнетронное, электродуговое напыление и т.д.) имеют технические ограничения, либо не позволяют контролировать получаемую микроструктуру и равномерность толщины покрытия.

## Глава 2. Материалы и методы

### 2.1 Подготовка образцов

Лазерно-лучевые швы ( $30 \times 10 \times 0,5$  мм<sup>3</sup>) из циркониевого сплава Э110 (0,9-1,1 масс. % Nb, 0,06-0,1 масс. % O) были изготовлены на ПАО "Новосибирский завод химконцентратов" (НЗХК, Росатом, Новосибирск, Россия). Полученные образцы были разделены на две серии (рис 7). Первая серия состояла из образцов в исходном состоянии без каких-либо процедур последующей обработки после сварки. На вторую серию образцов было нанесено хромовое покрытие. Перед нанесением покрытия образцы промывались в ультразвуковой ванне с ацетоном (20 мин), а затем подвергались струйной обработке сухим воздухом в течение двух минут. После этого образцы хранились в специальных держателях подложек с таким расчетом, чтобы некоторая площадь поверхности образцов оставалась непокрытой после процесса осаждения (площадь непокрытой поверхности составляла  $\sim 0,25$  см<sup>2</sup>). Держатели подложек были установлены на планетарном вращающемся столике для равномерного нанесения покрытия. Для травления поверхности образцов применялась ионная бомбардировка ионами аргона. Использовались следующие параметры ионного травления: давление  $Ar^+$  – 0,2 Па, ионный ток – 35 мА, ускоренное напряжение – 2,5 кВ, время травления – 30 мин.



а – образец без покрытия; б – образец с Cr-покрытием

Рисунок 7 – Внешний вид лазерно-лучевых швов, изготовленных из циркониевого сплава Э110

## 2.2 Осаждение покрытий

Осаждение хромового покрытия проводилось с использованием вакуумной плазменной установки, оснащенной многокатодной системой магнетронного распыления с мишенями из хрома (99,95%, Ø90 мм). Ее подробное описание представлено в [21]. Параметры осаждения хромового покрытия на образцы из циркониевого сплава Э110 с лазерно-лучевыми швами (таблица 2) были выбраны на основании предыдущих результатов, полученных в работах [12,13]. Толщина хромового покрытия была равна 8 мкм.

Таблица 2 – Параметры осаждения хромового покрытия

$Q_t$ , Вт/см <sup>2</sup>	$P$ , Па	$U_b$ , В	$j_s$ , мА/см <sup>2</sup>	$T_s$ , °С	$h$ , мкм
39	0,25	-100	20	390	8,0±0,3

Примечание:  $Q_t$  – плотность мощности разряда;  $P$  – рабочее давление;  $U_b$  – потенциал смещения на образец;  $j_s$  – плотность ионного тока на подложку;  $T_s$  – максимальная температура образца;  $h$  – толщина покрытия.

### **2.3 Высокотемпературное окисление и характеристика образцов**

Экспериментальные образцы окислялись на воздухе (влажность 70%) с помощью высокотемпературной печи ATS 3210 (Applied Test Systems Inc., Butler, PA, USA). Сначала образцы выдерживали в холодной печи (~25 °C), а затем нагревали до 1100 °C со скоростью ~25 °C/мин. Продолжительность окисления была равна 2, 10, 30, 45, 60 и 90 мин. После этого образцы охлаждали до комнатной температуры. Привесы образцов измерялись с помощью аналитических весов Sartorius CP124 S.

### **2.4 Наводороживание образцов**

Наводороживание образцов проводилось с использованием автоматизированной машины Gas Reaction Controller (GRC) при температурах 360, 450 и 900 °C. Образцы помещали в вакуумную камеру, из которой затем откачивали воздух до давления  $10^{-6}$  бар. Затем образцы нагревали со скоростью нагрева 6 °C/мин. После этого в нагретую камеру вводился чистый водород (99,9999 %). Общее давление водорода составляло 2 бар и оставалось постоянным. Продолжительность наводороживания составляла 2 ч для 360, 450 °C и 20 мин для 900 °C. После эксперимента камеру откачивали и охлаждали до комнатной температуры (~5-10 °C/мин). Общее количество поглощенного водорода было измерено с помощью прибора RHEN 602 (LECO, США).

### **2.5 Методы исследования структурно-фазового состояния образцов**

Микроструктура образцов была получена с помощью оптического микроскопа AXIOVERT 200MAT (Zeiss, Германия) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием Vega 3 (Tescan, Чехия). Предварительно поверхность поперечных сечений образцов была протравлена в растворе 5 об.% HF + 45 об.% HNO<sub>3</sub> + 50 об.% H<sub>2</sub>O при комнатной



температуре. Фазовый состав образцов был исследован методом рентгеновской дифракции с использованием XRD-7000S (Shimadzu, Япония) с излучением  $\text{CuK}\alpha$  (30 кВ, 40 мА). Фазовый состав был определен с использованием базы данных ICDD-4+ и программы Sieve.

## **2.6 Механические испытания образцов**

Твердость образцов была измерена на твердомере Pruftechnik KB-30S на основе метода Виккерса. Нагрузка на индентор составляла 50 г. Измерения твердости проводились в трех различных зонах (СШ, ЗТВ и ОС), в каждой зоне было сделано не менее 20 индентаций.

Испытание на трехточечный изгиб проводилось с использованием установки Gotech AI-7000M с одним ударным и двумя опорными роликами. Нагрузка составляла 0,1 Н для начала эксперимента, экспериментальные данные (нагрузка и смещение) регистрировались с частотой 124 Гц. Испытания на изгиб проводились в режиме контроля смещения со скоростью нагружения 0,5 мм/мин в соответствии со стандартом E290 ASTM. Расстояние между двумя опорными роликами было равно 22 мм, а центр образцов (СШ) был установлен на ударном ролике. Поперечное сечение образцов также было изучено после испытания на изгиб с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ, JEOL JSM 7500F), оснащённого приставкой энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) для элементного анализа.

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0Б91	Гусев Кирилл Сергеевич

<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа ядерных технологий</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>Отделение экспериментальной физики</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	03.03.02. Физика

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Нормативные документы НИ ТПУ, ФЗ «О минимальном размере оплаты труда» для определения оплаты труда исполнителей проекта.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Накладные расходы – 16% Районный коэффициент – 30%. Премияльный коэффициент составляет 30% от оклада. Коэффициент доплат и надбавок 20% от оклада.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды - 30%

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

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценить потенциальных потребителей исследования, проанализировать конкурентных решений, представить SWOT – анализ. Предложить возможные альтернативы проведения НИ.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Представить план этапов работ, определить трудоёмкость и построить календарный график, сформировать бюджет НИ.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Определить интегральные показатели финансовой эффективности, ресурсоэффективности разработки. Рассчитать сравнительную эффективность проекта.

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

1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений; 2. Матрица SWOT-анализа; 3. Морфологическая матрица; 4. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей; 5. Временные показатели проведения НИ; 6. Бюджет НИ; 7. Оценка характеристик вариантов исполнения; 8. Сравнительная эффективность разработки.
---

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент ОСГН, ШБИП	Былкова Татьяна Васильевна	канд.экон.наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0Б91	Гусев Кирилл Сергеевич		

## **Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В данной работе были установлены закономерности коррозии и механические свойства лазерно-лучевых сварных соединений из циркониевого сплава Э110 с защитным хромовым покрытием. Данный сплав используется как основной материал при изготовлении тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) для водо-водяных реакторов (ВВР). При повышенных температурах ( $> 861$  °С) начинается парациркониевая реакция с выделением взрывоопасного водорода. Краткосрочная стратегия, направленная, на повышение коррозионной стойкости данных сплавов заключается в нанесении на них специальных защитных покрытий, в частности, хрома.

### **4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

**Потенциальные потребители результатов исследования.** Сплав циркония Э110 широко применяется в ядерной энергетике в качестве конструкционного материала. Потенциальными потребителями исследования являются компании российского ядерного цикла.

**Анализ конкурентных технических решений.** В данном исследовании на лазерно-лучевые сварные швы из циркониевого сплава Э110 наносилось защитное хромовое покрытие ( $B_{\phi}$ ). Также можно наносить керамические покрытия ( $B_{k1}$ ) и многослойные покрытия ( $B_{k2}$ ). Оценочная карта технических решений приведена в таблице 6.

**Таблица 6** – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{\phi}$	$B_{k1}$	$B_{k2}$	$K_{\phi}$	$K_1$	$K_2$
1	2	3	4	5	6	7	8

Продолжение таблицы 6

Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Соответствие условиям, близким к эксплуатационным и аварийным	0,4	5	1	4	2	0,4	1,6
2. Длительность окисления и насыщения водородом	0,3	4	2	3	1,2	0,6	1,2
3. Точность полученных данных	0,2	4	2	3	0,8	0,4	0,6
4. Простота эксплуатации оборудования	0,1	3	2	3	0,3	0,2	0,3
<b>Итого</b>	<b>1</b>				<b>4,3</b>	<b>1,6</b>	<b>3,7</b>

По итогам анализа, представленным в карте сравнения оценок конкурентных разработок технических решений, можно сделать вывод, что нанесение хромовых покрытий имеет ряд преимуществ по сравнению с другими покрытиями, такими как керамические и многослойные покрытия. Одним из наиболее важных является возможность провести эксперимент в условиях близких к эксплуатационным условиям ядерного реактора.

**SWOT-анализ.** Результаты SWOT-анализа представлены в таблице 7

**Таблица 7 – SWOT-анализ**

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>С1. Актуальность темы исследовательской работы.</p> <p>С2. Возможность проводить наводороживание и окисление в условиях близким к эксплуатационным и аварийным.</p> <p>С3. Возможность улучшения безопасности конструкционных частей реактора.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>Сл1. Большой срок поставок материалов и комплектующий, используемые при проведении научного исследования.</p> <p>Сл2. Невозможность в данное время тестирования технологии в реальных рабочих условиях.</p> <p>Сл3. Длительный срок тестирования опытного образца.</p>
--	--	---

Продолжение таблицы 7

<p><b>Возможности:</b>          В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ          В2. Снижение расхода на сырье и материалы, используемые при научных исследованиях</p>	<p>1. Результаты исследования коррозионной стойкости сварных соединений с хромовым покрытием могут послужить рекомендацией предприятиям, которые изготавливают изделия для ядерной энергетики.</p>	<p>1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ для тестирования технологии в реальных рабочих условиях.          2. Приобретение необходимого оборудования для проведения испытаний опытного образца.</p>
<p><b>Угрозы:</b>          У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства в ядерной энергетике.          У2. Дополнительные государственные требования к сертификации материала в качестве защитного покрытия.</p>	<p>1. Для убедительности полученных результатов исследований необходимо контролировать точность проводимых расчетов.          2. Проводить исследования других характеристик сварного шва.</p>	<p>1. Для уменьшения погрешности измерения стоит произвести больше исследований с большим количеством образцов одного типа.</p>

Опираясь на SWOT анализ можно сделать вывод, что на данный момент преимущества используемого покрытия преобладают над его недостатками по сравнению с другими покрытиями.

#### 4.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

Для определения возможных альтернатив проведения научного исследования воспользуемся морфологической матрицей, результаты которого представлены в таблице 8.

**Таблица 8** – Морфологическая матрица для научного исследования

Характеристика	Вариант исполнения 1	Вариант исполнения 2	Вариант исполнения 3
А. Анализ фазового состава образцов до и после испытаний	Дифрактометр XRD – Shimadzu 7000S	–	–

Продолжение таблицы 8

Б. Механические свойства образцов до и после испытаний	Твердомер Pruftechnik KB-30S и установка Gotech AI-7000M для проведения трёхточечного изгиба	Установка Gotech AI-7000M	Твердомер Pruftechnik KB-30S
В. Анализ микроструктуры образцов до и после испытаний	Оптический микроскоп AXIOVERT 200MAT, использование сканирующего микроскопа (СЭМ)	СЭМ	Оптический микроскоп AXIOVERT 200MAT
Г. Количество образцов	6 образцов, подвергнутых высокотемпературному окислению в течение 2-90 мин и 6 образцов (3 с покрытием и 3 без) для наводороживания при температурах: 360, 450, 900 °С	8 образца, подвергнутых наводороживанию при температурах: 360, 450, 900, 1100 °С	7 образцов с Cr-покрытием, подвергнутых высокотемпературному окислению в течение 2-120 мин;

С помощью всех вариантов можно установить закономерности коррозии и механические свойства лазерно-лучевых сварных швов из циркониевого сплава с защитным хромовым покрытием. Однако, второй и третий варианты не будут давать полной картины о структуре, а также о механических свойствах образцов после высокотемпературного окисления или после наводороживания.

Также во втором варианте нет смысла проводить испытания на наводороживания при температуре 1100 °С, так как 900 °С считается общепринятой температурой для моделирования аварийных ситуаций.

Таким образом, наилучшим вариантом исполнения научного исследования является вариант исполнения 1.

### 4.3 Планирование научно-исследовательских работ

**Структура работа в рамках научного исследования.** Для выполнения научной исследовательской работы была сформирована рабочая группа, в состав которой входили научный руководитель и исполнитель. В таблице 9 представлен основной перечень работ.

**Таблица 9 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей**

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Создание темы проекта	1	Составление и утверждение темы проекта	Научный руководитель
	2	Анализ актуальности темы	
	3	Календарное планирование работ	Научный руководитель, исполнитель
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Проведение литературного обзора	Исполнитель
	5	Шлифование образцов	
	6	Напыление покрытий	Научный руководитель, исполнитель
	7	Проведение окисления и наводороживания образцов	Научный руководитель
	8	Анализ данных по микроструктурному и рентгенофазовому анализу	Исполнитель
	9	Измерение твёрдости образцов и анализ данных	
	10	Проведение испытаний по трёхточечному изгибу образцов и анализ данных	
Оценка полученных результатов	11	Анализ результатов	Научный руководитель, студент
	12	Вывод по результатам исследования	

#### 4.4 Определение трудоемкости выполнения работ

Рассчитаем трудоемкость выполнения работ для 3-х различных исполнений, которые были приведены выше. Используемые сокращения в таблице: нч – научный руководитель, и – исполнитель, исп – исполнение.

**Таблица 10 – Временные показатели проведения научного исследования**

Названия работы	Трудоемкость работ									Исполнители			Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$			Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$		
	$t_{min}$ , чел-дни			$t_{max}$ , чел-дни			$t_{ож}$ , чел-дни											
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Составление и утверждение темы проекта	5	5	5	7	7	7	5,8	5,8	5,8	нч	нч	нч	5,8	5,8	5,8	9	9	9
Анализ актуальности темы	10	10	10	12	12	12	10,8	10,8	10,8	нч	нч	нч	10,8	10,8	10,8	16	16	16
Календарное планирование работ	5	5	5	7	7	7	5,8	5,8	5,8	нч, ис	нч, ис	нч, ис	2,9	2,9	2,9	5	5	5
Проведение литературного обзора	20	20	20	30	30	30	24	24	24	ис	ис	ис	24	24	24	36	36	36
Шлифование образцов	7	9	9	10	12	12	8,2	10,2	10,2	ис	ис	ис	8,2	10,2	10,2	13	16	16
Напыление покрытий	6	7	7	10	11	11	7,6	8,6	8,6	нч, ис	нч, ис	нч, ис	3,8	4,3	4,3	6	7	7
Проведение окисления и наводороживания образцов	5	6	6	7	8	8	5,8	6,8	6,8	нч	нч	нч	5,8	6,8	6,8	9	11	11
Анализ данных по микроструктурному и рентгенофазовому анализу	20	17	15	25	23	17	22	19,4	15,8	ис	ис	ис	22	19,4	15,8	33	29	24
Измерение твёрдости образцов и анализ данных	10	1	12	15	1	17	12	1	14	ис	ис	ис	12	1	14	18	2	21
Проведение испытаний по трёхточечному изгибу образцов и анализ данных	5	5	1	7	7	1	5,8	5,8	1	ис	ис	ис	5,8	5,8	1	9	9	2
Анализ результатов	15	10	10	20	15	15	17	12	12	нч, ис	нч, ис	нч, ис	8,5	6	6	13	9	9
Вывод по результатам исследования	7	7	7	10	10	10	8,2	8,2	8,2	нч, ис	нч, ис	нч, ис	4,1	4,1	4,1	7	7	7



**Разработка графика проведения научного исследования.** На рисунке 23 представлен график Ганта. Данные по выполнению работ брались из таблицы 10.

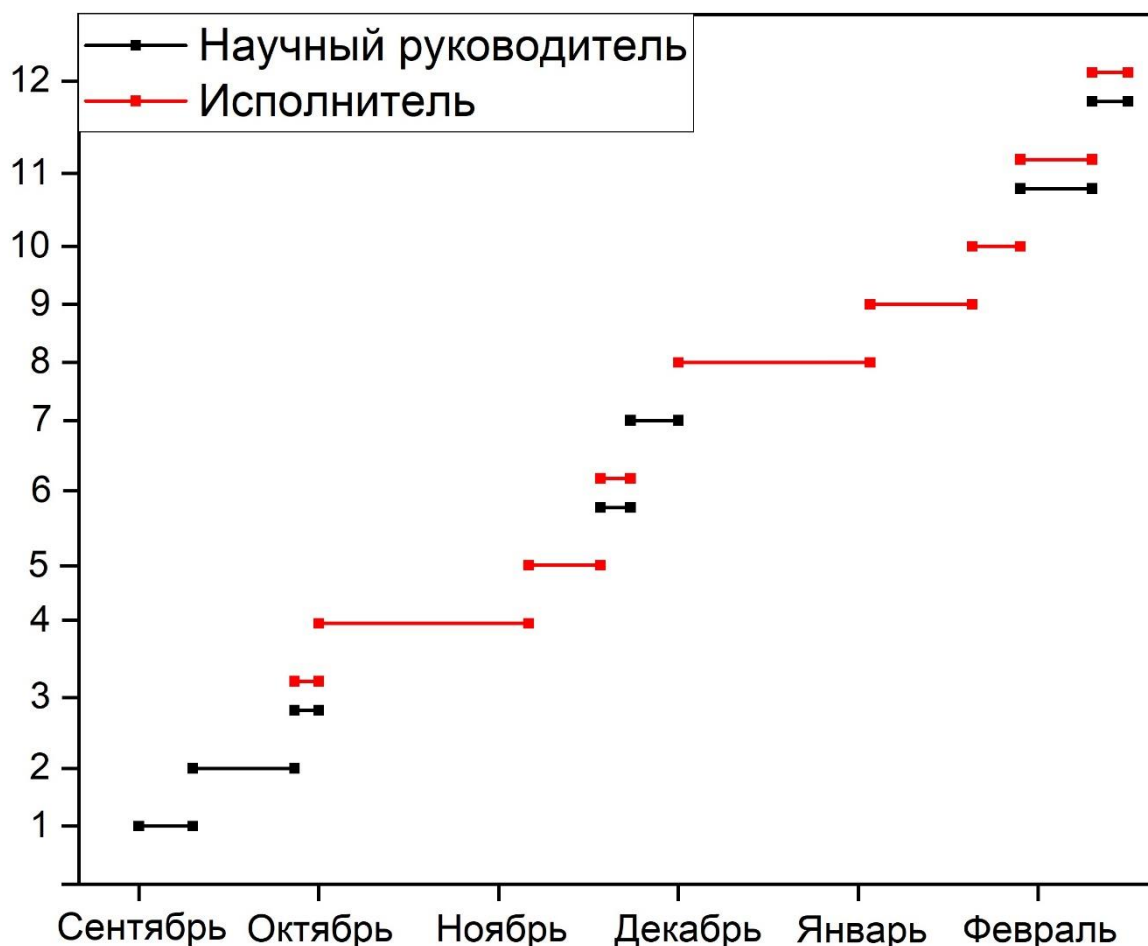


Рисунок 23 – График Ганта

**Бюджет научно-технического исследования (НТИ).** Расчет материальных затрат НТИ представлен в таблице 10. В ходе проведения работы (Исп. 1) было изготовлено всего 15 лазерно-лучевых сварных соединений из циркониевого сплава Э110: 1 исходный, 8 для высокотемпературного окисления, 6 для наводороживания. Исп.2 и Исп.3 отличаются количеством образцов (в Исп. 2 – 1 исходный, 9 для окисления и 6 для наводороживания (итого 16), в Исп.3 – 1 исходный, 8 для окисления и 8 для наводороживания (итого 17)).

**Таблица 11 – Материальные затраты**

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб			Затраты на материалы, руб		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Циркониевый сплав Э110	шт	15	16	17	150			2250	2400	2550
Мишень для магнетронного распыления с хромом	шт	1	1	1	24500			24500		
Баллон с аргоном	шт	1	1	1	8100			8100		
Шлифовальная бумага	шт	3	4	5	160			480	640	800
<b>Итого</b>								<b>35330</b>	<b>35640</b>	<b>35950</b>

В таблице 12 представлены наименования установок, которые были использованы в ходе НИ, и количество дней, в течение которых они эксплуатировались.

**Таблица 12 – Количество дней эксплуатации оборудования**

Наименование оборудования	Время эксплуатации, дней		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Шлифовально-полировальный станок MP-1B	13	16	16
Ионно-плазменная установка	6	7	7
Установка Gas Reaction Controller	4	4	6
Высокотемпературная печь ATS 3210	5	7	5
Оптический микроскоп AXIOVERT 200MAT	2	3	4
Дифрактометр XRD-7000S	5	6	7
Твердомер Pruftechnik KB-30S	5	1	7

Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ представлен в таблице 13.

**Таблица 13** – Расчет затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

Наименование оборудования	Стоимость оборудования, руб	Срок полезного использования, год	Амортизация в год, руб	Амортизация на время эксплуатации, руб		
				Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Шлифовально-полировальный станок MP-1B	270 000	10	27 000	961	1 183	1 183
Ионно-плазменная установка	2 300 000	10	230 000	3 772	4 416	4 416
Установка Gas Reaction Controller	1 500 000	20	75 000	825	825	1 200
Высокотемпературная печь ATS 3210	310 000	20	15 500	212	298	212
Оптический микроскоп AXIOVERT 200MAT	1 800 000	25	72 000	396	590	792
Дифрактометр XRD-7000S	2 000 000	20	100 000	1370	1640	1920
Твердомер Pruftechnik KB-30S	700 000	20	35 000	480	95	672
<b>Итого</b>				<b>8 016</b>	<b>9 047</b>	<b>10 395</b>

**Основная заработная плата исполнителей темы.** Рассчитаем действительный годовой фонд рабочего времени для участвующих в исследовании. Баланс рабочего времени представлен в таблице 14.

**Таблица 14** – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель (научный руководитель)	Исполнитель (студент)
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	117	117
- выходные дни	91	91
- праздничные дни	27	27
Потери рабочего времени	24	24
- отпуск	0	0
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	224	224

Произведём расчет основной ( $Z_{осн}$ ), дополнительной заработной платы ( $Z_{доп}$ ) и отчислений во внебюджетные фонды ( $Z_{внеб}$ ). Коэффициент дополнительной заработной платы  $k_{доп}$  принят 13% от основной заработной платы. Премияльный коэффициент составляет 30% от оклада. Коэффициент доплат и надбавок 20% от оклада. Районный коэффициент для Томска 1,3. Оклад исполнителя (студента) принят минимальному размеру оплаты труда – 16 242 руб.  $Z_б$  – размер оклада. Среднедневная з/п будет рассчитываться как среднемесячная з/п на количество месяцев работы без отпуска в течение года, при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя. Т.к. научный руководитель не весь день работает над проектом, а только примерно 1/10 часть ото дня, то возьмем понижающий коэффициент равный 0,08.

**Таблица 15 – Расчет заработной платы**

Исполнители	Разряд	З <sub>б</sub> , руб.	k <sub>пр</sub>	k <sub>д</sub>	k <sub>р</sub>	З <sub>м</sub> , руб	З <sub>дн</sub> , руб.	Т <sub>р</sub> , раб. дн.			З <sub>осн</sub> , руб.			З <sub>доп</sub> , руб			З <sub>внеб</sub> , руб		
								Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Руководитель (научный руководитель)	к. ф-м. н.	37700	0,3	0,3	1,3	78416	3599	65	64	64	233935	230336	230336	70181	69101	69101	304116	299437	299437
Исполнитель (студент)	студент	16242				33783	1551	140	120	127	217140	186120	196977	65142	55836	59093	282282	241956	256070
<b>Итого: З<sub>осн</sub> + З<sub>доп</sub> + З<sub>внеб</sub></b>								<b>Исп.1: 1 172 796</b>			<b>Исп.2: 1 082 786</b>			<b>Исп.3: 1 111 014</b>					

Не попавшие в предыдущие статьи расходов были посчитаны как накладные расходы. К этим расходам относятся: печать документов, электроэнергия, оплата услуг связи и интернета. Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%. Накладные расходы считались, как сумма статей 1÷5 (таблица 16), умноженная на коэффициент расходов.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 16.

**Таблица 16** – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Материальные затраты НИИ	35330	35640	35950
Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	8 016	9 047	10 395
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	451075	416456	427313
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	135323	124937	128194
Отчисления во внебюджетные фонды	586398	541393	555507
Накладные расходы	194583	180396	185173
<b>Бюджет затрат НИИ</b>	<b>1410725</b>	<b>1307869</b>	<b>1342532</b>

#### **4.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой эффективности исследования**

За максимальную стоимость исполнения научно-исследовательского проекта возьмем стоимость исследования коррозионной стойкости лазерно-лучевых сварных соединений с хромовым покрытием, которая составила 1 410 725 руб.

Однако из-за того, что в исследуемых вариантах исполнения меняется количество исследуемых образцов, то интегральные показатели ресурсоэффективности будут отличаться. Позиция каждого исполнения оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путём, в сумме должны составлять 1. Рассчитаем интегральный показатель ресурсоэффективности используя таблицу 17.

**Таблица 17** – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерий \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Точность полученных данных	0,4	5	4	4
Время обработки данных	0,3	5	3	3
Скорость получения данных	0,2	4	5	5
Время подготовки образцов	0,1	4	5	5
<b>Итого:</b>	<b>1</b>			

Полученные результаты по ресурсоэффективности сведены в таблице 18.

**Таблица 18** – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,93	0,95
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	4,3	1,6	3,4
3	Интегральный показатель эффективности	4,3	1,7	3,6
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	2,5		1,2

Оценка сравнительной эффективности показала, что разработка в первом варианте исполнения эффективнее остальных предложенных вариантов на 105 % и 20%.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
0Б91		Гусев Кирилл Сергеевич	
<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа ядерных технологий</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Отделение экспериментальной физики</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/ специальность</b>	03.03.02. Физика

Тема ВКР:

<b>Коррозионная стойкость сварных соединений из циркониевого сплава Э110 с защитным хромовым покрытием</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p><b>Введение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</li> <li>– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации</li> </ul>	<p><i>Объект исследования:</i> лазерно-лучевые сварные соединения из циркониевого сплава Э110 с хромовым покрытием  <i>Область применения:</i> Атомные станции  <i>Рабочая зона:</i> лаборатория  <i>Размеры помещения (климатическая зона*):</i> 20*10 м.  <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> шлифовально-полировальный станок MP-1B, высокотемпературная печь ATS 3210, ионно-плазменная установка, аналитические весы CP 124S, сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) MIRA3, оптический микроскоп AXIOVERT 200MAT, дифрактометр XRD-7000S, автоматизированная установка Gas Reaction Controller (GRC), твердомер Pruftechnik KB-30S, компьютер.  <i>Исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> шлифование образцов, нанесение Сг покрытия, высокотемпературное окисление образцов, наводороживание образцов, исследование микроструктуры и элементного состава, измерение привеса и твердости образцов.</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)</li> <li>2. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</li> <li>3. ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</li> <li>4. ГОСТ 23000-78. Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования.</li> <li>5. ГОСТ Р 50923-96. Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.</li> <li>6. ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).</li> </ol>
<p><b>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ выявленных вредных и опасных факторов</li> <li>– Обоснование мероприятий по снижению воздействию</li> </ul>	<p><b>Опасные факторы:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Опасные производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов;</li> <li>2. Опасные производственные факторы, связанные с силами и энергией механического движения.</li> <li>3. Опасные производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызывать ожоги тканей организма человека.</li> </ol> <p><b>Вредные факторы:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами</li> </ol>



	<p>воздушной среды на местонахождении работающего;</p> <p>2. Вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде;</p> <p>3. Вредные производственные факторы, связанные со световой средой.</p> <p><b>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</b> изоляция электропроводов, теплоизоляция, перчатки, беруши, наушники, защитные очки, халат.</p>
<b>3. Экологическая безопасность при эксплуатации</b>	<p><b>Воздействие на селитебную зону:</b> радиоактивное заражение территории при аварии</p> <p><b>Воздействие на литосферу:</b> твёрдые радиоактивные отходы</p> <p><b>Воздействие на гидросферу:</b> жидкие радиоактивные отходы, сброс охлаждающей воды в водоёмы</p> <p><b>Воздействие на атмосферу:</b> выбросы из вентиляционных систем, содержащие радиоактивные вещества</p>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации</b>	<p><b>Возможные ЧС</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Природные катаклизмы (сильный ураган, наводнение);</li> <li>2. Геологические воздействия (землетрясение);</li> <li>3. Техногенные аварии (отказ систем управления безопасностью, взрыв с выбросом радиоактивных веществ в большом радиусе).</li> </ol> <p><b>Наиболее типичная ЧС:</b> тепловой взрыв с выбросом радиоактивных веществ в большом радиусе</p>
<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б91	Гусев Кирилл Сергеевич		

## **Глава 5. Социальная ответственность**

### **5.1 Введение**

Раздел «Социальная ответственность» нацелен на разработку проектных решений, предотвращающих возникновение чрезвычайных ситуаций в производстве, а также на уменьшение воздействия отходов разного класса опасности на окружающую среду.

Объектом исследования являются лазерно-лучевые сварные соединения из циркониевого сплава Э110 с хромовым покрытием. Соответственно, перспективной областью применения данного исследования является установление закономерностей коррозии сварных соединений с защитным покрытием.

Потенциальными потребителями данного исследования могут являться все компании российского ядерного цикла, такие как, например Сибирский химический комбинат (СХК), г. Северск, Акционерное общество "Новосибирский завод химконцентратов" (АО НЗХК), г. Новосибирск и РНЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Исследование проводилось в лабораторных условиях.

### **5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **5.2.1 Правовые норма трудового законодательства**

Продолжительность рабочего времени, а именно начало и его окончание определена по соглашению сторон работодателя и работника в соответствии с главой 16 ст. 102 ТК РФ «Работа в режиме гибкого рабочего времени» [131].

Выполнение работ связано с воздействием вредных и (или) опасных факторов производственной среды, в связи с чем, работникам бесплатно выдаются средства индивидуальной защиты и смывающие средства, в соответствии с главой 36 ст. 221 ТК РФ «Обеспечение работников средствами индивидуальной защиты» Трудовой кодекс Российской Федерации от

30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018) [131].

Поступающие на работу допускаются к исполнению своих обязанностей только после вводного инструктажа о соблюдении мер безопасности, инструктажа на рабочем месте и после собеседования по вопросам техники безопасности. Проведение всех видов инструктажа регистрируется в журнале. Работа в лаборатории с химическими реактивами, проводится только в вытяжных шкафах, также происходит осмотр оборудования, наведение порядка на рабочем месте, применение индивидуальных средств защиты по ПНД Ф 12.13.1-03 Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения) [132].

При проведении социальной оценки условий труда на рабочем месте, работник вправе обращаться к эксперту, проводящей специальную оценку условий труда с предложениями по осуществлению на его рабочем месте идентификации потенциально вредных и (или) опасных производственных факторов и за получением разъяснений по вопросам проведения специальной оценки условий труда на его рабочем месте Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. N 426-ФЗ "О специальной оценке условий труда" [133].

### **5.2.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны**

Стол в рабочей зоне исследователя должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество. Рабочий стул должен иметь дизайн, исключая онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте. Рабочее место должно соответствовать техническим требованиям и санитарным нормам. При выполнении работ в положении стоя рабочее место и оборудование должны гарантировать прямое и свободное положение корпуса тела, работающего или наклон его вперед не более чем на 15°. Для обеспечения удобного подхода к

столу или оборудованию должно быть предусмотрено пространство для стоп. В помещении должен быть организован воздухообмен. При работе с органами управления установки, все органы управления должны быть в зоне досягаемости моторного поля согласно ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя [134].

Персонал допускается к работе только в средствах индивидуальной защиты. Необходимо знать специфические свойства применяемых веществ и соблюдать установленные правила работы с ними ПНД Ф 12.13.1-03 Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения) [135].

### **5.2.3 Методические рекомендации при работе в аналитических лабораториях**

Согласно ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения) [135] при работе в лабораториях необходимо соблюдение следующих требований:

- На работу в лаборатории принимаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование для решения вопроса о возможности работы в лаборатории.

- Вновь поступающие на работу допускаются к исполнению своих обязанностей только после прохождения вводного инструктажа о соблюдении мер безопасности, инструктажа на рабочем месте и после собеседования по вопросам техники безопасности.

- Периодический инструктаж должен проводиться на рабочем месте дважды в год.

- Все работающие в лаборатории должны быть обеспечены необходимой спецодеждой и средствами индивидуальной защиты.

Работа в лаборатории выполнялась в соответствии с нормативными документами [131,132,136-140].

### 5.3 Производственная безопасность

В процессе исследования с точки зрения возникающих вредных или опасных факторов общий этап работ может быть разделен на три основных этапа:

- 1) Нанесение хромовых покрытий на образцы.
- 2) Проведение высокотемпературного окисления и наводороживание образцов.
- 3) Обработка результатов на персональном компьютере: анализ механических испытаний, зависимости привеса от времени окисления, скорости сорбции от температуры наводороживания и обработка структурно-фазового анализа.

#### 5.3.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования

В таблице 19 представлены вредные и опасные факторы и регулирующие нормативные документы.

**Таблица 19** – Возможные опасные и вредные производственные факторы на рабочем месте при выполнении НИР

№	Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
1	Производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой или низкой температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги тканей организма человека.	ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности;
2	Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий.	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов; ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты;

Продолжение таблицы 19

3	Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего.	СанПиН 1.2.3685–21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания".
4	Производственные факторы связанные с акустическим колебаниями в производственной среде (повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума);	ГОСТ 12.1.003–2014 ССБТ Шум. Общие требования безопасности. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23- 03-2003.
5	Производственные факторы, связанные с отсутствием или недостатком необходимого искусственного освещения;	ГОСТ 12.4.080-79 ССБТ. Светофильтры стеклянные для защиты глаз от вредных излучений на производстве. Технические условия.
6	Опасные производственные факторы, связанные с силами и энергией механического движения;	ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.

**5.3.2 Производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой или низкой температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги тканей организма человека**

В результате неполадок такого электрического оборудования, как высокотемпературная печь ATS 3210 и автоматизированная установка Gas Reaction Controller, которые являются объектом производственной среды, связанные с чрезмерно высокой температурой, способная вызвать ожоги тканей организма человека.

Конструкция производственного оборудования и (или) его размещение должны исключать контакт его горючих частей с пожаровзрывоопасными веществами, если такой контакт может явиться причиной пожара или взрыва, а также исключать возможность соприкосновения работающего с горячими частями или нахождение в непосредственной близости от таких частей, если это может повлечь за собой травмирование, перегрев работающего. Если назначение производственного оборудования и условия его эксплуатации (например, использование вне производственных помещений) не могут

полностью исключить контакт работающего с горячими его частями, то эксплуатационная документация должна содержать требование об использовании средств индивидуальной защиты по ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности [141].

Конструкция производственного оборудования должна исключать опасность, вызываемую разбрызгиванием горячих обрабатываемых и (или) используемых при эксплуатации материалов и веществ. Если конструкция не может полностью обеспечить исключение такой опасности, то эксплуатационная документация должна содержать требования об использовании средств защиты, не входящих в конструкцию [141].

### **5.3.3 Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий**

При нанесении покрытий на образцы, а также при исследовании их структурно-фазового анализа и механических свойств возникает необходимость работы на электрооборудовании, таком как, шлифовально-полировальный станок МР-1В, ионно-плазменная установка, сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) MIRA3, оптический микроскоп AXIOVERT 200MAT, дифрактометр XRD-7000S, и твердомер Pruftechnik KB-30S, вследствие чего возникает вероятность прохождения электрического тока через тело человека. Опасное и вредное воздействия на людей электрического тока проявляются в виде электротравм (судороги, остановка сердца, остановка дыхания, ожоги и др.) и заболеваний. Результат воздействия тока на человека зависит от величины силы тока, его рода и частоты, продолжительности воздействия и множества других факторов. Причиной поражения электрическим током в условиях лаборатории могут стать случайное прикосновение к токоведущим частям или появление напряжения на металлических частях оборудования.

Напряжение прикосновения и токи при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать 8 В и 1 мА, соответственно (постоянный ток) или 2 В, 0,3 мА (переменный ток частотой 50 Гц) согласно 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [142].

Для обеспечения защиты от прямого прикосновения необходимо применение таких технических способов и средств основной защиты, как: основная изоляция, защитное отключение, безопасное расположение токоведущих частей, средства индивидуальной защиты по ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [143].

#### **5.3.4 Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего**

Микроклимат производственных помещений — это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха. Согласно ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. [144] показателями, характеризующими микроклимат, являются: температура воздуха, относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха, интенсивность теплового излучения.

Для создания благоприятных условий работы, соответствующих физиологическим потребностям человеческого организма, санитарные нормы устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия в рабочей зоне помещения. При отклонении от норм микроклиматических показателей возможно временное (в течение рабочей смены) снижение работоспособности, без нарушения здоровья.



Работа, производимая сидя и сопровождающаяся незначительным физическим напряжением, относится к категории Ia [144]. Допустимые нормы микроклимата приведены в таблице 20.

**Таблица 20** – Допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		Диапазон ниже оптимальных значений	Диапазон выше оптимальных значений			Для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	Для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более
Холодный	Ia (до 139)	20,0-21,9	24,1-25,0	19,0-26,0	15-75	0,1	0,1
Теплый	Ia (до 139)	21,0-22,9	25,1-28,0	20,0-29,0	15-75	0,1	0,2

По температуре воздуха в лаборатории соответствует нормам (23 °С). Отопление лаборатории и корпуса в целом водяное с применением радиаторов, что обеспечивает постоянное и равномерное нагревание воздуха в холодное время года. В рабочем помещении имеется как естественная вентиляция, так и принудительная. Для обеспечения оптимальных и допустимых показателей микроклимата в холодный период года следует применять средства защиты рабочих мест от остекленных поверхностей оконных проемов, чтобы не было охлаждения. В теплый период года необходимо предусмотреть защиту от попадания прямых солнечных лучей.

### **5.3.5 Производственные факторы связанные с акустическим колебаниями в производственной среде**

При работе в лаборатории с электрооборудованием и работе вентиляционных систем помещения, возникают звуковые колебания в

диапазоне слышимых частот, которые способны оказать вредное воздействие на безопасность и здоровья работника.

Шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает его утомляемость, а при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности, способен привести к росту ошибок и увеличению продолжительности выполнения задания. Длительное воздействие шума влечет тугоухость работника вплоть до его полной глухоты, увеличению риска артериальной гипертензии, болезней сердечно-сосудистой, нервной системы и др. [145].

В таблице 21 представлены предельно допустимые и допустимые уровни звукового давления, уровни звука, эквивалентные и максимальные скорректированные по А уровни звука в помещениях лаборатории.

**Таблица 21** – Предельно допустимые и допустимые уровни звукового давления, уровни звука, эквивалентные и максимальные скорректированные по А уровни звука в помещениях лаборатории [146], согласно ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

Для источников постоянного шума									Для источников непостоянного шума		
Уровни звукового давления дБ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровень звука, скорректированный по А, L <sub>A</sub>	Эквивалентный скорректированный по А уровень звука, L <sub>A,экв</sub> , дБ	Максимальный скорректированный по А уровень звука, L <sub>п,к</sub> , дБ
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000			
103	91	83	77	73	70	68	66	64	75	75	90

В ходе проведения испытаний, таких как нанесение покрытий, необходимо использовать ионно-плазменную установку, в устройство которой входят насосы. Уровень звука в лаборатории не превышает предельно допустимые уровни. При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства индивидуальной защиты (СИЗ) и средства

коллективной защиты (СКЗ) от шума [145]. Средства индивидуальной защиты: беруши, наушники и т.д.

### **5.3.6 Производственные факторы, связанные с отсутствием или недостатком необходимого искусственного освещения**

Нехватка естественного света оказывает пагубное влияние на нервную систему человека, что может привести к психическим заболеваниям, при нехватке искусственного света человек ощущает апатию и депрессию.

Недостаток освещенности рабочего места пагубно сказывается на зрении человека, его концентрации и т.д. В темных помещениях человек испытывает усталость и сонливость, так как организм стремится уйти в сон. Также недостаточная освещенность ведет к развитию близорукости и дальнозоркости.

Основные требования и значения нормируемой освещенности рабочих поверхностей изложены в СП 52.13330.2016. Выбор освещенности осуществляется в зависимости от размера объёма различения (толщина линии, риски, высота буквы), контраста объекта с фоном, характеристики фона [147].

**Таблица 22 – Требования к освещению рабочего места**

Характеристика зрительной работы	Искусственное освещение				Естественное освещение		Совмещенное освещение		
	Освещённость, лк			Сочетание нормированных величин показателя ослепленности и коэффициента пульсации	КЕО, ед, %				
	При системе комбинированного освещения		При системе общего освещения		При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	
	Всего	В том числе от общего		Р					К <sub>п</sub> , %
1	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Средней точности	500	200	200	40	20	4	1,5	2,4	0,9

### **5.3.7 Опасные производственные факторы, связанные с силами и энергией механического движения**

В ходе проведения исследования используется шлифовально-полировальный станок МР-1В, поэтому, следует рассмотреть факторы, связанные с силами и энергией механического движения, в том числе в поле тяжести:

- падение твердых, сыпучих, жидких объектов на тело работающего;
- падение тела, работающего с одной опорной поверхности на другую, ниже расположенную, в том числе водную (жидкостную);

— режущиеся, колющие, обдирающие, разрывающие, ударяющие части (например, острые кромки, заусенцы и шероховатость на поверхностях заготовок, инструментов и оборудования) твердых объектов, воздействующие на организм работающего при соприкосновении с ним, в том числе за счет энергии движения работающего, а также жала насекомых, зубы, когти, шипы и иные части тела живых организмов, используемые ими для защиты или нападения;

— поверхности твердых или жидких объектов, о которые ударяются движущиеся части тела, работающего;

— движущиеся (в том числе разлетающиеся) твердые, жидкие или газообразные объекты, наносящие удар по телу работающего (в том числе движущиеся машины и механизмы; подвижные части производственного оборудования; передвигающиеся изделия, заготовки, материалы; разрушающиеся конструкции; обрушивающиеся горные породы; падающие деревья и их части; струи и волны, включая цунами; ветер и вихри, включая смерчи и торнадо);

— ударные волны воздушной среды;

При выполнении работа на данной установки, необходимо использовать средства защиты, согласно ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация [148].

#### **5.4 Экологическая безопасность**

**Селитебная зона.** Аварии на АЭС сопровождаются выбросом на огромные расстояния большого количества радиоактивных веществ, что, в свою очередь, сопровождается заражением данной территории. Радиоактивным загрязнением считается присутствие радиоактивных веществ в количестве, превышающем уровни общего загрязнения  $0,4 \text{ Бк/см}^2$  для бета-излучающих радионуклидов ( $\sim 10 \text{ бета-част/см}^2 \cdot \text{мин}$ ) и  $0,04 \text{ Бк/см}^2$  для альфа-излучающих радионуклидов ( $\sim 1 \text{ альфа- част/см}^2 \cdot \text{мин}$ ). Таким образом, чтобы

территория не считалась загрязнённой радиоактивными веществами, норма загрязнений должна быть меньше этих значений [149].

Для защиты населения от аварий такого типа применяются специальные защитные меры при радиационной аварии. Они включают: оповещение; укрытие; использование профилактических лекарственных средств; регулирование доступа в зону аварии и выхода из нее; использование средств индивидуальной защиты; специальную санитарную обработку людей; лечебно-эвакуационные мероприятия; эвакуацию и переселение населения; эвакуацию персонала; санитарно-гигиенический контроль за питанием, водоснабжением, размещением населения.

**Атмосфера.** Источником загрязнения являются газообразные отходы (различного состава радиоактивные газы – от радиоактивных инертных газов до активированных паров воды – собранные в единый бак из различного теплообменного оборудования), прошедшие очистку и фильтрацию, рассеиваемые в атмосфере через вентиляционные трубы.

Должны соблюдаться требования нормативных актов, регулирующих отношения в области охраны атмосферного воздуха.

На АЭС разрабатываются и выполняются мероприятия:

- по организации производственного экологического контроля;
- по регулированию выбросов в атмосферный воздух при неблагоприятных метеорологических условиях;
- по проверке эффективности работы газоочистного оборудования [150].

**Гидросфера.** Радиоактивные отходы образуются главным образом на атомных электростанциях, при обработке ядерного топлива, в ядерных исследовательских центрах. Также идет тепловое загрязнение от использования воды в теплообменном оборудовании.

Должны соблюдаться требования нормативных актов, регулирующих отношения в области охраны водных ресурсов.

Для обеспечения безопасного пользования гидросферой применяются следующие мероприятия:

– оборудование отдельных систем хозяйственно-бытовой и ливневой канализации [150].

**Литосфера.** Основное воздействие работы энергоблока на литосферу происходит от захоронения отработавшего ядерного топлива, но также сюда можно включить влияние сточных вод.

При этом должны соблюдаться требования нормативных правовых актов, регулирующих отношения в области охраны земельных ресурсов и недр в соответствии с законами.

При эксплуатации АЭС должна вестись работа по охране земель от загрязнения, а также обеспечиваться рекультивация деградированных и загрязненных земель.

Для территорий промплощадок АЭС организован контроль режима температуры и химического загрязнения близлежащих к поверхности горизонтов грунтовых вод [150].

## **5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **5.5.1 Анализ возможных ЧС**

*Радиационная авария* – нарушение эксплуатации атомной станции, при котором произошел выход радиоактивных веществ и/или ионизирующего излучения за предусмотренные проектом для нормальной эксплуатации границы в количествах, превышающих установленные пределы безопасной эксплуатации.

Нормативная документация, регулирующая деятельность по предотвращению и минимизации последствий ЧС с выбросами радиации на АЭС представлена следующими документами: [151,152].

Источником ионизирующего излучения выступает ядерное топливо, но при возникновении ЧС все материалы и агрегаты первого контура АЭС, получившие наведенную активность при эксплуатации, будут представлять радиационную опасность.

*Пожар.* На АЭС действуют правила, которые устанавливают требования по пожарной безопасности. Согласно ГОСТ Р 22.3.03-94. Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения [151] помещение БЩУ к категории пожароопасности В4. Горючими материалами выступают: строительные материалы, изоляция электрооборудования, мебель. Источниками возгорания могут стать горючие газы, электрооборудования, проводка.

### 5.5.2 Наиболее вероятная ЧС

*Радиационная авария.* Радиационную оценку эффективности методов защиты от ионизирующего излучения можно провести приблизительно по расстоянию от энергоблока, на котором произошла ЧС, и по мощности этого энергоблока, используя таблицу 23.

**Таблица 23** – Рекомендуемые размеры границ зон радиоактивного загрязнения

Номер зоны, в порядке удаления ее внешней границы от АЭС	Предполагаемый максимальный радиус (км)	
	Тепловая мощность $\geq$ 1000 МВт	Тепловая мощность <1000 МВт
1	3-5	
2	10-30	
3	100	50
4	300	100

Оценив в какой зоне, находится убежище, следует сравнить проектные величины радиационного загрязнения для конкретного случая радиационной ЧС и значения допустимых эффективных доз, исходя из выбранного мероприятия по радиационной защите и дозовых коэффициентов для зоны номер 2:

– Укрытие в жилых домах и прочих необорудованных для целей радиационной защиты зданиях. Эффективная доза от почвенной радиации при



этом уменьшится на 0,4, от внешнего облучения проходящего мимо облака выброса – на 0,6 и от вдыхания воздуха – на 0,5.

– Укрытие в убежищах и противорадиационных укрытиях. Это приведет к уменьшению эффективной дозы от почвенной радиации на 0,02, от внешнего облучения проходящего мимо облака выброса – на 0,3 и от вдыхания воздуха – на 0,2 [153].

## **5.6 Заключение по разделу «Социальная ответственность»**

Значение всех производственных факторов на изучаемом рабочем месте соответствует нормам, которые также были продемонстрированы в данном разделе.

Конструкция производственного оборудования исключает опасность, вызываемую разбрызгиванием горячих обрабатываемых и (или) используемых при эксплуатации материалов и веществ. Если конструкция не может полностью обеспечить исключение такой опасности, то эксплуатационная документация должна содержать требования об использовании средств защиты, не входящих в конструкцию [141].

Напряжение прикосновения и токи при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не превышают 8 В и 1 мА, соответственно (постоянный ток) или 2 В, 0,3 мА (переменный ток частотой 50 Гц) согласно 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [142].

Категория тяжести труда в лаборатории по СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" относится к категории Ia (работы, производимая сидя и сопровождающаяся незначительным физическим напряжением) [144].

Уровень звука в лаборатории не превышает предельно допустимые уровни. При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть

средства индивидуальной защиты (СИЗ) и средства коллективной защиты (СКЗ) от шума [145].

На АЭС действуют правила, которые устанавливают требования по пожарной безопасности. Согласно ГОСТ Р 22.3.03-94. Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения [151] помещение БЩУ к категории пожароопасности В4. Горючими материалами выступают: строительные материалы, изоляция электрооборудования, мебель. Источниками возгорания могут стать горючие газы, электрооборудования, проводка.

## Заклучение

Нанесение хромового покрытия методом магнетронного распыления было применено для повышения коррозионной стойкости лазерно-лучевых сварных швов из циркониевого сплава Э110. Благодаря росту внешнего защитного оксидного слоя хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , кинетика окисления образцов с Cr-покрытием имела параболическую зависимость, которая обычно наблюдается при диффузионно-контролируемом окислении металлов. Тем не менее, изменения в микроструктуре поперечного сечения вследствие стабилизации твердых и хрупких пластин  $\alpha\text{-Zr(O)}$  в первичных зернах  $\beta\text{-Zr}$  могут вызвать упрочнение сварного шва и увеличение его модуля упругости. При этом хрупкого разрушения образцов с Cr-покрытием обнаружено не было, в то время как образец без покрытия имел хрупкое разрушение после 2 мин высокотемпературного окисления.

Наводороживание ЛЛШ из циркониевого сплава Э110 с Cr-покрытием из циркониевого сплава Э110 проводилось при 360-900 °С в чистом водороде (2 бар). Было установлено, что Cr-покрытие уменьшает скорость сорбции водорода и обеспечивает более высокую энергию активации сорбции водорода (70 кДж/моль) по сравнению с образцами без покрытия (61 кДж/моль). После наводороживания при 900 °С не наблюдалось растрескивания или отслоения Cr-покрытия. Также наводороживание образцов приводит к образованию хрупких  $\delta$ -гидридов, концентрация и ориентация которых зависит от условий наводороживания и исходной микроструктуры. Гидриды ориентированы в основном в продольном направлении в ОС, в то время как гидриды циркония образуются в поперечном направлении в СШ. Механизм выпадения гидридов аналогичен при температурах 360 и 450 °С. Доля и размер гидридов увеличивается с ростом концентрации водорода, а направление их роста определяется кристаллографической текстурой и ориентацией границ зерен. Водород быстро диффундирует при 900 °С, и гидриды образуются в результате  $\beta \rightarrow \delta$

фазового превращения. Полученная микроструктура зависит от концентрации водорода в сплаве, которая может быть значительно выше для образцов с Cr-покрытием из-за замедления десорбции водорода при охлаждении. Также установлено, что образование гидридов вызывает потерю пластичности при высоких их концентрациях.

## Список литературы

1. Duan Z., Yang H., Satoh Y., Murakami K., Kano S., Zhao Z., Shen J., Abe H. Current status of materials development of nuclear fuel cladding tubes for light water reactors // Nuclear Engineering and Design. – 2017. – Vol. 316. – P. 131–150.
2. Kim C., Tang C., Grosse M., Maeng Y., Jang C., Steinbrueck M. Oxidation mechanism and kinetics of nuclear-grade FeCrAl alloys in the temperature range of 500–1500 °C in steam // Journal of Nuclear Materials. – 2022. – Vol. 564, No. 153696. – P. 1–15.
3. Doyle P., Sun K., Snead L., Katoh Y., Bartels D., Zinkle S., Raiman S. The effects of neutron and ionizing irradiation on the aqueous corrosion of SiC // Journal of Nuclear Materials. – 2020. – Vol. 536, No. 152190. – P. 1–12.
4. Steinbrueck M., Grosse, M.; Stegmaier, U.; Braun, J.; Lorrette, C. Oxidation of silicon carbide composites for nuclear applications at very high temperatures in steam // Coatings. – 2022. – Vol. 12. – P. 875.
5. Yang, J., Wu, X., Wu, L., Zhong, Y., Xin, H., Chen, Q., Zhang, W., Yang, J., Zhu, C., Ning, Z., Liu, N., Yang, J. Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Al<sub>x</sub>CrMoNbZr multiprincipal element alloy coatings for accident-tolerant fuel claddings: Effect of Al content // Surface and Coatings Technology. – 2022. – Vol. 444, No. 128656.
6. Shen, S., Wu, Z., Wang, Y., Xu, C., Xu, J., Wu, J., Yan, Y., Liu, P., Wang, H., Fu, E. Microstructure and radiation stability of nano-dispersoids in particle-reinforced FeCrAl alloys with different Zr concentrations // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 925, No. 166625.
7. Sartowska, B., Starosta, W., Waliś, L., Smolik, J., Pańczyk, E. Multi-elemental coatings on zirconium alloy for corrosion resistance improvement // Coatings. – 2022. – Vol. 12, No. 1112.
8. Yook, H., Lee, Y. Post-LOCA ductility assessment of Zr-Nb Alloy from 1100 to 1300 °C to explore variable peak cladding temperature and equivalent

cladding reacted safety criteria // Journal of Nuclear Materials. – 2022. – Vol. 567, No. 153829.

9. Le Saux, M., Brachet, J.C., Vandenberghe, V., Ambard, A., Chosson, R. Breakaway oxidation of zirconium alloys exposed to steam around 1000 °C. // Corrosion Science. – 2020. – Vol. 176, No. 108936.

10. Brachet, J.C., Le Saux, M., Bischoff, J., Palancher, H., Chosson, R., Pouillier, E., Guilbert, T., Urvoy, S., Nony, G., Vandenberghe, T., Lequien, A., Miton, C., Bossis, P. Evaluation of equivalent cladding reacted parameters of Cr-coated claddings oxidized in steam at 1200 °C in relation with oxygen diffusion/partitioning and post-quench ductility // Journal of Nuclear Materials. – 2020. – Vol. 533, No. 152106.

11. Brachet, J.C., Rouesne, E., Ribis, J., Guilbert, T., Urvoy, S., Nony, G., Toffolon-Masclet, C., Le Saux, M., Chaabane, N., Palancher, H., David, A., Bischoff, J., Augereau, J., Pouillier, E. High temperature steam oxidation of chromium-coated zirconium-based alloys: Kinetics and process // Corrosion Science. – 2020. – Vol. 167, No. 108537.

12. Sidelev, D., Kashkarov, E., Grudin, V., Krinitcyn, M. High-temperature oxidation of Cr-coated laser beam welds made from E110 zirconium alloy // Corrosion Science. – 2022. – Vol. 195, No. 110018.

13. Sidelev, D., Ruchkin, S., Kashkarov, E. High-temperature oxidation of Cr-coated resistance upset welds made from E110 alloy // Coatings. – 2021. – Vol. 11. – P. 577.

14. Yang, J., Steinbrück, M., Tang, C., Große, M., Liu, J., Zhang, J., Yun, D., Wang, S. Review on chromium coated zirconium alloy accident tolerant fuel cladding // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 895, No. 162450.

15. Kashkarov, E., Aforu, B., Sidelev, D., Krinitcyn, M., Gouws, V., Lider, A. Recent advances in protective coatings for accident tolerant Zr-based fuel claddings // Coatings. – 2021. – Vol. 11. – P. 557.

16. Steinbrück, M., Stegmaier, U., Große, M., Czerniak, L., Lahoda, E., Daum, R., Yueh, K. High-temperature oxidation and quenching of chromium-coated

zirconium alloy ATF cladding tubes with and w/o pre-damage // *Journal of Nuclear Materials*. – 2022. – Vol. 559, No. 153470.

17. J.C. Brachet, I. Idarraga-Trujillo, M. Flem, M. Saux, V. Vandenberghe, S. Urvoy, E. Rouesne, T. Guilbert, C. Toffolon-Masclet, M. Tupin, C. Phalippou, F. Lomello, F. Schuster, A. Billard, G. Velisa, C. Ducros, F. Sanchette, Early studies on Cr-coated zircaloy-4 as enhanced accident tolerant nuclear fuel claddings for light water reactors // *Journal of Nuclear Materials*. – 2019. – Vol. 517. – P. 268–285.

18. Krejčí, J., Kabátová, J., Manoch, F., Kocí, J., Cvrcek, L., Málek, J., Krum, S., Šutta, P., Bublíková, P., Halodová, P., Namburi, H., Ševecek, M. Development and testing of multicomponent fuel cladding with enhanced accidental performance // *Journal of Nuclear Engineering and Technology*. – 2020. – Vol. 52. – P. 597–609.

19. Park, J.H., Kim, H.G., Park, J., Jung, Y.I., Park, D.J., Koo, Y.H. High temperature steam-oxidation behavior of arc ion plated Cr coatings for accident tolerant fuel claddings // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 280. – P. 256–259.

20. Chen, Q., Xiang, Y., Li, Z., He, H., Zhong, Y., Zhu, C., Liu, N., Yang, Y., Liao, J., Chang, H. Microstructure evolution and adhesion properties of thick Cr coatings under different thermal shock temperatures // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 417, No. 127224.

21. Sidelev, D.V., Kashkarov, E.B., Syrtanov, M.S., Krivobokov, V.P. Nickel-chromium (Ni-Cr) coatings deposited by magnetron sputtering for accident tolerant nuclear fuel claddings // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 369. – P. 69–78.

22. Yeom, H., Maier, B., Johnson, G., Dabney, T., Lenling, M., Sridharan, K. High temperature oxidation and microstructural evolution of cold spray chromium coatings on zircaloy-4 in steam environments // *Journal of Nuclear Materials*. – 2019. – Vol. 526, No. 151737.

23. Maier, B., Yeom, H., Johnson, G., Dabney, T., Walters, J., Xu, P., Romero, J., Shah, H., Sridharan, K. Development of cold spray chromium coatings

for improved accident tolerant zirconium-alloy cladding // *Journal of Nuclear Materials*. – 2019. – Vol. 519. – P. 247–254.

24. Zielinski, A., Sobieszczyk, S. Hydrogen-enhanced degradation and oxide effects in zirconium alloys for nuclear applications // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2011. – Vol. 36. – P. 8619–8629.

25. Motta, A.T., Capolungo, L., Chen, L.Q., Cinbiz, M.N., Daymond, M.R., Koss, D.A., Zikry, M.A. Hydrogen in zirconium alloys: a review // *Journal of Nuclear Materials*. – 2019. – Vol. 518. – P. 440–460.

26. Motta, A.T., Chen, L.Q., Hydride formation in zirconium alloys // *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. – 2012. – Vol. 64. – P. 1403–1408.

27. Desquines, J., Drouan, D., Guilbert, S., Lacote, P., Embrittlement of pre-hydrated zircaloy-4 by steam oxidation under simulated LOCA transients // *Journal of Nuclear Materials*. – 2016. – Vol. 469. – P. 20–31.

28. Pshenichnikov, A., Stuckert, J., Walter, M., Microstructure and mechanical properties of zircaloy-4 cladding hydrogenated at temperatures typical for loss-of-coolant accident (LOCA) conditions // *Nuclear Engineering and Design*. – 2015. – Vol. 283. – P. 33–39.

29. Hong, L.T., Turque, I., Brachet, J.C., Crépin, J., André, G., Barres, Q., Saux, M. L. Phase transformations during cooling from the  $\beta$ Zr phase temperature domain in several hydrogen-enriched zirconium alloys studied by in situ and ex situ neutron diffraction // *Acta Materialia*. – 2020. – Vol. 199. – P. 453–468.

30. Slobodyan, M. Resistance, electron- and laser-beam welding of zirconium alloys for nuclear applications: A review // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2021. – Vol. 53. – P. 1049–1078.

31. Tao, W., Cai, C., Li, L., Chen, Y., Ling W. Y. Pulsed laser spot welding of intersection points for Zircaloy-4 spacer grid assembly // *Materials & Design*. – 2013. – Vol. 52. – P. 487–494.

32. Cai, C., Li, L., Tao, W., Peng, G., Wang, X. Weld bead size, microstructure and corrosion behavior of zirconium alloys joints welded by pulsed



laser spot welding // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2016. – Vol. 25. – P. 3783–3792.

33. Elkin, M., Kiselev, A., Slobodyan, M. Pulsed laser welding of Zr1%Nb alloy // Nuclear Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 51. – P. 776-783.

34. Lupakov, I., Rodchenkov, B., Vukolova, V., Tyurin, V. Structure and phase composition of weldments in the Zr–2.5Nb alloy // Metal Science and Heat Treatment. – 1973. – Vol. 15. – P. 379–381.

35. Blackburn, J. 3—Laser Welding of Metals for Aerospace and Other Applications // Welding and Joining of Aerospace Materials. – 2012. – P. 75–108.

36. Jeong, Y.H., Kim, H.G., Kim, T.H. Effect of  $\beta$  phase, precipitate and Nb-concentration in matrix on corrosion and oxide characteristics of Zr–xNb alloys // Journal of Nuclear Materials. – 2003. – Vol. 317. P. 1–12.

37. Wu, L., Kharchenko, V.O., Kong, X., Kharchenko, D.O. DFT calculations of solute-vacancy binding in Zirconium-based Zr–Nb–Sn alloy // Nuclear Materials and Energy. – 2022. – Vol. 32, No. 101221.

38. Northwood, D.O. The development and applications of zirconium alloys // Materials & Design. – 1985. – Vol. 6. – P. 58.

39. Lemaignan, C. Zirconium alloys: properties and characteristics // Comprehensive nuclear materials. – 2012. – Vol. 2. – P. 217–232.

40. Dey, G.K., Banerjee, S., Mukhopadhyay, P.J. Formation of GammaHydride in Alpha and Beta Zirconium Alloys // Le Journal de Physique Colloques. – 1982. – Vol. 43. – P. 327.

41. Lingamurty, K., Charit, I. Texture development and anisotropic deformation of zircalloys // Progress in Nuclear Energy. – 2006. – Vol. 48. – P. 325.

42. Cheadle, B.A. The development of Zr-2.5Nb pressure tubes for CANDU reactors // 16th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry. – 2010. – P. 67–87.

43. Suzuki, H., Hashimoto, T., Matsuda, H. Electron-beam welding for pure zirconium and Zircaloy-2 alloy // Journal of the Japan Welding Society. – 1962. – Vol. 31. – P. 44–52.

44. Cheadle, B.A., Coleman, C.E., Licht, H. CANDU-PHW Pressure Tubes: Their Manufacture, Inspection, and Properties // Nuclear Technology. – 1982. – Vol. 57. – P. 413.
45. Murty, K.L., Charit, I. Texture development and anisotropic deformation of zircalloys // Progress in Nuclear Energy. – 2006. – Vol. 48. – P. 325.
46. Raj, B., Mudali, U.K. Materials development and corrosion problems in nuclear fuel reprocessing plants // Progress in Nuclear Energy. – 2006. – Vol. 48. – P. 283–313.
47. Selmi, N., Sari, A. Study of oxidation kinetics in air of zircaloy-4 by in situ X-ray diffraction // Advances in Materials Physics and Chemistry. – 2013. – Vol. 3. – P. 168.
48. Azevedo, C. Selection of fuel cladding material for nuclear fission reactors // Engineering Failure Analysis. – 2011. – Vol. 18, No. 8. – P. 1943–1962.
49. Slobodyan, M. High-energy surface processing of zirconium alloys for fuel claddings of water-cooled nuclear reactors // Nuclear Engineering and Design. – 2021. – Vol. 382. – P. 111364.
50. Sabol, G.P., Schoenberger, G., Balfour, M.G. Improved PWR Fuel Cladding (IAEA-TECDOC-665) // International Atomic Energy Agency. – 1992. – P. 122.
51. Castaldelli, L., Fizzotti, C., Lunde, L. Long-term test results of promising new zirconium alloys // Zirconium in the Nuclear Industry: Proceedings of the 5th International Conference. – 1982. – P. 105-126.
52. Reshetnikov, F.G. Design, production and operation of fuel rods of power reactors // Two Volumes. – 1995. – Vol. 2.
53. Dobromyslov, A.V., Taluts, N.I. The Structure of Zirconium and its Alloys // Fizika Metallov i Metallovedenie. – 1995. – Vol. 79, No. 6. – P. 3–27.
54. Thermophysical Properties Database of Materials for Light Water Reactors and Heavy Water Reactors // International Atomic Energy Agency. – 2006.
55. Banerjee, S., Mukhopadhyay, P. Phase Transformations. Examples from Titanium and Zirconium Alloys // Elsevier Science. – 2007. – Vol. 12.

56. Nikulin, S.A. Zirconium Alloys for Nuclear Power Reactors // MISiS. – 2007.
57. Nikulina, A.V., Malgin, A.G. Impurities and their effect on the structure and properties of zirconium parts in nuclear reactors // Atomic Energy. – 2008. – Vol. 105. – P. 328–339.
58. Kelly, P.M., Smith, P.D. Strain-ageing in zirconium-oxygen alloys // Journal of Nuclear Materials. – 1973. – Vol. 46, No. 1. – P. 23-34.
59. Charquet, D., Hahn, R., Ortlieb, E., Gros, J. P., Wadier, J. F. In Zirconium in the Nuclear Industry // 8th Symposium, ASTM International: Conshohocken. – 1989. – P. 405–422.
60. Mardon, J. P., Charquet, D., Senevat, J. In Zirconium in the Nuclear Industry // 12th International Symposium, ASTM International: Conshohocken. – 2000. – P. 505–524.
61. Terrani, K.A., Accident tolerant fuel cladding development: Promise, status, and challenges // Journal of Nuclear Materials. – 2018. – Vol. 501. – P. 13–30.
62. AWS A5.24. Specification for zirconium and zirconium-alloy welding electrodes and rods. – 2014.
63. Russian Technical Specification OST 95 503-2006. Welded and brazed joints of parts of nuclear reactor cores. General technical requirements. Acceptance rules and quality control method. – 2006.
64. Komuro, K. Welding of zirconium alloys // Welding International. – 1994. – Vol. 8. – P. 141–148.
65. Blashchuk, V.E. Zirconium: alloys, welding, application (review) Automatic Welding. – 2005. – Vol. 7. – P. 36-43.
66. Rudling, P., Strasser, A., Garzarolli, F. Welding of zirconium alloys: zirats special topic report // ANT International. – 2007.
67. Slobodyan, M.S. Methods of creation of permanent zirconium alloy joints in reactor art: a review Tsvetnye Metally. – 2016. – Vol. 10. – P. 91–98.

68. Kim, S.S., Lee, C.Y., Yang, M.S. Investigation on Nd:YAG laser weldability of Zircaloy-4 end cap closure for nuclear fuel elements // Journal of the Korean Nuclear Society. – 2001. – Vol. 33, No. 2. – P. 175–183.

69. Kim, S.S., Lee, J.W., Koh, J.H., Lee, Y.H. Technology of the end cap laser welding for irradiation fuel rods // Journal of the Korean Nuclear Society. – 2003. – Vol. 21, No. 6. – P. 626–631.

70. Goncharov, G.B., Grabin, V.F., Korol, A.M., Adeeva, L.I. Structure and properties of welded joints in laser and arc welding Zr-2.5%Nb alloy // Welding International. – 1993. – Vol. 7, No. 10. – P. 798–801.

71. Song, K.N., Hong, S.D., Lee, S.H., Park, H.Y. Effect of mechanical properties in the weld zone on the structural analysis results of a plate-type heat exchanger prototype and pressurized water reactor spacer grid // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2012. – Vol. 49, No. 9. – P. 947–960.

72. Song, K.N., Lee, S.H. Effect of weld properties on the crush strength of the PWR spacer grid // Science and Technology of Nuclear Installations. – 2012, No. 540285.

73. Jeong, D.H., Kim, J.H., Park, J.K., Jeon, K.L., Lee, S.K., Suh, J.M. Fatigue characteristics of laser welded Zircaloy thin sheet // International Journal of Modern Physics. – 2012. – Vol. 6. – P. 367–372.

74. Hu, L., Zhou, D., Jia, X., Lu, Y., Tan, Z., Jiang, D. Numerical simulation and laser butt welding of Zr-Sn-Nb-Fe zirconium alloy sheets // Zhongguo Jiguang/Chinese Journal of Lasers. – 2016. – Vol. 43, No. 7.

75. Cai, C., Li, L., Peng, G. Comparative study of oxides formed on fusion zone and base metal of laser welded Zr-1.0Sn-1.0Nb-0.1Fe alloy // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2019. – Vol. 28, No. 2. – P. 1161–1172.

76. Slobodyan, M.S., Pavlov, S.K., Remnev, G.E. Corrosion and high-temperature steam oxidation of E110 alloy and its laser welds after ion irradiation Corrosion Science. – 2019. – Vol. 152. – P. 60–74.

77. Slobodyan, M.S., Kudiiarov, V.N., Lider, A.M. Effect of energy parameters of pulsed laser welding of Zr-1%Nb alloy on metal contamination with

gases and properties of welds // Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 45. – P. 472–490.

78. Lancaster, J.F. The Physics of Welding // Physics in technology. – 1984. – Vol. 15, No. 2. – P. 73.

79. Zinkle, S.J., Was, G., Materials challenges in nuclear energy. Acta Materialia. – 2013. – Vol. 61. – P. 735–758.

80. Terrani, K.A., Zinkle, S.J., Snead, L.L. Advanced oxidation-resistant iron-based alloys for LWR fuel cladding // Journal of Nuclear Materials. – 2014. – Vol. 448. – P. 420–435.

81. Tang, C., Stueber, M., Seifert, H.J., Steinbrueck, M. Protective coatings on zirconium-based alloys as accident-tolerant fuel (ATF) claddings // Corrosion Reviews. – 2017. – Vol. 35. – P. 141–165.

82. Tang, C., Steinbrueck, M., Stueber, M., Grosse, M., Yu, X., Ulrich, S., Seifert, H.J. Deposition, characterization and high-temperature steam oxidation behavior of single-phase Ti<sub>2</sub>AlC-coated Zircaloy-4 // Corrosion Science. – 2018. – Vol. 135. – P. 87–98.

83. Tunes, M.A., Harrison, R.W., Donnelly, S.E., Edmondson, P.D. A Transmission Electron Microscopy study of the neutron-irradiation response of Ti-based MAX phases at high temperatures // Acta Materialia. – 2019. – Vol. 169. – P. 237–247.

84. Tang, C., Große, M., Ulrich, S., Klimenkov, M., Jäntschi, U., Seifert, H.J., Stüber, M., Steinbrück, M., High-temperature oxidation and hydrothermal corrosion of textured Cr<sub>2</sub>AlC-based coatings on zirconium alloy fuel cladding // Surface and Coatings Technology. – 2021. – Vol. 419 – P. 127263.

85. Michau, A., Maury, F., Schuster, F., Nuta, I., Gazal, Y., Boichot, R., Pons, M. Chromium Carbide Growth by Direct Liquid Injection Chemical Vapor Deposition in Long and Narrow Tubes, Experiments, Modeling and Simulation // Coatings. – 2018. – Vol. 8. – P. 220.

86. Gigax, J.G., Kennas, M., Kim, H., Wang, T., Maier, B.R., Yeom, H., Johnson, G.O., Sridharan, K., Shao, L., Radiation response of Ti<sub>2</sub>AlC MAX phase

coated Zircaloy-4 for accident tolerant fuel cladding // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – Vol. 523. – P. 26–32.

87. Xiao, W., Deng, H., Zou, S., Ren, Y., Tang, D., Lei, M., Xiao, C., Zhou, X., Chen, Y., Effect of roughness of substrate and sputtering power on the properties of TiN coatings deposited by magnetron sputtering for ATF // Journal of Nuclear Materials. – 2018. – Vol. 509. – P. 542-549.

88. Maksakova, O.V., Webster, R.F., Tilley, R.D., Ivashchenko, V.I., Postolnyi, B.O., Bondar, O.V., Takeda, Y., Rogoz, V.M., Sakenova, R.E., Zukowski, P.V., Opielak, M., Beresnev, V.M., Pogrebnyak, A.D. Nanoscale architecture of (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) nanocomposite coatings: Microstructure, composition, mechanical properties and first-principles calculations // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 831. – P. 154808.

89. Han, X., Xue, J., Peng, S., Zhang, H. An interesting oxidation phenomenon of Cr coatings on Zry-4 substrates in high temperature steam environment // Corrosion Science. – 2019. – Vol. 156. – P. 117–124.

90. Kim, H.G., Kim, I.H., Jung, Y.I., Park, D.J., Park, J.Y., Koo, Y.H. High-temperature oxidation behavior of Crcoated zirconium alloy, in: Proceeding of LWR Fuel Performance Meeting/TopFuel. – 2013. – P. 842–846.

91. Wang, Y., Zhou, W., Wen, Q., Ruan, X., Luo, F., Bai, G., Qing, Y., Zhu, D., Huang, Z., Zhang, Y., Liu, T., Li, R. Behavior of plasma sprayed Cr coatings and FeCrAl coatings on Zr fuel cladding under loss-of-coolant accident conditions // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Vol. 344. – P. 141–148.

92. Kim, J.M., Ha, T.H., Kim, I.H., Kim, H.G. Microstructure and oxidation behavior of CrAl laser-coated Zircaloy-4 alloy // Metals. – 2019. – Vol. 7. – P. 59.

93. Kim, J.M., Ha, T.H., Park, J.S., Kim, H.G., Effect of laser surface treatment on the corrosion behavior of FeCrAl coated TZM alloy // Metals. – 2016. – Vol. 6. – P. 29.

94. Massey, C.P., Terrani, K.A., Dryepontdt, S.N., Pint, B.A. Cladding burst behavior of Fe-based alloys under LOCA // Journal of Nuclear Materials. – 2016. – Vol. 470. – P. 128–138.

95. Richardson, P., Cuskelly, D., Brandt, M., Kisi, E. Microstructural analysis of in-situ reacted Ti<sub>2</sub>AlC MAX phase composite coating by laser cladding // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 385. – P. 125360.
96. Lei, Y., Chen, L., Zhang, J., Xue, F., Bai, G., Zhang, Y., Liu, T., Li, R., Li, S., Wang, J. Influence of Al concentration on mechanical property and oxidation behavior of Zr-Al-C coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 372. – P. 65–71.
97. Al-Olayyan, Y., Fuchs, G.E., Baney, R., Tulenko, J., The effect of Zircaloy-4 substrate surface condition on the adhesion strength and corrosion of SiC coatings // *Journal of Nuclear Materials*. – 2005. – Vol. 346. – P. 109–119.
98. Meng, C., Yang, L., Wu, Y., Tan, J., Dang, W., He, X., Ma, X. Study of the oxidation behavior of CrN coating on Zr alloy in air // *Journal of Nuclear Materials*. – 2019. – Vol. 515. – P. 354–369.
99. Han, X., Wang, Y., Peng, S., Zhang, H., Oxidation behavior of FeCrAl coated Zry-4 under high temperature steam environment // *Corrosion Science*. – 2019. – Vol. 149. – P. 45–53.
100. Zhong, W., Mouche, P.A., Han, X., Heuser, B.J., Mandapaka K.K., Was, G.S. Performance of iron–chromium–aluminum alloy surface coatings on Zircaloy 2 under high-temperature steam and normal BWR operating conditions // *Journal of Nuclear Materials*. – 2016. – Vol. 47. – P. 327-338.
101. Pint, B.A., Terrani, K.A., Brady, M.P., Cheng, T., Keiser, J.R., High temperature oxidation of fuel cladding candidate materials in steam–hydrogen environments // *Journal of Nuclear Materials*. – 2013. – Vol. 440. – P. 420-427.
102. Kim, H.G., Kim, I.H., Jung, Y.I., Park, D.J., Park, J.Y., Koo, Y.H. Adhesion property and high-temperature oxidation behavior of Cr-coated Zircaloy-4 cladding tube prepared by 3D laser coating // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – Vol. 465. – P. 531–539.
103. Qi, F., Liu, Z., Li, Q., Yu, H., Chen, P., Li, Y., Zhou, Y., Ma, C., Tang, C., Huang, Y., Zhao, B., Lu, H. Pellet-cladding mechanical interaction analysis of

Cr-coated Zircaloy cladding // Nuclear Engineering and Design. – 2020. – Vol. 367. – P. 110792.

104. Arias, D., Abriata, J.P. The Cr– Zr (Chromium-Zirconium) system // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. – 1986. – Vol. 7. – P. 237–244.

105. Brachet, J.C., Idarraga-Trujillo, I., Le Flem, M., Le Saux, M., Vandenberghe, V., Urvoy, S., Rouesne, E., Guilbert, T., Toffolon-Masclet, C., Tupin, M., Phalippou, C., Lomello, F., Schuster, F., Billard, A., Velisa, G., Ducros, C., Sanchette, F. Early studies on Cr-Coated Zircaloy-4 as enhanced accident tolerant nuclear fuel claddings for light water reactors // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – Vol. 517. – P. 268–285.

106. Bischoff, J., Vauglin, C., Delafoy, C., Barberis, P., Perche, D., Guerin, B., Vassault, J., Brachet, J.C. Development of Cr-coated zirconium alloy cladding for enhanced accident tolerance // Topfuel 2016-Light Water Reactor (LWR) Fuel Performance Meeting. – 2016. – P. 1165–1171.

107. Oelrich, R., Ray, S., Karoutas, Z., Xu, P., Romero, J., Shah, H., Lahoda, E., Boylan, F. Overview of westinghouse lead accident tolerant fuel program // Proceedings of the TOP FUEL 2018 Conference. – 2018. – P. A0036.

108. Idarraga-Trujillo, I., Le Flem, M., Brachet, J.C., Le Saux, M., Hamon, D., Muller, S., Vandenberghe, V., Tupin, M., Papin, E., Monsifrot, E. Assessment at CEA of coated nuclear fuel cladding for LWRs with increased margins in LOCA and beyond LOCA conditions // Top Fuel. – 2013. – Vol. 2. – P. 15–19.

109. Liu, H., Feng, Y., Yao, Y., Li, B., Wang, R., Shi, X., Li, P., Shu, J., Huang, F., Huang, Q., Ge, F. Effect of the 345 °C and 16.5 MPa autoclave corrosion on the oxidation behavior of Cr-coated zirconium claddings in the high-temperature steam // Corrosion Science. – 2021. – Vol. 189. – P. 109608.

110. Brachet, J., Le Saux, M., Le Flem, M., Urvoy, S., Rouesne, E., Guilbert, T., Cobac, C., Lahogue, F., Rousselot, J., Tupin, M. On-going studies at CEA on chromium coated zirconium based nuclear fuel claddings for enhanced accident tolerant LWRs fuel // TopFuel 2015-Reactor Fuel Performance Meeting. – 2015. – P. 13–19.



111. Ševeček, M., Gurgun, A., Seshadri, A., Che, Y., Wagih, M., Phillips, B., Champagne, V., Shirvan, K. Development of Cr cold spray-coated fuel cladding with enhanced accident tolerance // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2018. – Vol. 50. – P. 229–236.
112. Royer, L., Ledoux, X., Mathieu, S., Steinmetz, P. On the Oxidation and Nitridation of Chromium at 1300 C // *Oxidation of Metals*. – 2010. – Vol. 74. – P. 79–92.
113. Hänsel, M., Quadackers, W.J., Young, D.J. Role of Water Vapor in Chromia-Scale Growth at Low Oxygen Partial Pressure // *Oxidation of Metals*. – 2003. – Vol. 59. – P. 285–301.
114. Alrwashdeh, M., Alameri, S.A. SiC and FeCrAl as Potential Cladding Materials for APR-1400 Neutronic Analysis // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 10. – P. 3772.
115. Steinbrück, M. Prototypical experiments relating to air oxidation of Zircaloy-4 at high temperatures // *Journal of Nuclear Materials*. – 2009. – Vol. 392. – P. 531–544.
116. Steinbrück, M., Oliveira da Silva, F., Grosse, M. Oxidation of Zircaloy-4 in steam-nitrogen mixtures at 600–1200 °C // *Journal of Nuclear Materials*. – 2017. – Vol. 490. – P. 226–237.
117. Caplan, D., Sproule, G.I. Effect of oxide grain structure on the high-temperature oxidation of Cr // *Oxidation of Metals*. – 1975. – Vol. 9. – P. 459–472.
118. Kashkarov, E.B., Sidelev, D.V., Syrtanov, M.S., Tang, C., Steinbrück, M. Oxidation kinetics of Cr-coated zirconium alloy: Effect of coating thickness and microstructure // *Corrosion Science*. – 2020. – Vol. 175. – P. 108883.
119. Druffel, T., Buazza, O., Lattis, M., Farmer, S., Spencer, M., Mandzy, N., Grulke, E.A. The role of nanoparticles in visible transparent nanocomposites // *The International Society for Optical Engineering*. – 2008. – Vol. 7030. – P. 70300.
120. Jiang, J., Du, M., Pan, Z., Yuan, M., Ma, X., Wang, B. Effects of oxidation and inter-diffusion on the fracture mechanisms of Cr-coated Zry-4 alloys:

An in situ three-point bending study // *Materials & Design*. – 2021. – Vol. 212. – P. 110168.

121. Jiang, J., Du, M., Ma, X. On the microstructures and cracking modes of Cr-coated Zr-4 alloys oxidized and vacuum-annealed at 1000 °C // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – Vol. 908. – P. 1646110.

122. Wang, C., Zinkevich, M., Aldinger, F. On the thermodynamic modeling of the Zr-O system // *Calphad*. – 2004. – Vol. 28. – P. 281–292.

123. Kashkarov, E.B., Nikitenkov, N.N., Sutygina, A.N., Syrtanov, M.S., Vilkhivskaya, O.V., Pryamushko, T.S., Kudiiarov, V.N., Volesky, L., Effect of titanium ion implantation and deposition on hydrogenation behavior of Zr-1Nb alloy // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 308. – P. 2–9.

124. Kashkarov, E.B., Nikitenkov, N.N., Sutygina, A.N., Laptev, R.S., Bordulev, Y.S., Obrosof, A. Microstructure, defect structure and hydrogen trapping in zirconium alloy Zr-1Nb treated by plasma immersion Ti ion implantation and deposition // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 732. – P. 80–87.

125. Steinbrück, M., Hydrogen absorption by zirconium alloys at high temperatures // *Journal of Nuclear Materials*. – 2004. – Vol. 334. – P. 58–64.

126. Terrani, K.A., Balooch, M., Wongsawaeng, D., Jaiyen, S., Olander, D.R., The kinetics of hydrogen desorption from and adsorption on zirconium hydride // *Journal of Nuclear Materials*. – 2010. – Vol. 397. – P. 61–68.

127. Menibus, A.H., Guilbert, T., Auzoux, Q., Toffolon, C., Brachet, J.C., Bechade, J.L. Hydrogen contribution to the thermal expansion of hydrided zircaloy-4 cladding tubes // *Journal of Nuclear Materials*. – 2013. – Vol. 440. – P. 169–177.

128. Yang, H.L., Matsukawa, Y., Kano, S., Duan, Z.G., Murakami, K., Abe, H. Investigation on microstructural evolution and hardening mechanism in dilute Zr–Nb binary alloys // *Journal of Nuclear Materials*. – 2016. – Vol. 481. – P. 117–124.

129. Kuroda, M., Setoyama, D., Uno, M., Yamanaka, S. Nanoindentation studies of zirconium hydride. – *Journal of Alloys and Compounds*. – 2004. – Vol. 368. – P. 211–214.

130. Neogy, S., Srivastava, D., Tewari, R., Singh, R.N., Dey, G.K., Banerjee, S. Microstructural study of hydride formation in Zr–1Nb alloy // Journal of Nuclear Materials. – 2003. – Vol. 322. – P. 195–203.

131. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)

132. ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).

133. Федеральный закон №426-ФЗ от 28 декабря 2013 г.

134. ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования.

135. ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).

136. ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.

137. ГОСТ 21889-76. Система «человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования.

138. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

139. ГОСТ 23000-78. Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования.

140. ГОСТ Р 50923-96. Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.

141. ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.

142. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

143. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

144. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

145. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.

146. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

147. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.

148. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.

149. МУ 2.6.5.032-2017 Контроль радиоактивного загрязнения поверхностей.

150. Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 14.07.2022) "Об охране окружающей среды" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2023)

151. ГОСТ Р 22.3.03-94. Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения.

152. ГОСТ Р 22.0.07-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники техногенных чрезвычайных ситуаций. Классификация и номенклатура поражающих факторов и их параметров.

153. СНиП II-11-77\* Защитные сооружения гражданской обороны.