

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
<i>Анализ распределения водорода в наноразмерных металлических покрытиях Zr/Nb после наводораживания</i>

УДК 620.197.6:534.423

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б95	Ван Чжихуай		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Лаптев Р.С.	К.Т.Н.		

Консультант (при наличии)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Ломыгин А.Д.			

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Верховская М.В.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Сечин А.И.	Д.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лидер А.М.	Д.Т.Н., профессор		

Томск – 2023 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП/ОПОП

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

ОПК(У)-6	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности.
ОПК(У)-7	Способен использовать в своей профессиональной деятельности знание иностранного языка.
ОПК(У)-8	Способен критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости направление своей деятельности.
ОПК(У)-9	Способен получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах и других малых коллективах исполнителей.
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способностью использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин
ПК(У)-2	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
ПК(У)-3	Готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований
ПК(У)-4	Способность применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин
ПК(У)-5	Способность пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в избранной области физических исследований
ПК(У)-6	Способность понимать и использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований
ПК(У)-7	Способность участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме
ПК(У)-8	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
_____ Лидер А.М.
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
150Б95	Ван Чжихуай

Тема работы:

<i>Анализ распределения водорода в наноразмерных металлических покрытиях Zr/Nb после наводороживания</i>	
<i>Утверждена приказом директора (дата, номер)</i>	22.05.2023, 142-11/с

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:

06.06.2023

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <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>Наноразмерные металлические слои Zr/Nb нанесённые методом магнетронного распыления на кремниевую подложку, наводороживание на автоматизированном комплексе Gas Reaction Controller, пучковая позитронная аннигиляционная спектроскопия, спектрометр тлеющего разряда GD-Profilер 2 фирмы Horiba Jobin Yvon.</p>
<p>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке <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>	<ul style="list-style-type: none"> – Обзор литературных источников; – Подготовка наноразмерных металлических слоев Zr/Nb; – Наводороживание на автоматизированном комплексе Gas Reaction Controller; – Разработка методики анализа распределения слоев НМС Zr/Nb на оптическом эмиссионном спектрометре тлеющего разряда; – Анализ распределения слоев Zr/Nb до и после наводороживания;

	<ul style="list-style-type: none"> – Химический анализ после наводораживания наноразмерных металлических слоев Zr/Nb; – Анализ содержания водорода методом плавления в инертной среде; – Исследование корреляционной зависимости между распределением слоев и концентрацией водорода; – Анализ полученных результатов; – Социальная ответственность; – Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; – Заключение.
--	--

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	-
---	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Сечин А.И.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Верховская М.В.

Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:
-

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Ломыгин А.Д.			

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б95	Ван Чжихуай		



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:

Группа	ФИО
150Б95	Ван Чжихуай

Тема работы:

<i>Анализ распределения водорода в наноразмерных металлических покрытиях Zr/Nb после наводораживания</i>
--

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	06.06.2023
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.11.2022	Литературный обзор по теме ВКР	15
30.04.2023	Методы исследования	5
01.06.2023	Результаты экспериментальных исследований. Обработка результатов.	50
01.06.2023	Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение	15
01.06.2023	Социальная ответственность	15

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Лаптев Р.С.	К.Т.Н.		

Консультант (при наличии)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Ломыгин А.Д.			

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП/ОПОП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лидер А.М.	Д.Т.Н., профессор		

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б95	Ван Чжихуай		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 104 страниц, 35 рисунков, 17 таблиц, 83 источника.

Ключевые слова: наноразмерные металлические слои, магнетронное распыление, наводораживание, оптическая эмиссионная спектрометрия тлеющего разряда, пучковая позитронная спектроскопия с переменной энергией, просвечивающая электронная микроскопия.

Объектом исследования являются наноразмерные металлические покрытия (НМП) Zr/Nb с различной толщиной индивидуальных слоев 100 ± 10 нм, 50 ± 5 нм, 25 ± 2 нм, соответственно. Покрытия наносились на кремниевую подложку методом магнетронного распыления.

Цель работы – анализ распределения водорода в Zr/Nb в зависимости от концентрации.

В ходе работы проводилось наводораживание полученных НМП Zr/Nb на автоматизированном комплексе Gas Reaction Controller при различных параметрах. Разрабатывалась новая методика анализа НМП Zr/Nb на спектрометре тлеющего разряда GD-Profilier 2. Проводился анализ распределения слоев в НМП Zr/Nb до и после наводораживания, химический анализ после наводораживания, концентрации водорода до и после наводораживания методом плавления в инертной среде.

В результате исследования было установлено, изменение давления наводораживания не влияет на концентрацию водорода и его распределение в НМП Zr/Nb, основное влияние на концентрацию и распределение водорода влияет время наводораживания. При увеличении концентрации водорода в НМП Zr/Nb, распределение водорода в НМП Zr/Nb становится более равномерным.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: толщина покрытий составила $1 \pm 0,1$ мкм.

Степень внедрения: на данном этапе разработки данная работа носит характер фундаментального исследования.

Область применения: результаты исследований могут быть использованы для разработки методов повышения водородной стойкости конструкционных материалов.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в разработке и создании покрытия, позволяющего повышать время эксплуатации конструкционных материалов подверженных воздействию водородного охрупчивания.

В будущем планируется оптимизация состава и толщины наносимых покрытий.

Оглавление

Введение.....	12
Глава 1. Области применения многослойных покрытий.....	14
1.1 Покрытия с высокими трибологическими свойствами.....	14
1.2 Коррозионностойкие покрытия	17
1.3 Самовосстанавливающиеся многослойные покрытия	22
1.4 Радиационно-стойкие многослойные покрытия	23
1.5 Теплостойкие многослойные покрытия	26
1.6 Многослойные покрытия как материалы накопители водорода	27
1.7 Фотоэлектрические свойства многослойных покрытий	36
1.8 Влияние многослойных покрытий на электропроводность	37
1.9 Многослойные покрытия для защиты от водородного охрупчивания.....	38
Глава 2. Материалы и методы.....	41
2.1 Подготовка образцов.....	41
2.2 Оптическая эмиссионная спектрометрия тлеющего разряда	42
2.2.1 Принцип обнаружения элементов, параметры распыления	46
2.2.2 Водоохлаждаемый катод.....	48
2.2.3 Закон Пашена и тлеющий разряд	50
2.2.4 Пример анализа результатов.....	51
Глава 3. Результаты и обсуждения.....	54
3.1 Анализ содержания водорода в наноразмерных металлических слоях Zr/Nb после наводороживания методами плавления в инертной атмосфере	54
3.2 Исследование влияния параметров режима распыления на профили распределения элементов	54
3.3 Исследование влияния различных параметров наводороживания на распределение водорода в многослойном покрытии Zr/Nb	59
3.3.1 Влияние времени при изобарном наводороживании на концентрацию и распределение водорода.....	61

3.3.2 Влияние давления при изохорном наводороживании на концентрацию и распределение водорода.....	63
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	65
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	66
4.1 Анализ аналогичных конкурентных технических решений с точки зрения ресурсосбережения и ресурсоэффективности	66
4.2 Организация и планирование работ	68
4.2.1 Продолжительность этапов работ	69
4.3 Бюджет научного исследования.....	71
4.3.1 Расчет материальных затрат	71
4.3.2 Расчет заработной платы.....	73
4.3.3 Дополнительная заработная плата	73
4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды	74
4.3.5 Расчет затрат на электроэнергию	74
4.3.6 Расчет амортизационных расходов	75
4.3.7 Расчет прочих расходов.....	76
4.3.8 Формирование бюджета затрат НТИ	76
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	76
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	79
Введение.....	81
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	81
5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	82
5.2 Производственная безопасность.....	83
5.2.1 Анализ вредных факторов.....	84
5.2.2 Анализ опасных факторов.....	88

5.3 Экологическая безопасность.....	89
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	90
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований	90
Заключение по разделу	91
Заключение	93
Список использованных источников	95

Введение

Многослойные покрытия, состоящие из чередующихся друг с другом и слоев, благодаря своим уникальным характеристикам идеально подходят для ряда структурных и электронных применений, открывают новые горизонты в природном и промышленном мире. В частности, возможность указать свойства отдельных, дискретных слоев, а также интерфейс, с высокой точностью, обеспечивает высокий уровень контроля над механическими, тепловыми и электрическими свойствами композита, а именно, прочностью, твердостью, защитными свойствами от того или иного воздействия. Кроме того, эта способность отличает слоистые системы от волокнистых и композитных материалов, благодаря постоянному наличию в слоях контактных интерфейсов. В целом, мотивация использования этих материалов также зависит от ряда дополнительных факторов, например, от экономичности и легкости крупносерийного производства материала сложных форм со свойствами, которые остаются в необходимых пределах, а также от химической реактивности/токсичности. Тем не менее, возможность формирования необходимых свойств этих материалов остаются одним из наиболее важных мотивационных факторов применения многослойных покрытий. Для того, чтобы понять сферы применения многослойных покрытий, необходимо их разделить на соответствующие разделы, которые будут рассмотрены в дальнейшем:

1. Увеличение твердости покрытий;
2. Коррозионностойкие покрытия;
3. Покрытия с эффектом самовосстановления.

Таким образом, целью данной работы является анализ распределения водорода в НМП Zr/Nb в зависимости от концентрации.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Оптимизация параметров радиочастотного источника для анализа распределения НМП Zr/Nb методов ОЭС-ТР;
2. Подготовка образцов с НМП Zr/Nb содержащие водород методом газофазного наводороживания;
3. Анализ содержания водорода с помощью анализатора водорода RHEN LECO 602;
4. Анализ профилей распределения водорода в НМП Zr/Nb до и после наводороживания.

Глава 1. Области применения многослойных покрытий

Многослойные покрытия – это многоуровневые материалы со сложной структурой. Многослойные покрытия придают материалу дополнительные физические или химические свойства, такие как твердость, коррозионная стойкость, стойкость к облучению заряженными частицами, пластичность и т.д. В настоящее время развитие твёрдых и сверхтвёрдых покрытий для трибологических испытаний ориентируется на использование многослойных наноразмерных покрытий.

При использовании многослойных наноразмерных покрытий преобладают в основном Me/MeN и MeN/MeN системы (Me – металл, а MeN – нитрид металла). Для напыления многослойных металлических покрытий в коммерческом производстве используются методы магнетронного распыления и электродуговой ионизации.

1.1 Покрытия с высокими трибологическими свойствами

Покрытие может быть классифицировано по функциональной классификации на покрытия с высокими трибологическими свойствами, специальные функциональные покрытия и декоративные покрытия. Покрытия с высокими трибологическими свойствами в основном обладают очень высокой прочностью и износостойкостью. Большинство современных приборов требуют следующих физических характеристик: высокой прочности и твердости, износостойкости. Использование многослойного наноразмерного покрытия может увеличить твердость и износостойкость материала.

Для достижения увеличения трибологических характеристик материалов необходимо использовать материалы с высокими трибологическими свойствами как индивидуальные слои наноразмерного многослойного покрытия.

В настоящее время одним из часто используемых твердых многослойных покрытий является TiAlN/TiAlTaN [1].

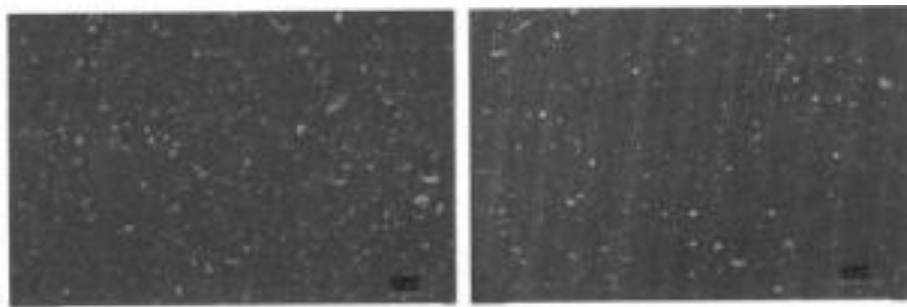


Рисунок 1 – Фотография поверхности многослойного покрытия TiAlN/TiAlTaN [1]

Zhang В. с соавторами исследовал наноразмерное покрытие алмазов, которое обладает способностью увеличивать твёрдость и износостойкость [2]. Для наноразмерного многослойного покрытия покрытия, существует три основных принципа межплоскостного скольжения: теория усиления Холла-Петча, теория модуля разности и эффект межфазного напряжения [3].

Теория усиления Холла-Петча: при уменьшении размера зерна, увеличивается износостойкость и твердость материала, так как границы зерен являются препятствием для скольжения дислокаций. Две другие теории имеют схожие принципы и формируют внутри материала эластичную внутреннюю силу, при генерации дислокаций на границах зерен или использовании двух различных модуля сдвига.

В настоящее время установлено, что многослойное покрытие TiN/TiAlN или TiN/CrN значительно увеличивает жёсткость покрытия, износостойкость, имеет высокую пластичность [4].

Как правило, когда прочность материала увеличивается, то и его износостойкость увеличивается. В настоящее время существует также направление исследований, указывающее на то, что многослойное керамическое покрытие (MeN/MeN) будет более твердым. Тем не менее, такой материал имеет очень низкую пластичность, и его легко сломать в условиях

высокого механического давления. Пластичность также является важным фактором в технологии интенсивного увеличения твердости. Таким образом, механические свойства покрытия MeN/Me более совершенны в большинстве случаев. Это происходит потому, что металлические слои пластичны и могут выдержать большие деформации.

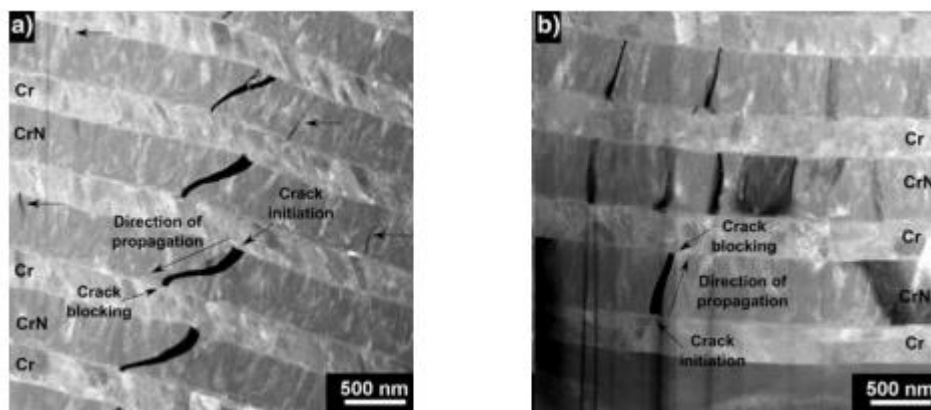


Рисунок 2 – Многослойная схема структуры Cr/CrN, пораженная микротрещинами [5] Crack initiation - Зарождение трещин. Direction of propagation - Направление распространения. Crack blocking - Блокировка трещины.

Рисунок 2 показывает распределение трещин в Me/MeN нанослое под действием давления. Можно заметить, что металлическое покрытие блокирует передачу трещин, что позволяет пластичности металлов поглощать энергию трещины, постепенно уменьшая размер и количество трещин.

Наноразмерное многослойное покрытие и градиентное многослойное покрытие металла – это интересная структура материала, повышающая твердость. Например, многослойное градиентное покрытие Ti-Al-Si-N.

Практическое значение исследований наноразмерного многослойного покрытия в направлении твердых покрытий состоит в том, чтобы найти подходящие материалы и технологии для усиления физических свойств деталей или материалов, которые позволят им работать в суровых условиях,

таких как высокое давление, высокая температура, интенсивность коррозии, биоразлагающие эффекты и т.д [5, 6, 7].

Керамика с тремя элементами также является интересным объектом исследования материалов как покрытия. Zhang В. с соавторами использовал плазменное распыление для изготовления керамического покрытия Mo_2NiB_2 на поверхности стали Q235. И протестировал твердость и интенсивность материалов при различных скоростях напыления [8]. Скорость подачи сырья составляет 40, 60, 80 г/мин соответственно, то твердость покрытия составляет 1727, 2107 и 1891 HV соответственно, что значительно выше прочности обычной стали Q235 (168 HV). Максимальная твердость появляется при скорости около 60 г/мин. С повышением скорости подачи, материал также становится устойчивым к коррозии.

Ударный износ означает износ, вызванный мелкими твердыми частицами, сталкивающимися с поверхностью материала с определенной скоростью. Аппаратное оборудование, которое работает снаружи, часто подвергается ударным износом. Например, разрушение лопастей ветрогенератора пылью, взлеты и падения самолётов в пыльной среде и т.д. [9].

Shuai J. [9] исследовал многослойное покрытие Ti/TiAlN методом электродуговой ионизации и сделал вывод: соотношение материала покрытия имеет наибольшее влияние на противоударную способность покрытия, за ним следует цикл модуляции и, наконец, толщина покрытия. Результаты свидетельствуют о том, что в некоторых случаях эффект увеличения толщины покрытия в целях повышения прочности не является более желательным, а соотношение элементов в покрытии является более важным фактором.

1.2 Коррозионностойкие покрытия

Металл может быть повреждён коррозионной реакцией окисления, что приводит к снижению продолжительности использования деталей. Jiang F. [10]

и его группа нашли многослойное покрытие TiAlN-TiAlN/CrSiAlN-TiAlON, чтобы решить проблему окислирования металла.

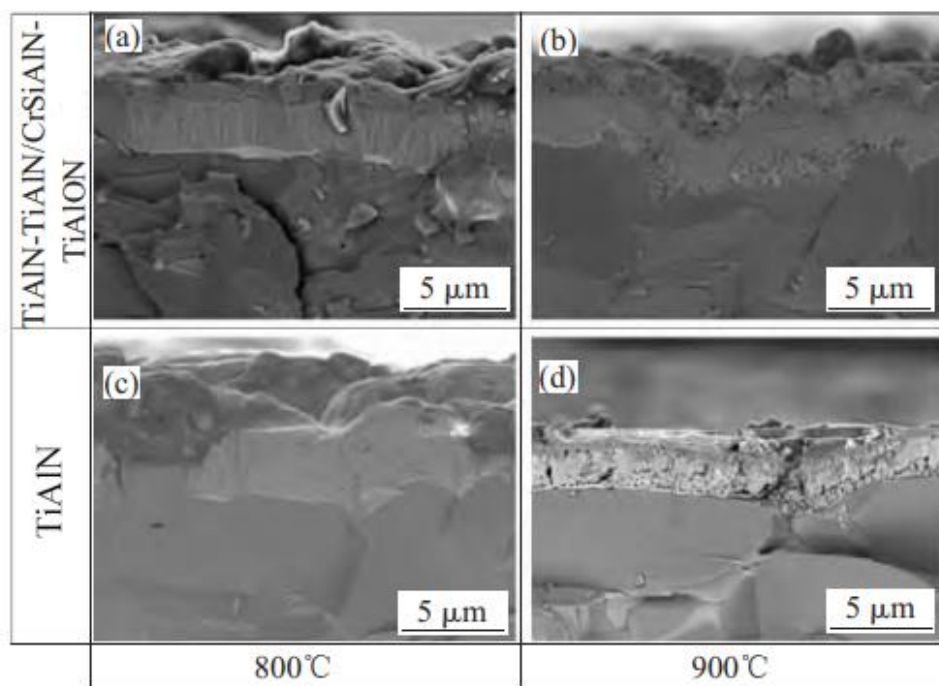


Рисунок 3 – Изменение покрытия после обработки окисления при различных температурах [10]

Эксперименты на окислении при температурах 800 и 900 °С длились один час, были получены следующие результаты.

В условиях 800 °С однослойное покрытие TiAlN и TiAlN/CrSiAlN-TiAlN-TiAlON играют очень хорошую роль в защите материала подложки, металлы без покрытий сильно окислялись при такой температуре.

Природа покрытия изменилась при температуре 900 °С. Окислительная реакция произошла на самом тонком слое многослойного покрытия, и антиокислительная способность перестала работать. Это произошло из-за реакции окисления, которая привела к появлению мелких дыр внутри самого внешнего слоя, создавая условия для дальнейшего окисления. Но поскольку химические свойства различных покрытий отличаются друг от друга, химических условий на второй поверхности недостаточно для окисления. Таким образом, многослойное покрытие может продолжаться использоваться.

В условиях 900 °С однослойное покрытие полностью разрушено в опороченную пористую структуру. Покрытие больше не защищает подложку, и видно, что основной металл подвергся воздействию воздуха.

Экспериментальные результаты показали, что антикоррозионные свойства многослойного покрытия выше, чем однослойное несмотря на то, что они имеют одинаковую толщину.

Однако, как db из экспериментальных результатов, многослойное покрытие было повреждено эффектом теплового расширения. Скорость расширения различных материалов варьируется, что приводит к возникновению несинхронной деформации между слоями, то есть, возникает напряжение. Керамика является хрупким материалом и подвергается более разрушительному давлению.

Таким образом, многослойное покрытие для изготовления деталей требует учета температуры, при которой они работают. При высокой или низкой температуре работы детали могут быть добавлены гибкие материалы в керамическое многослойное покрытие, такие как металл или высокомолекулярные материалы, чтобы защитить покрытие от воздействия теплового расширения [11].

Окисление металлов и керамики очень сложное. Большинство металлов и керамик при коррозии образуют пористую структуру, и окисление разрушает материал быстрее. В настоящее время существует концепт, который останавливает окисление: необходимо добавить материалы в легко окислимое покрытие которые невосприимчивые к окислению, такие как оксид кремния, углерод и даже оксид металла с плотной структурой [12]. При окислении эти химические неактивные примеси заполняют пустую структуру материала, препятствуя дальнейшим процессам окисления.

В настоящее время сравнительно мало исследований такого подхода. Кроме того, существуют исследования, которые показывают, что повышение антикоррозионных свойств, вызванные этим методом, не улучшают свойства,

а даже ускоряет процесс окисления. Исследования Gonzalez и соавторов показали, что в случае со сплавами, основанных на Ni-Al, примеси оксида препятствуют фазовому изменению окиси алюминия, что делает защиту оксида алюминия неэффективной [13].

Оксиды редкоземельных элементов, добавленные в покрытие материала, содержащего основу редкоземельных элементов, также могут иметь активный эффект, усиливая сцепление окислительных веществ и ускоряя окислительную реакцию.

Gao В. и его группа представили никелированное металлическое керамическое покрытие Ni/BACZ 14. BACZ – это керамика, которая состоит из $B_2O_3-Al_2O_3-BaO-CeO_2-ZrO_2$.

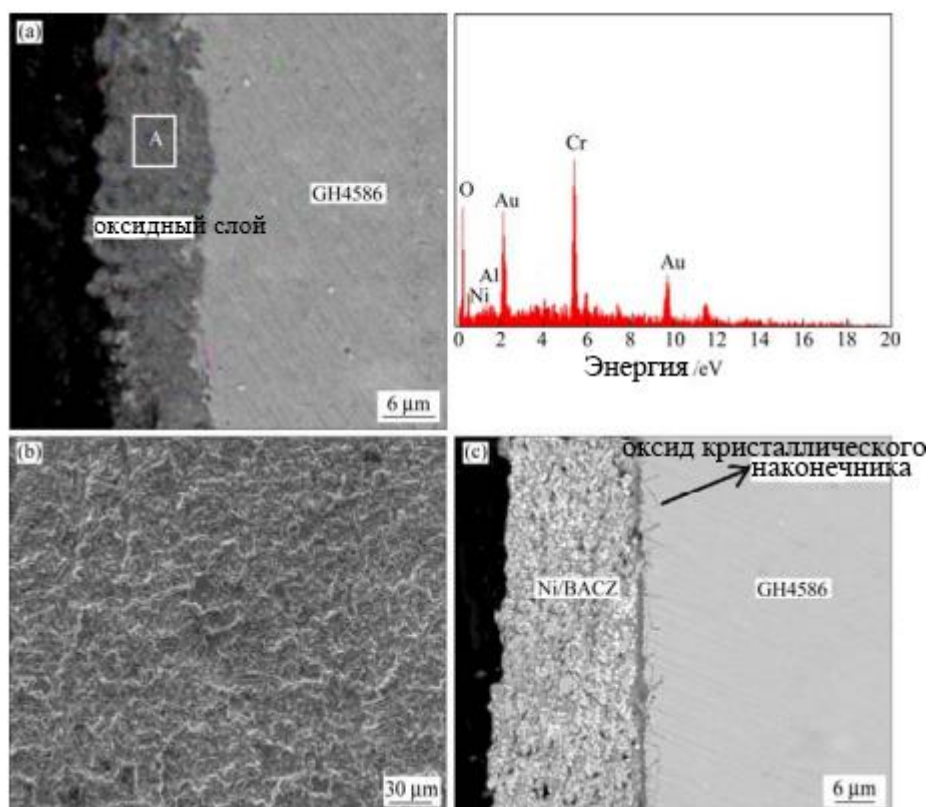


Рисунок 4 – Фотография покрытия после обработки окисления при 900 °С [14]

Рисунок 4, а – фотография без покрытия при окислении подложки. Подложка – сплав GH4586, который обычно используется в ракетостроении. В

этом эксперименте сплав использовался как подложка для покрытия. Фотография справа – это спектральный анализ окислительного слоя сплава. Элемент Au является катализатором проводимости, поэтому основной компонент окислительного слоя — оксиды Ni, Al, Cr.

Рисунок 4, б сплав с покрытием Ni/BACZ. На первый взгляд эффект окисления неочевиден, что означает, что антиокислительные функции покрытия эффективны.

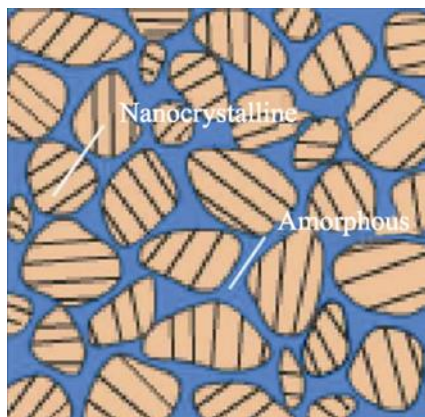


Рисунок 5 – Нанокompозитные покрытия. Nanocrystalline – Нанокристаллический. Amorphous – Аморфный

Однако проанализировав структуру покрытия Ni/BACZ можно сделать вывод, что, это покрытие является нанокompозитным, как показано на рисунке 5. Добавление металлического никеля не усилило пластичности покрытия. В чередующейся холодной и тепловой среде изменения коэффициента теплового расширения покрытия не синхронизируются с изменениями коэффициента теплового расширения подложки, что приводит к частичному отслоению покрытия, следовательно, небольшое количество кислорода попадает в подложку и окисляется. Исследователи предполагают, что эффект будет лучше, если использовать многослойное покрытие.

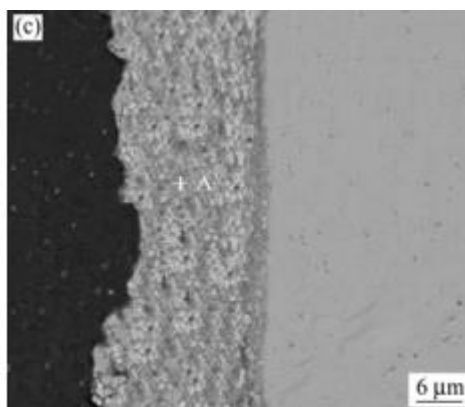


Рисунок 6 – Эксперимент при изменении температуры 50 раз [14]

В дальнейшем исследователи провели 50 экспериментов с термическими перепадами над образцами, в которых не было никаких изменений в адгезии покрытия (например, на рисунках 6), что свидетельствует о том, что покрытие также обладает хорошей устойчивости к температурным перепадам.

Металл и керамика легко окисляются, но с рациональным использованием они могут увеличить коррозионную стойкость материалов. Повышение коррозионной стойкости означает повышение продолжительности жизни использования оборудования.

1.3 Самовосстанавливающиеся многослойные покрытия

Первые исследователи придумали метод: добавление крупных металлических частиц на поверхность покрытия, чтобы при распространении трещин, частицы восстанавливали покрытия [15].

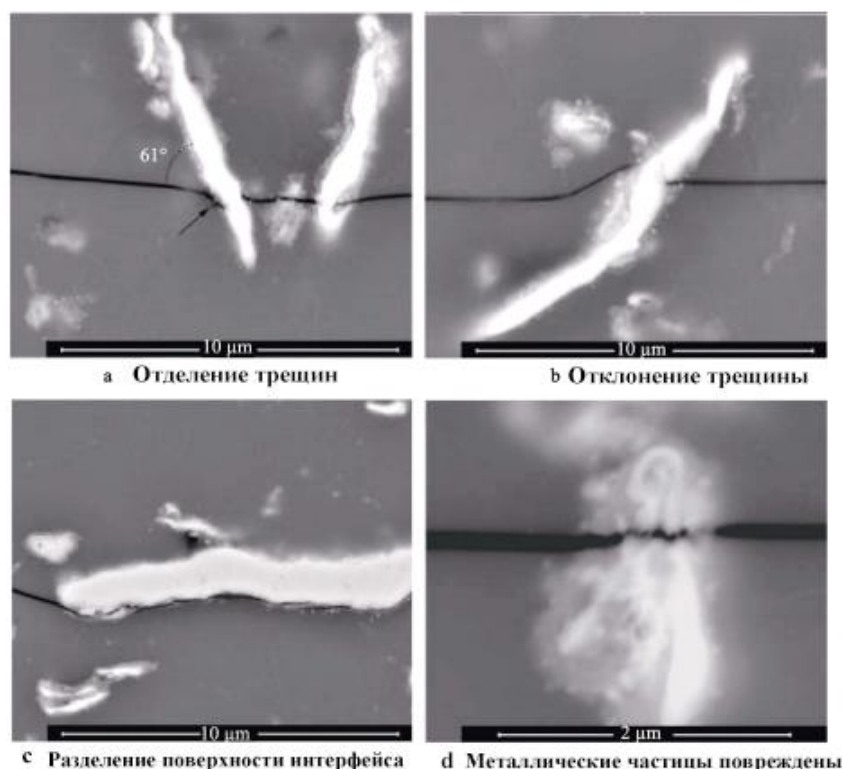


Рисунок 7 – Практическое применение подхода с использованием металлических частиц [15]

Данный метод получил дальнейшее развитие. Исследователи создали нанокapsулы с материалом восстановителем, и добавили их в покрытие. Когда трещина создается она разрывает капсулу, восстановитель высвобождается, чтобы залечить трещину. Метод был ограничен, и исследователи позже обнаружили, что капсулы/металлические частицы не могут полностью блокировать передачу трещин. Самовосстановление таким способом в полной мере не происходит.

Наноразмерное многослойное покрытие является прямым и эффективным способом улучшения физических и химических характеристик материалов.

1.4 Радиационно-стойкие многослойные покрытия

Радиация влияет не только на ДНК существа, но и на металл. Например, высокоэнергетические гамма-лучи могут сделать материал радиоактивным или разрушить химические связи материалов, сделать его более хрупким и уязвимым для расщепления [16]. Радиация также влияет на электросхемы устройства, повреждая приборы.

Matin Usta и его группа создали сложное покрытие Ni-B/hBN, основанное на шестигранном карбонизированном боре (hBN) и никелевый борный сплав [17].

В эксперименте Am-241, Sr-90, Co-60 используется как источник радиации. Это обычные источники радиации α , β и γ . Подложка покрытия является сталью L304.

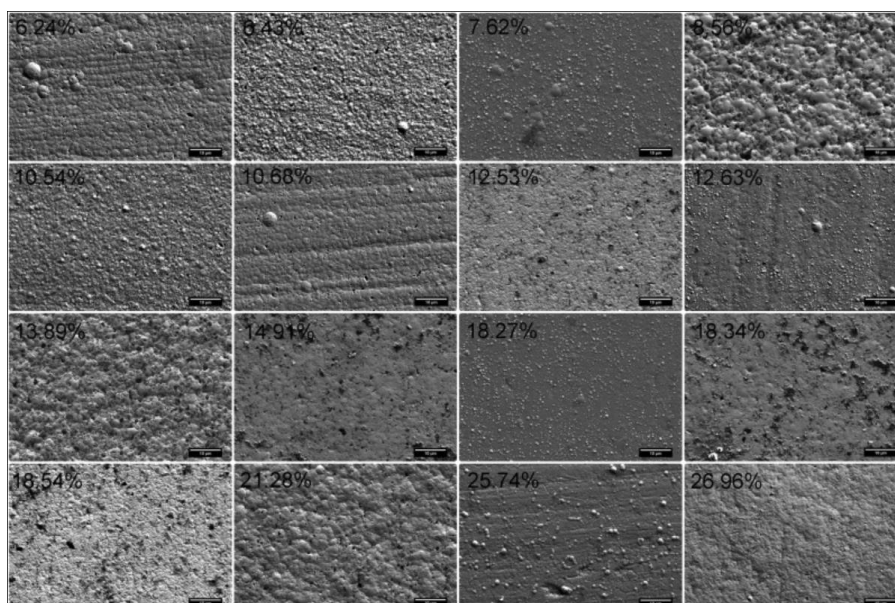


Рисунок 8 – Влияние различных концентратов hBN на внешний вид покрытия [18]

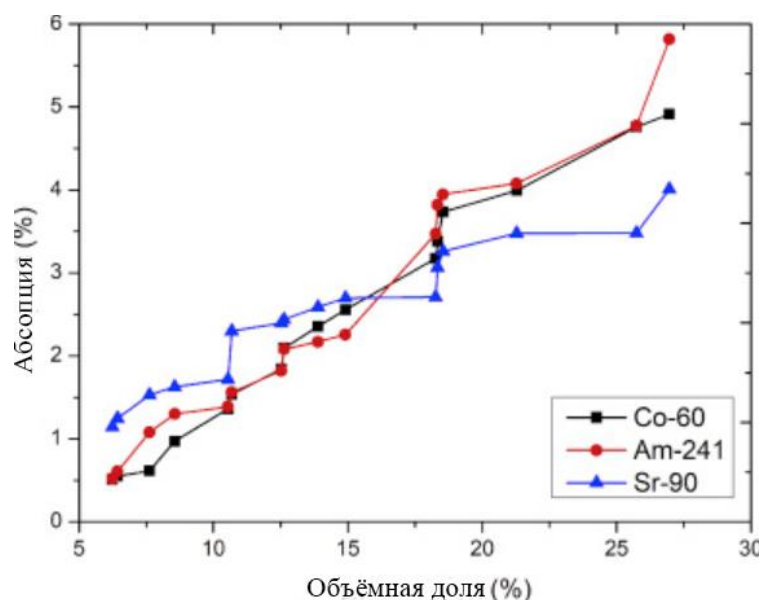


Рисунок 9 – Диаграмма связи между количеством радиации, поглощаемой материалом, и содержанием объём hBN в материале [19]

Рисунок 9 демонстрирует способность комбинированного покрытия поглощать радиацию. Этот материал может применяться в зонах, равных высокой интенсивности радиации на атомных электростанциях.

Требования резервного контейнера отработанного топлива очень строги, и он требует не только наличия защитных свойств радиации, но и долгой жизни и жаростойкости для хранения [17].

Zeinab Y. и его группа исследовали материал покрытия, содержащий Cr, Mo и W. Этот материал некристаллический и его подложка железо. Он обладает устойчивостью к коррозии и часто называется как материал SAM. Другие модели этого материала также добавляют элементы, такие как Y, B, Mo. Cr, W и Mo в материалах SAM могут усилить коррозионную устойчивость, а также подавлять гамма-лучи, элемент Y может понизить критическую скорость охлаждения, и B может захватить тепловые нейтроны [18].



Рисунок 10 – Бак для хранения отработанного топлива [18]

Последние годы исследований показали, что окись металла MO может блокировать определенное количество низкоэнергетических рентгеновских и высокоэнергетических гамма-лучей [19, 20, 21]

Li R. с соавторами создал высокопроводный $MO/G_2O_3/WO_2$ покрывающий материал и использовал органические материалы для замены азотированного бора [21].

1.5 Теплостойкие многослойные покрытия

Присутствие тепловой радиации влияет на природу материала, например, на прочность растяжения, ударную вязкость, и даже цвет меняется с повышением температуры. Для защиты материалов от тепловой радиации необходимо использовать защитное покрытие.

Ge Y. и его группа создали покрытие ниобия/керамика [22]. Такое покрытие может применяться в двигателях самолётов и газовых двигателях. В эксперименте покрытие может излучать инфракрасное излучение в диапазоне от 3 до 20 микрон на инфракрасной длине волны меньше 0,5. Это доказывает, что материал явно поглощает тепловое излучение.

Не только должны защищать материалы в условиях высоких температур, но и иногда сохранять условия высоких температур. Например, Song и его группа обнаружили, что во время плавления стали на сталелитейном заводе, температура печи быстро рассеивалась, что привело к расточительным ресурсам [23].

1.6 Многослойные покрытия как материалы накопители водорода

Водород является важным топливом, которое имеет самую низкую массовую плотность газа и очень высокую плотность энергии, не загрязняет окружающую среду и нетоксичен. Энергия может быть высвобождена при сжигании водорода в атмосферных условиях или при использовании слияния изотопов водорода. Изучение водорода в настоящее время является популярной областью исследований в научном сообществе в области энергетики, а большинство космических аппаратов заправляются водородом. Водород также является важным топливом для химического производства, а его изотоп дейтерий - сырьем для ядерного синтеза [24].

Хранение и транспортировка водорода имеют важное значение для применения водорода. Наиболее развитыми методами хранения водорода в мире являются хранение в газообразном и жидком состоянии. При газообразном методе хранения обычно используются баллоны для хранения газообразного водорода под давлением 11,8 МПа, в которых может храниться только 1% от веса водородного баллона. Метод хранения в жидком состоянии требует наличия среды с высоким давлением и низкой температурой и требует учета потерь ресурсов из-за испарения. Как можно видеть, затраты на транспортировку и хранение для обоих этих методов высоки.

Существует также несколько новых методов хранения водорода, металлического водорода и сплавов для хранения водорода. При давлении в несколько миллионов атмосфер водород превращается в проводящее твердое

вещество, которое представляет собой металлический водород. Содержащий огромную энергию, металлический водород является сверхпроводником при комнатной температуре, и астрономы предсказали, что внутренняя часть Юпитера состоит из этого металлического водорода. К сожалению, металлический водород очень сложен в производстве и его трудно получить [25].

В настоящее время развивается технология сплавов для хранения водорода. При определенных условиях некоторые металлы поглощают водород из окружающей среды, и водород в виде атомов внедряется в щели между атомами металла, образуя твердые растворы или вступая в химическую реакцию с металлом с образованием гидридов. Это передовой метод хранения водорода, и эксперименты показали, что металлы для хранения водорода могут хранить водород с массовой долей около 10%, что гораздо эффективнее, чем другие традиционные методы. В настоящее время металлы для хранения водорода используются в различных областях, таких как новые энергетические транспортные средства, промышленная газоочистка и аэрокосмическое топливо [26].

Сплавы для хранения водорода, такие как LaNi_5 , могут поглощать водород и превращаться в гидриды металлов LaNi_5H_6 [27]. Он обладает решетчатой структурой CaCu_5 , легко активируется при комнатной температуре, имеет высокую скорость реакции и может быть использован в качестве отрицательного электрода в водородных батареях. Однако его теоретическая емкость для хранения водорода составляет всего 1,4%, его объем после использования расширяется на 23,5%, и он дорого стоит.

Сплавы для хранения водорода на основе магния обладают высокой теоретической емкостью для хранения водорода, например, сплавы Mg_2Ni могут хранить 7,6% водорода. Этот материал имеет низкую стоимость и не загрязняет окружающую среду, но сплавы магния сложны в изготовлении и подвержены окислительному разрушению. В последние годы металлы для

хранения водорода из магниевых сплавов исследуются на этих сложных участках [28, 29].

Для решения энергетического кризиса использован ядерный синтез для производства электроэнергии. Топливо для ядерного синтеза, это дейтерий. Металл гидрид может сохранить элементы водорода большого объёма, и он хороший носитель для изотопного топлива водорода [30, 31, 32].

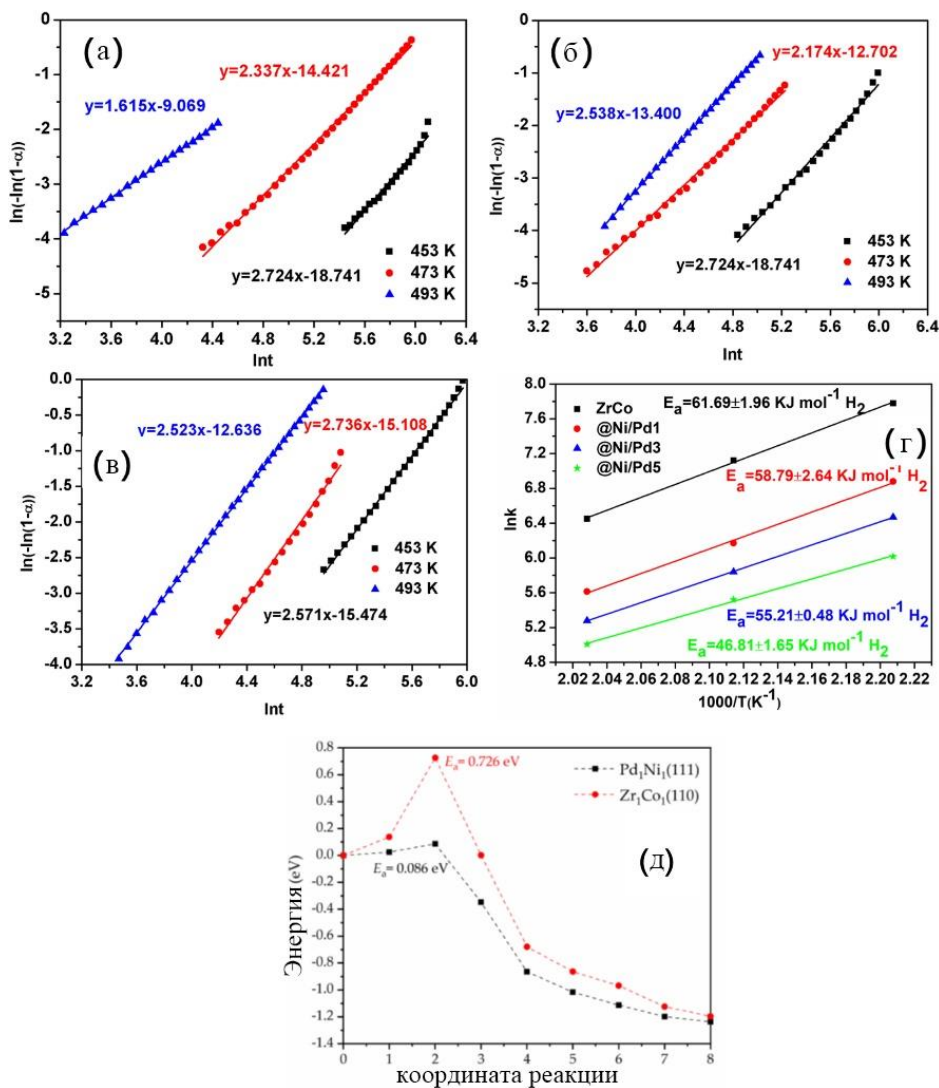


Рисунок 11 – Участки $\ln(-\ln(1-\alpha))$ vs $\ln t$ для водородного процесса сплавов ZrCo и сплавов с Ni/Pd покрытием ZrCo: (а) ZrCo@Ni/Pd1, (б) ZrCo@Ni/Pd3, (в) ZrCo@Ni/Pd5, (г) участки $\ln k$ в зависимости от $1000/T$ для сплавов ZrCo и сплавов ZrCo с покрытием Ni/Pd, (д) сепарации водорода на поверхности ZrCo(110) и Pd1Ni1(111) [33]

Wang F. и его группа создали покрытие металла Ni/Pd. Это покрытие покрыто цирконием-кобальтовым сплавом, который оптимизирует способность и скорость хранения водорода в материале (как показано на рисунке 11) [34].

Этот материал также позволяет металлу высвобождать водород быстрее и больше, а простые сплавы, как показано на рисунках 12, выделяют только около 50% водорода, в то время как покрытые сплавом высвобождают почти 75% водорода.

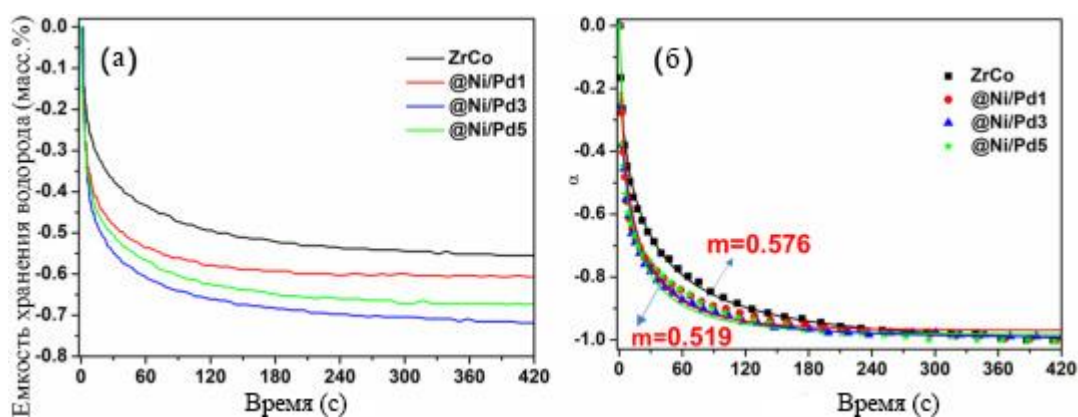


Рисунок 12 – (а) дегидрирующие кинетические кривые для голых сплавов ZrCo и Ni/Pd с покрытием ZrCo сплавов при 493 К, (б) установленные дегидрирующие кинетические кривые для голых сплавов ZrCo и Ni/Pd с покрытием ZrCo сплавов в сочетании с JMA модели [33]

Хотя хранение водорода является важной областью применения металлов для хранения водорода, инфильтрация и адсорбция водорода также вызывает более серьезные повреждения металла.

Проникновение атомов водорода в кристаллическую решетку металла или сплава приводит к появлению крошечных трещин внутри металла и концентрированных напряжений. В результате хрупкость металлического материала увеличивается, это явление известно, как водородное охрупчивание [35]. Водородное охрупчивание невозможно устранить, можно лишь найти способы его предотвращения. Например, в методе, описанном Полом и др.,

используется смолопластиковое покрытие или высокопрочное и высокопрочное металлическое покрытие для покрытия металлов, работающих в водородной среде, для подавления расширения и растрескивания материала или даже для изоляции газа [36].

Намеренно созданы пустые пространства или дефекты в металлах, чтобы водород обогащался в больших количествах в местах дефектов без ущерба для физических свойств материала. Такой дефект называется "водородной ловушкой", что очень описательно означает, что водород задерживается в созданной нами "ловушке", не причиняя вреда окружающей среде.

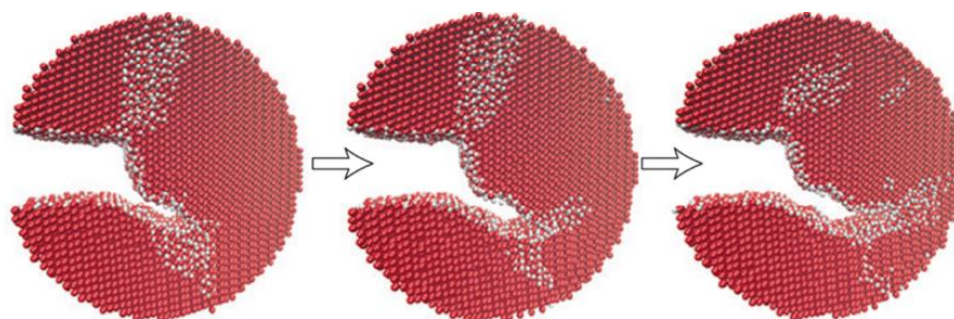


Рисунок 13 – Имитационная модель водородной ловушки, где белые частицы - атомы водорода, а красные - атомы металла [37]

Как показано выше, это модель водородной ловушки, где атомы водорода индуцируются нами в более крупные вакансии и напряжения внутри материала уменьшаются, т.е. влияние водорода на материал снижается.

Успешное применение водородных ловушек связано с тем, что дефекты металла могут быть использованы для создания дефектов материала для формирования водородных ловушек. Использование наномультислойных покрытий является хорошим способом достижения этой цели.

Водородная энергия может быть использована различными способами, и как источник высокой энергии, имеющий более 20% энергетических применений, водородная энергия привлекает большое внимание. Как

упоминалось ранее, водородная энергия является экологически чистой, при ее использовании не образуются парниковые и токсичные газы, а также она обладает высокой плотностью энергии, что делает необходимым преодоление проблемы водородного охрупчивания в системах хранения водорода. Использование металлических многослойных покрытий для технологии хранения водорода является новым направлением исследований. Эти покрытия могут быть использованы непосредственно в качестве носителя водорода, а также дают возможность увеличить способность материала для хранения водорода.

Принцип действия металлических покрытий для хранения водорода можно классифицировать как физический или химический. В описанном ниже покрытии используется физический метод.

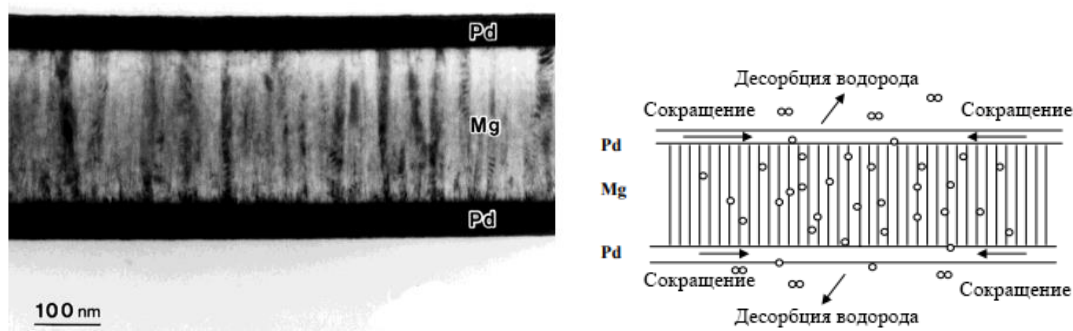


Рисунок 14 – Многослойное покрытие Pd(50nm)/Mg(200nm)/Pd(50nm) [38]

Подложка материала является стекло, как показано на рисунке 14, магний, как материал для хранения водорода, является основным компонентом этого покрытия.

Магний, как материал для хранения водорода, является основным компонентом этого покрытия. Палладий неустойчиво связывается с водородом, и хотя он улучшает способность поглощать водород, водород может легко десорбироваться в магниевый слой или из покрытия. Присутствие палладия делает магниевый слой менее восприимчивым к окислению и улучшает механические свойства.

Существующие металлы для хранения водорода имеют либо высокую емкость хранения водорода, но высокую температуру десорбции, либо низкую температуру десорбции, но низкую емкость хранения водорода, данное покрытие является хорошим решением этой проблемы. Этот материал обладает способностью хранения водорода на 5 масс. % и очень низкую температуру десорбции 363 К.

Аналогично существуют металлические многослойные покрытия Mg/Ti/Ni, в которых дополнительный металл повышает твердость и пластичность материала и является хорошим решением проблемы водородного охрупчивания [39].

Существуют химические методы, такие как это покрытие GO (Оксид графена)/Ni/GO, созданное Ayda Shojaeinia и его группа [40]. Это электрохимический метод, в котором графеновый слой используется в качестве анода для поглощения водорода из раствора под напряжением и хранения его в пористой структуре графена в виде химической связи. Он также может быть использован в качестве водородного энергетического элемента для выделения водорода.



Рисунок 15 – Покрытие Ni/GO [40]

С развитием автомобильной и механической промышленности было изобретено большое количество новых материалов. При работе машин возникает большое трение, и для его преодоления требуется особенно большое количество энергии. Например, автомобиль на дороге расходует почти треть своей топливной энергии на преодоление трения [41, 42]. А высокоточное оборудование, как правило, работает в электрифицированной среде, где электрические поля и электростатические эффекты могут вызывать повреждения твердых материалов, приводя к химической коррозии или фрикционным повреждениям [43].

А. Erdemir и его группа представили свои результаты по использованию водорода для уменьшения шероховатости алмазоподобных пленок (DLC) [41]. Алмазоподобные углеродные покрытия считаются наиболее перспективным материалом покрытия для снижения механического трения и износа [44, 45].

Алмазоподобные углеродные покрытия обычно не содержат водорода, но когда матрица материала богата водородом, атомы водорода могут проникать в покрытие из материала матрицы. Возможно также, что исследователи использовали материалы, содержащие водород, при проведении парофазного осаждения. Эти пути позволяют покрытиям DLC стать водородсодержащими покрытиями DLC, и исследования показали, что эти водородсодержащие покрытия DLC имеют коэффициент трения менее 0,1 в инертном газе или вакууме, и даже сильно гидrogenизированные пленки DLC имеют коэффициент трения до 0,001. Коэффициент трения безводородных DLC-покрытий составляет 0,6 или даже больше 1. Хотя можно достичь 0,1 во влажных условиях и 0,01 в глицериновой смазке, использование DLC-покрытий не позволяет нам применять эти смазочные материалы [46].

Авторы этой литературы с помощью экспериментов по изотопному маркированию установили, что остаточная часть дейтерия на границе трения, которая взаимодействует с прочными ковалентными связями на поверхности контакта, играет основную роль в снижении силы трения.

Композитное водородсодержащее покрытие из карбида вольфрама/углерода также было разработано Wang S. и др. Эксперименты показали, что покрытие обладает эффектом дальнейшего снижения трения и защиты материала подложки в среде механической смазки [52].

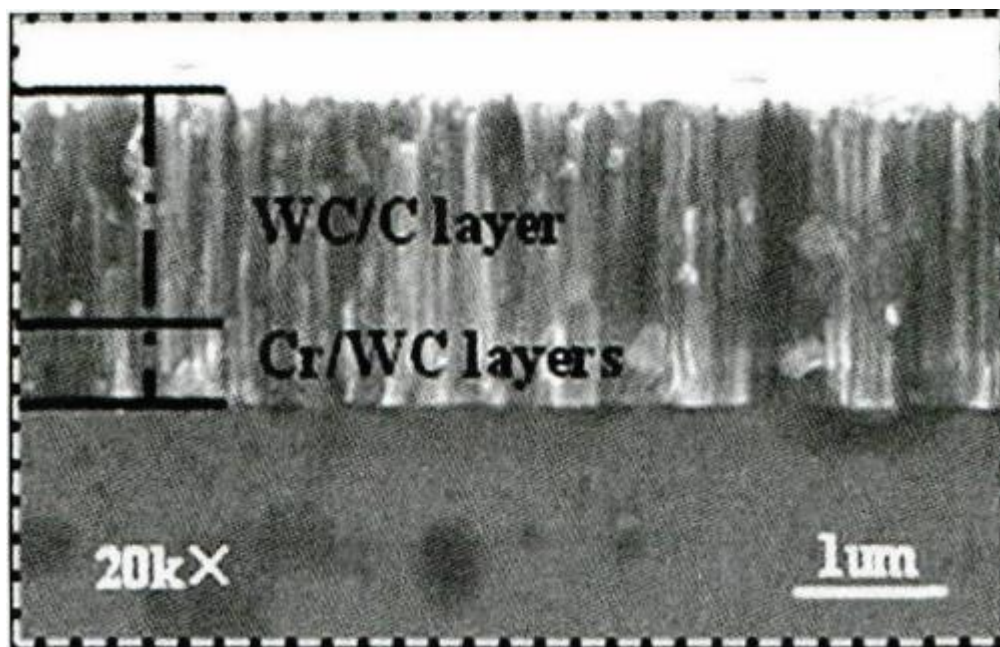


Рисунок 16 – Вид в поперечном сечении композитного покрытия WC/C, содержащего водород 52. «Layers» – «Покрyтия»

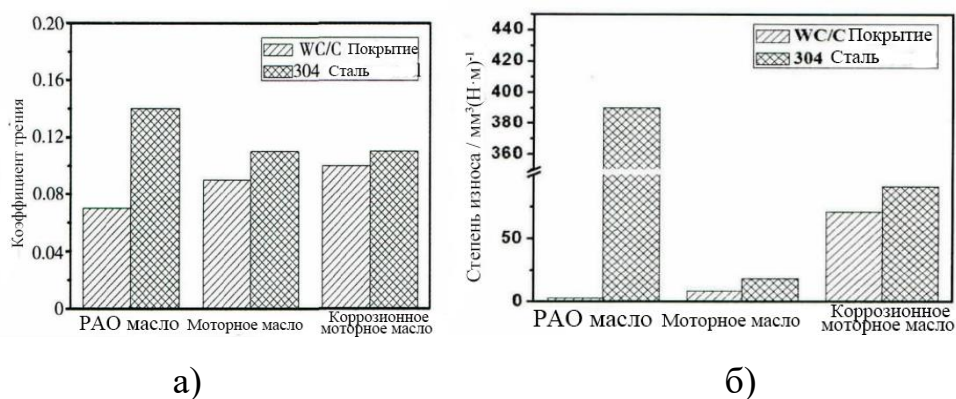


Рисунок 17 – (а) Коэффициент трения композитного покрытия с нержавеющей сталью 304 для материала GCr15. (б) Уровень износа композитного покрытия по сравнению с нержавеющей сталью 304 в конце испытания [52]

Как показано на рисунке 28, это водородсодержащее композитное покрытие может дополнительно защитить материал и снизить потери на трение в смазочной среде. Авторы пришли к выводу, что водородсодержащий материал повышает поверхностную активность материала и способствует образованию масляной пленки на поверхности смазочного покрытия с целью защиты материала [53, 55].

Большинство современных исследований в области водородсодержащих многослойных покрытий направлены на включение водорода для улучшения смазочных свойств материала. Из-за явления водородного охрупчивания существует очень мало металлических покрытий, содержащих водород, и применение водородсодержащих металлических покрытий весьма затруднительно [54]. В связи с уникальными свойствами водорода необходимо разработать металлические покрытия, которые эффективно и долговечно работают в водородсодержащих условиях, чтобы ответить на растущую тенденцию к использованию водородной энергии [56].

1.7 Фотоэлектрические свойства многослойных покрытий

Фотоэлектрические батареи — важные исследования в области солнечной энергии. Обычно использован монокристалл, чтобы превратить фотоэлектрическую энергию в электроэнергию [34, 57].

Покрытие окислителя металла повышает плотность дыр в полупроводниках и электронов на поверхности, что повышает эффективность преобразования энергии в фотоэлектрических аккумуляторах полупроводников. Anindita и его группа успешно усилили эффективность трансформации монокристалла с использованием покрытия CuO/ZnO . Эффективность превращения монокристалла кремния без покрытия составляет около 7%, в то время как эффективность преобразования материала, увеличивающего покрытие CuO/ZnO , может достичь 10% [58].

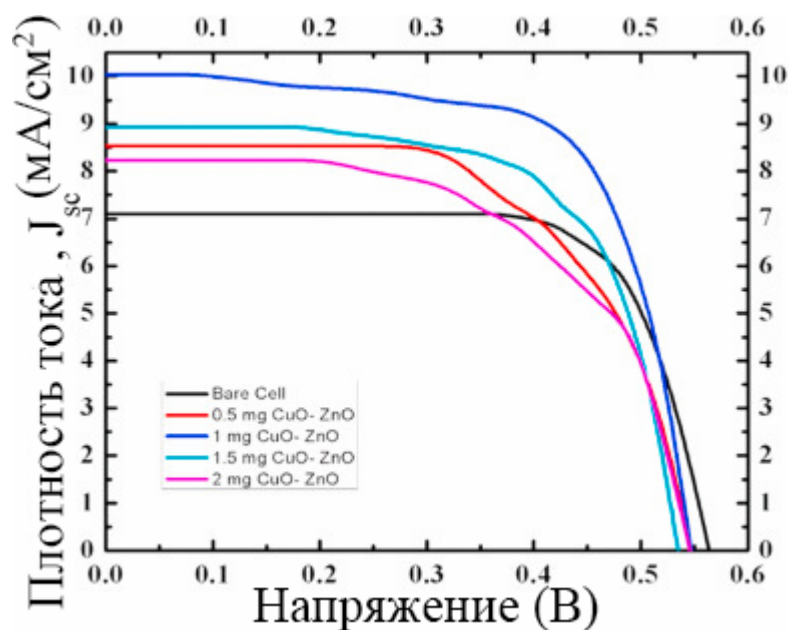


Рисунок 18 – Зависимость между плотностью тока и напряжением [58]

Благодаря совместному действию примесей и металлов, проводимость полупроводников значительно возросла, а рассеивание энергии сократилось и значительно увеличилось [59, 60].

1.8 Влияние многослойных покрытий на электропроводность

Металлы обладают хорошей электропроводностью, и в некоторых случаях они должны быть электроизолирующими. В современной жизни необходимо производить маленькие и тонкие электронные компоненты. Например, мобильные телефоны и высокотехнологичные электронные компоненты, в которых не использована лакированная линия [61, 62, 63].

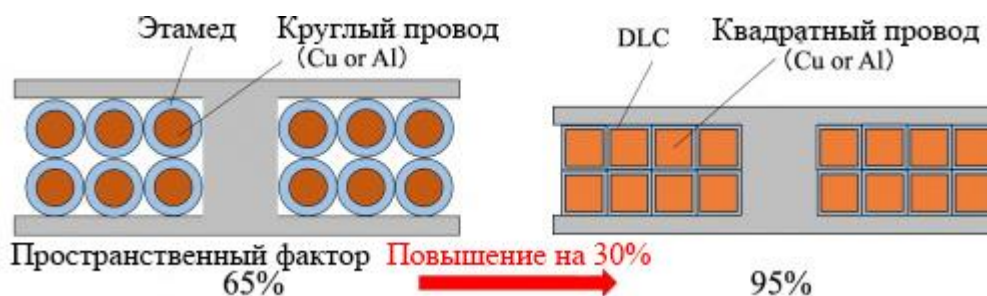


Рисунок 19 – Схема обычных проводов и алмазного покрытия [65]

Daichi Nakajima и его группа изобрели покрытие алмазом. Поскольку покрытие было изготовлено с использованием PVD технологии, этот провод должен быть квадратным. Как показано на рисунке 19, этот провод не только тоньше, но и имеет больший коэффициент использования пространства [64].

Экспериментаторы также провели измерения коэффициента трения. Эксперимент показал, что коэффициент трения, имеющий покрытие алмаза (0,23), составляет одну треть медного провода, и показал, что коэффициент трения достаточно низкий, чтобы применить его к электронным элементам, которые должны скользить. Пробивное напряжение покрытия составляет 140 кВ/мм, в то время как обычные небольшие электронные компоненты требуют не более чем 25 В, что указывает на изоляцию, соответствующую требованиям.

1.9 Многослойные покрытия для защиты от водородного охрупчивания

Hu L. и др. создали покрытие из нитрида CrN/AlTiN, схематическое изображение материала показано на рисунке 20. Это покрытие в некоторой степени газонепроницаемо и может изолировать большую часть водорода, а также удерживать атомы водорода с помощью дефектов сплава [65]. Видно, что покрытие имеет высокое сродство к материалу и может быть прочно закреплено на поверхности подложки.

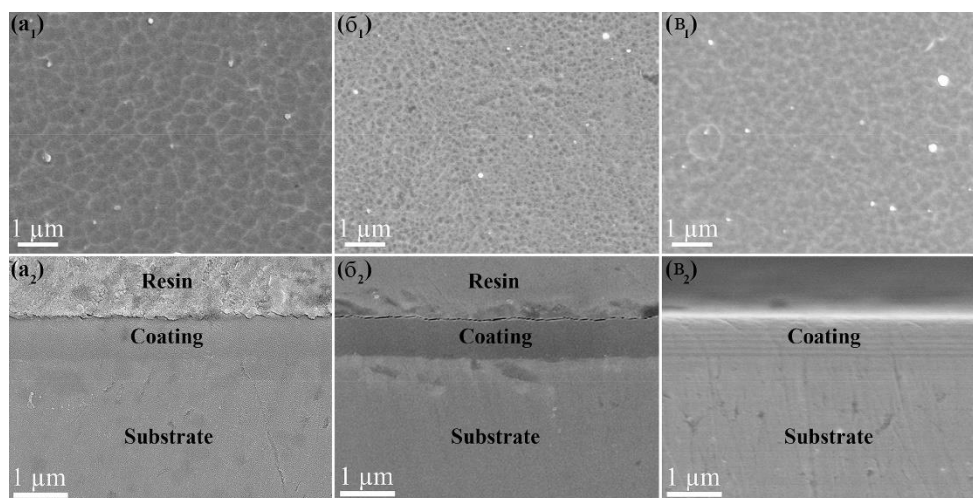


Рисунок 20 – Покрытие CrN/AlTiN, а – CrN монослойный, б – AlTiN монослойный, в – CrN/AlTiN многослойный [65]. «Resin» – «Смола», «Coating» – «Покрытие», «Substrate» – «Подложка»

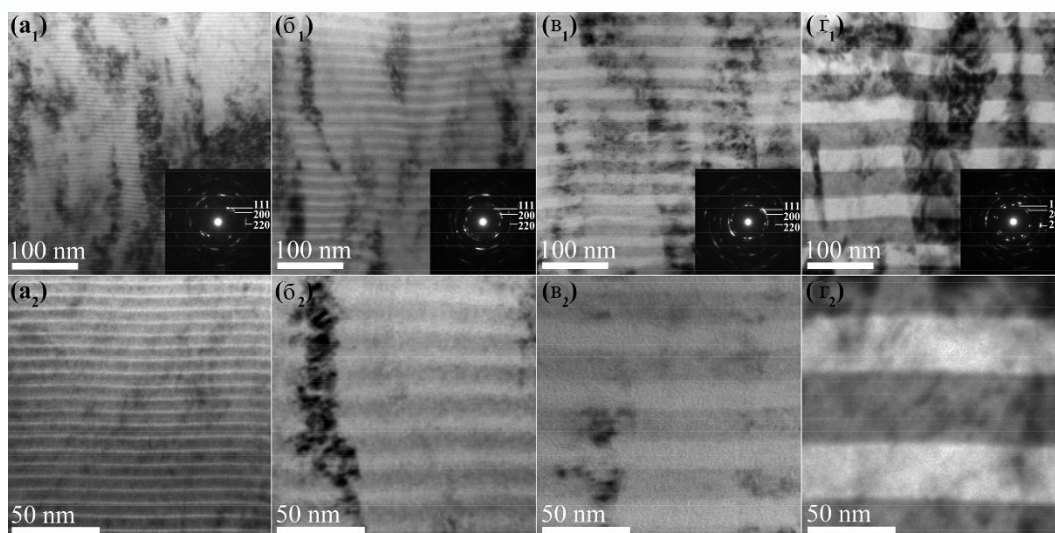


Рисунок 21 – Многослойные покрытия различной толщины а, б, в, г – 7, 18, 32, 70 нм, соответственно [65]

Как показано на рисунке 22, пузырьки водорода почти полностью сосредоточены на границе раздела многослойного покрытия, что доказывает эффективность данного метода в сдерживании проникновения водорода. Это также доказывает, что многослойные покрытия более устойчивы к проникновению, чем однослойные. Авторы дополнительно заявляют, что поскольку это покрытие активно поглощает водород и его изотопы, оно также может быть использовано в качестве альтернативы сплавам для хранения водорода.

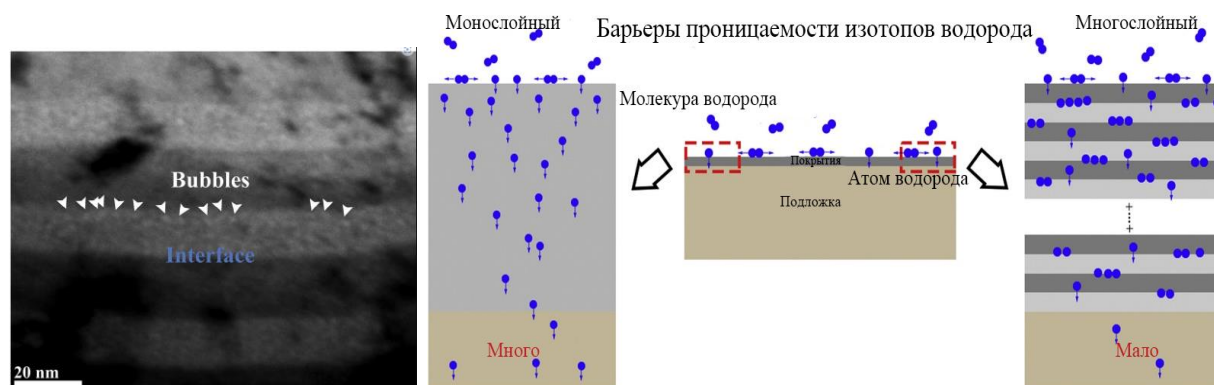


Рисунок 22 – Изображение покрытия после помещения в водородную среду на некоторое время [65]. «Bubbles» – «Пузырьки», «Interface» – «Интерфейс»

На микроскопическом уровне атомы водорода проникают между атомами металла и образуют с ними химические связи. Энергия связи этой П-связи значительно отличается от энергии интерметаллической связи, что приводит к различным модулям упругости и жесткости внутри металла, что является одним из объяснений явления водородного охрупчивания [66,68,69].

Как и в случае с проектом, исследованным Pan Y. и его группой, они использовали расчеты по принципу первоисточника и разработанные эксперименты, чтобы продемонстрировать причину этого явления водородного охрупчивания [70].

Водород может оказывать воздействие на металлы или металлические покрытия, которое может быть, как положительным, так и отрицательным с точки зрения способа их использования. Например, водородное охрупчивание разрушает механические свойства металлических материалов, но в то же время предлагает новые способы восстановления ресурсов и модификации материалов.

Глава 2. Материалы и методы

2.1 Подготовка образцов

Нано композитные покрытия осаждались методом магнетронного распыления Zr (чистота 99,99%) и Nb (чистота 99,99%) мишеней на подложку монокристаллического Si (100). Общая толщина полученных покрытий составила $1 \pm 0,1$ мкм, толщина индивидуальных слоев: 100 ± 10 , 50 ± 5 нм, 25 ± 2 нм. Многослойная структура была получена путем поочередного открытия и закрытия затворов у каждой из мишени при давлении в камере 0,5 Па. Нанесение происходило в атмосфере аргона, без подогрева подложки. Толщина индивидуальных слоев была разной, это сделано для того, чтобы правильно подобрать режим распыления на оптическом эмиссионном спектрометре тлеющего разряда. Для дальнейшего наводороживания использовалась система ZrNb50 с толщиной индивидуальных слоев 50 ± 5 нм. Наводороживание образцов осуществлялось из среды водорода на автоматизированном комплексе Gas Reaction Controller. Образцы помещались в реакционную камеру, камера вакуумировалась и нагревалась до заданной температуры со скоростью $6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Температура наводороживания варьировалась от $350 \text{ }^\circ\text{C}$, данная температура ограничивается КТР подложки/покрытия. После нагрева в камеру с образцом напускался водород, давление водорода в камере составляло от 2 до 20 атмосфер и поддерживалось постоянным, время наводороживания варьировалось от 1 до 7 часов. После завершения наводороживания камера охлаждалась в атмосфере водорода с последующим вакуумированием при комнатной температуре. В таблице 1 представлены параметры наводороживания для образцов ZrNb50.

Таблица 1 – Параметры наводороживания на автоматизированном комплексе Gas Reaction Controller.

Название образцов	t, ч	p, атм.	T, С
ZrNb50_исходный	0	0	0
ZrNb50_H_1	7	20	350
ZrNb50_H_2	5	20	350
ZrNb50_H_3	3	20	350
ZrNb50_H_4	1	20	350
ZrNb50_H_5	3	5	350
ZrNb50_H_6	3	10	350
ZrNb50_H_7	3	2	350

Контроль содержания водорода в объеме образцов будет проводиться на приборе LECO RHEN602. Принцип измерения содержания водорода основан на регистрации изменения теплопроводности в измерительной части термокондуктометрической ячейки. Работа анализатора начинается с установления пустого графитового тигля на нижний электрод и загрузки данного тигля в специальный отсек. После закрытия электродов начинается процесс очистки тигля от атмосферных газов, который именуется как дегазация. Этот процесс сопровождается протеканием электрического тока через тигель, который разогревает его до высокой температуры, способствующий высвобождению газов, находящихся в графите. Затем образец из верхнего загрузочного устройства опускается в тигель. На тигель подается тока, который способствует высвобождению газов из образца.

2.2 Оптическая эмиссионная спектрометрия тлеющего разряда

При поверхностном анализе материала часто используются различные методы, такие как рентгеновский фотоэлектронный спектр, оже-электронный спектр и т.д. [71]. Одним из перспективных методов анализа распределения

элементов по глубине является оптический эмиссионный спектрометр тлеющего разряда (GD-OES).

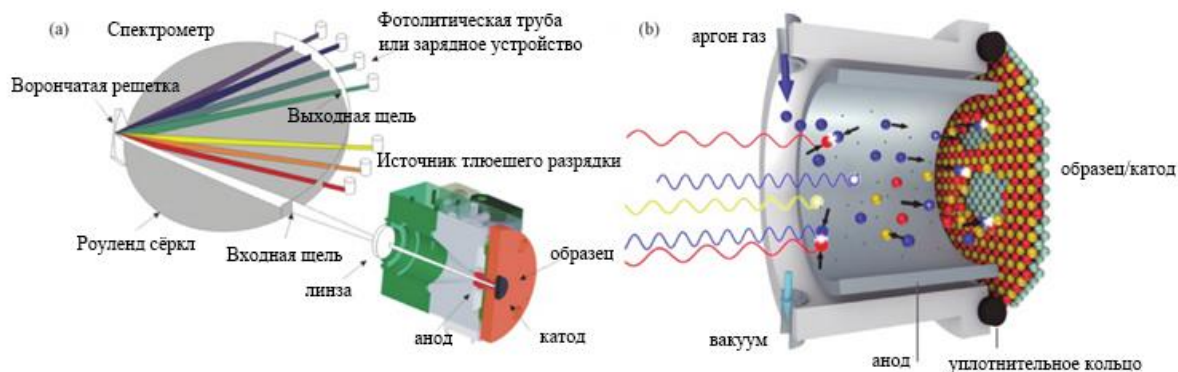


Рисунок 23 – Принцип работы GD–OES [71]

Оптический эмиссионный спектрометр тлеющего разряда работает как показано на рисунке 23. Световые генераторы внутри устройства-аноды, а наши образцы-катоды. Давление в рабочей зоне приближается к вакууму, чтобы предотвратить потерю энергии в движении частиц.

Потом небольшое количество инертного газа было заполнено внутри рабочей зоны, часто используемый газ — аргон. Катод нужно охладить до 10 градусов по Цельсию (зависит от теплопроводности материала подложки, чем хуже теплопроводность, тем ниже температура, которая требуется.), чтобы его можно было использовать. Это для предотвращения разрушения образцов, и также для предотвращения экспериментов с эффектом тепловой электроники. Исследования показали, что переход аргона на гелий и криптон, даже смесь водорода, кислорода и аргона, повышают разрешение спектра [72, 73. 74].

При действии сильного электрического поля, атомы аргона превращаются в аргоновые ионы и электроны. Положительно-электрические аргоновые ионы начали сталкиваться с образцами, которыми в катоде. Атомы на поверхности образца бомбардируются аргоновым ионом, тем самым отделяясь от поверхности образца. Частица, которая также покидает поверхность образца, также содержит ионы и свободные электроны образца. Эти свободные электроны могут возбуждать атомы до возбуждения. Когда

атом возвращается в основное состояние, он излучает свет, и анализируется частота света, чтобы определить тип атома. Поскольку структура атома отличается, атомная энергия возбужденного состояния отличается, как и частота излучаемого света. Спектрометр может определить тип элемента по частоте и его содержание по интенсивности света

Спектр этих ионов немного отличается от спектра атома. Когда они находятся в возбуждении, это влияет на точность спектрального распознавания. Хорошо, что ионы заряжены положительным зарядом. Под действием электрического поля они возвращаются на поверхность образца, не участвуя в процессе возбуждения.

Перед началом эксперимента можно установить напряжение, давление и другие параметры, чтобы контролировать глубину процесса анализа поверхности. Удар аргонного иона оставляет относительно равномерную яму на поверхности образца. Когда эксперимент закончится, возьмите образец и измерьте глубину ямы с помощью наноразмерных приборов. Объединив результаты спектрального анализа, можно получить компоненты элементов на различных глубинах поверхности образца.

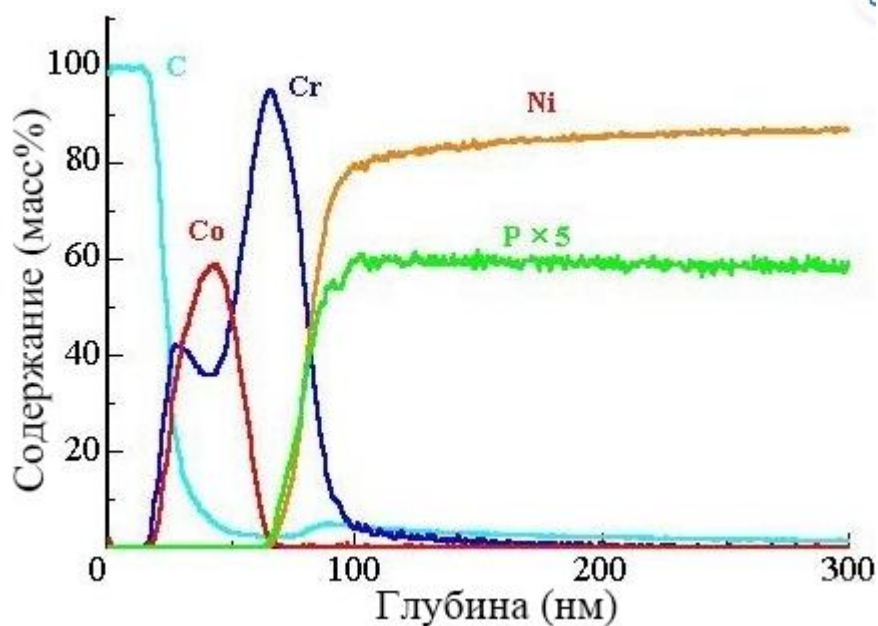


Рисунок 24 – Результаты анализа эксперимента, полученного на компьютерной программе [75]

Спектральный метод испускания света начал широко использоваться в 1960 - х годах. Его разрешение высокое, спектральная линия невысокая и быстро анализируется. Таким образом, он играет важную роль в анализе компонентов материалов. Даже сейчас этот метод широко используется в лаборатории [75].

Спектрометр может анализировать не только элементы на поверхности твёрдых тел, но и жидкости, а также компоненты порошка.

Gai R. и другие представили спектрометр, используемый для анализа состава жидкости [76], и успешно проанализировал состав сверхмикроскопических примесей в растворе силиката иттрия. Этот аналитический инструмент работает так: кладет жидкость на графитовые электроды и подключается к 1000 вольт постоянного тока. Электроды излучают свет на обоих концах.

В настоящее время широко распространена торговая марка GD-OES под названием HORIBA (Франция) [78]. Серия GD-Profilер, выпущенная компанией это обычный прибор для лабораторных помещений.

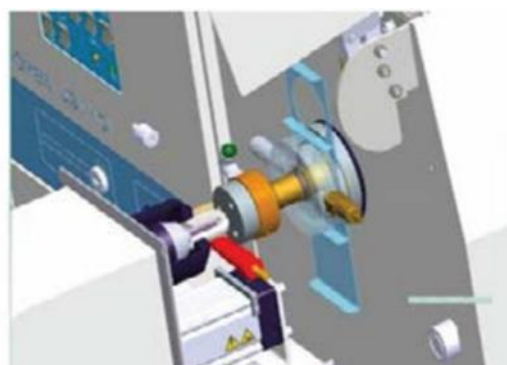


Рисунок 25 – Внешний вид установки GD-Profilер 2 [78]

Серия GD-Profilер имеет хорошие функции - функция радиочастотной частоты который поможет анализировать материалы, не проводящие

электричество. И получить более гладкие результаты анализа, чем в режиме постоянного тока, т.е. более точные результаты компонентов элементов на той же глубине.

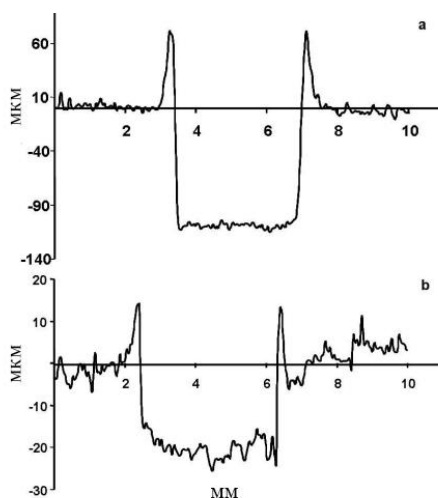


Рисунок 26 – Форма кратера на поверхности образца после распыления, а - использование радиочастотного генератора, б – генератор постоянного тока [79]

2.2.1 Принцип обнаружения элементов, параметры распыления

Наша установка GD-Profilер 2 способно анализировать только 47 химических элементов, включает в себя элементы, такие как углерод, водород, кислород, азот, фосфор, бор, сера или другие органические элементы Мах фазы, и подавляющее большинство металлических элементов.

Традиционные спектрометры обычно применяют принцип дисперсии, которая происходит, когда смешанный свет проходит через среду, угол преломления света на разных волнах при пересечении среды отличается [79]:

$$\theta = i_1 + \arctan\left(n \sin\left(\alpha - \arctan\left(\frac{\sin i_1}{n}\right)\right)\right) - \alpha, \quad (1)$$

где θ - угол отклонения, i_1 - угол падения, α - угол призмы, n - показатель преломления который связан с длиной волны света, длиннее длина волны света, выше показатель преломления. Таким образом, свет на разных частотах

отклоняется под разными углами. Таким образом, приемник должен прибыть в назначенное место заранее

После выбора диапазона элементов приёмник спектрометра достигнет места спектральной линии указанного элемента.

Далее нам нужно очистить поверхность образца, и рабочие места устройства. Пятна на поверхности образца также будут обнаружены устройством, толщина пятна может быть намного больше толщины поверхности образца, что может оказать огромное влияние на результаты эксперимента. Поэтому должны полностью очистить поверхность образца.

Влияние приводного явления, вызванного столкновением частиц, в рабочем месте устройства может сохраняться определенное количество атомов или молекул последнего эксперимента, которые также влияют на результаты эксперимента, поэтому должны очистить эту часть [80].

Необходимо установить параметры работы приборов в компьютерной программе, такие как давление, время работы, интенсивность и т.д. Давление должно быть настроено на низкий вакуум, около 600 паскалей. Низкий вакуум уменьшает столкновение частиц с молекулами воздуха, которые замедляются при столкновении частиц с молекулами воздуха, что означает, что устройство не сможет функционировать должным образом.

Давление настройки также связаны с материалом. Когда материал предназначен для хрупких материалов, давление не может быть установлено слишком низко, чтобы предотвратить разрушение материала. Параметры интенсивности и времени связаны с толщиной материала, и чем больше времени уходит на то, чтобы материал был толще, тем сильнее он становится. Или, скорее, нам не нужно изучать все покрытие целиком, нам нужна только часть покрытия, чтобы не понадобилось слишком много времени, которому нужно устанавливать.

Когда материал очень маленький (меньше 1 см²), должны использовать специальные зажимы, чтобы не повредить или не заблокировать его в рабочем

месте. Эти зажимы обычно сделан из металла, который проводит электричество. Не только для поддержания материала, но и для обеспечения электрического поля. Наш образец, как катод, используется для привлечения катионов при столкновении. Катион не будет перемещаться к образцу, если материал будет покрыт органическим материалом или другим непроводящим материалом. В этот момент зажимы проводимости может помочь сформировать электрическое поле, чтобы эксперимент пройдет гладко.

2.2.2 Водоохлаждаемый катод

Наше оборудование должно работать в криогенных условиях, поэтому оно должно охлаждать зону работы аргоном. Температура охлаждения связана с проводимостью материалов, и чем ниже проводимость, тем ниже нужная.

Целью охлаждения является уменьшение эффекта эмиссии тепловой электроники. Это интересный эффект, который происходит на поверхности высокотемпературных металлов: когда металл нагревается, электронная кинетическая энергия в металле увеличивается, и когда кинетическая энергия превышает исходящую работу, электроны выбрасываются из электронов в больших объемах [81].

Этот эффект часто используется в электронных источниках, но для наших устройств это «фатальное явление». Электроны разливаются в противоположном направлении от движения аргона, кинетическая энергия больше и влияет на движение катионов. В то же время этот электрон, несущий более высокую энергию, может нарушить порядок в рабочей области, что может привести к тому, что спектрометр не получит эффективный спектр

Вместо этого электроны, которые были выброшены при столкновении с аргоном, называются «вторичными электронами». Эти электроны обладает низкой энергией, которая не нарушает порядок в рабочем месте, в то же время

может быть захвачена атомами материала и не вовлечена в процесс возбуждения спектра атомов.

В то время как устройство работает, температура поверхности образца достигнет тысячи градусов по Цельсию, охлаждаемая работа крайне необходима, иначе она создаст огромное количество термоэлектронов.

Однако в то же время нет возможности установить температуру слишком низко, с одной стороны, чтобы сохранить ресурсы, с другой стороны, металлические материалы повысят хрупкость при слишком низкой температуре.

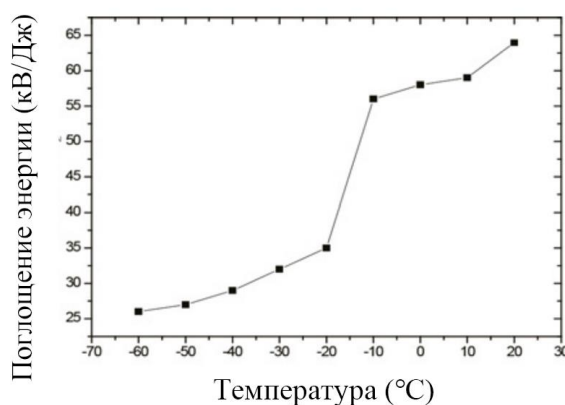


Рисунок 27 – Относительное поглощение энергии и температуры удара от сплава [82]

Например, Liu H. и другие [82] проанализировали взаимосвязь между поглощаемой энергией удара и температурой марганцевой стали, как в рисунке 27, ось x температура, ось y поглощение энергии. При минус 16 градусах в материале произошли заметные изменения в сопротивляемости удару, что означает, что материал трансформируется из вязкости в хрупкость.

Как написано ранее, низкое давление может повредить хрупкие материалы. Чтобы избежать разрушения хрупких материалов, должны надлежащим образом повысить температуру, избегая большого количества термоэлектронных эффектов.

2.2.3 Закон Пашена и тлеющий разряд

Напряжение в обоих концах электропластины, которое необходимо для трансформации, называется пробиваемым напряжением, которое связано с расстоянием между электропластинами и давлением воздуха, этот закон называется закон Пашена.

$$V = \frac{apd}{\ln(pd)} + b, \quad (2)$$

где V – пробивное напряжение (кВ), p – давление (Па), d – расстояние (см), a и b – константы, связанные с компонентом газа.

Закон Пашена был открыт немецким учёным Пашеном в эксперименте, Изображения формулы показывают резкое снижение напряжения при повышении давления воздуха и расстояния, которое затем медленно возрастает при увеличении произведения. Это главная причина, по которой настроен рабочее давление приборов на низкий вакуум. При постоянном расстоянии между электропластинами, низкое давление облегчает переход газа в проводник.

В то время как вторичные электроны постоянно ускоряются под действием электрического поля, его кинетическая энергия будет захвачена частицами материала, атомы материала превратятся в возбужденное состояние.

Согласно теории поля, об атомной энергии, любой атом имеет несколько собственных энергетических уровней. Каждый уровень энергии представляет собой различные электронные структуры атома, и чем выше энергетический уровень, тем выше энергия электронов. Согласно самым низким принципам энергии, высокоэнергетические атомы, находящиеся в возбужденном состоянии нестабильные, будут вернуться в основное состояние, то есть в самое низкое состояние энергии.

Энергия выделяется в виде фотонной энергии, то есть фотонов. Частота движения фотонов влияет на цвет света, и чем выше энергия, содержащаяся в фотонах, тем выше частота фотонов.

$$\varepsilon = h\nu, \quad (3)$$

где ε – энергия отдельных фотонов, h – постоянная планка, ν – частота света.

Атомы могут перемещаться только внутри энергетических уровней различных уровней, в то время как разница энергии между уровнями энергии фиксирована, и разница энергии связана с электронным выхлопом атома, т.е. с типом атома. Таким образом, переход атома к низкому уровню энергии только высвобождает фиксированную энергию, не больше и не меньше, каждый атом может выпустить только ряд фотонов с фиксированной частотой. Это отличительная черта каждого атома. Например, атом натрия излучает желтый свет, атом аргона излучает фиолетовый свет, атом криптона белый свет, медь — зеленый свет, и так далее.

Световой тлеющий разряд часто применяется к источникам света и спектральному анализу, в последние годы применялся к очистке сточных вод, стерилизации и изменению поверхности материалов [83]. В наших инструментах приёмник спектрометра может распознавать свет на различных частотах, а также вычислять типы элементов, основываясь на зависимости угла отклонения от частоты, о которой говорилось выше.

2.2.4 Пример анализа результатов

В компьютерной программе получено изображение результатов работы спектрометра. Это график кривой, содержащей все элементы. На рисунке 28 показан пост-экспериментальный график.

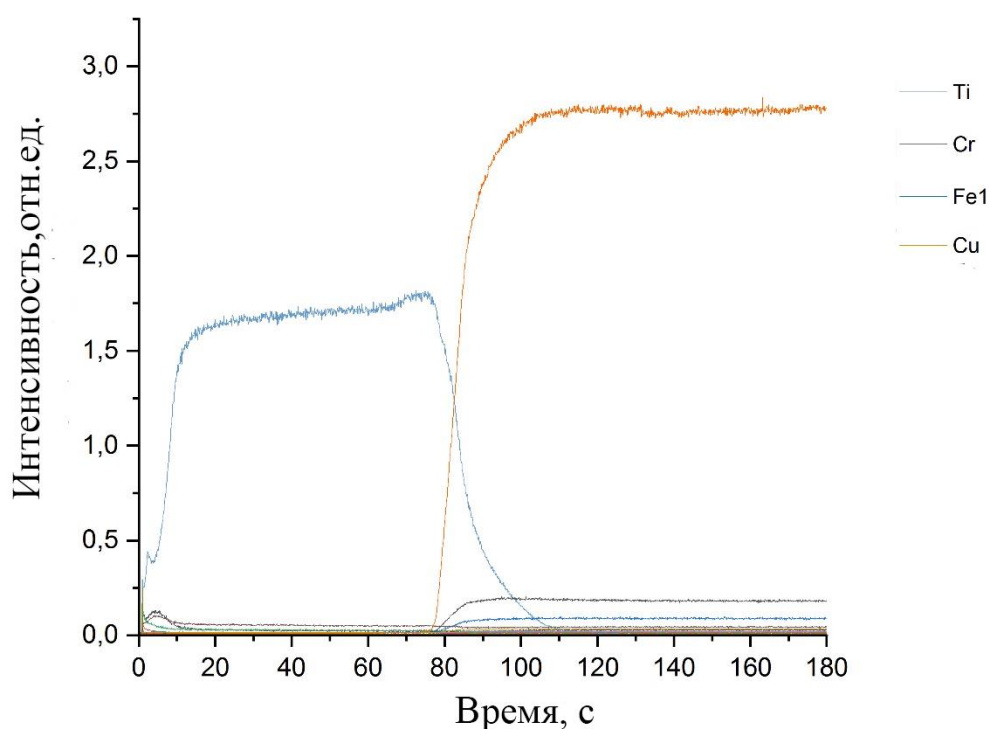


Рисунок 28 – Пример профиль распределения элементов

Как показано на рисунке 28, это график зависимости интенсивности от времени распыления диаграмма об отношениях между интенсивностью и временем. Интенсивность — интенсивность сигнала, полученного спектрометром, чем выше уровень интенсивности, тем выше уровень содержания элемента.

Физическая величина поперечной оси изображения — это время. Он представляет собой время работы установки в области тлеющего разряда света. При постоянном увеличении других параметров атомы на поверхности материала постепенно исчезают, и на поверхности появляется яма, выжатая ионами.

Средняя глубина ямы изменяется равномерно со временем 83, поэтому время работы инструмента может быть относительно символическим для глубины материала, который анализируется компьютером.

Нам просто нужно измерить глубину ямы, оставленной на поверхности экспериментального материала, которая является конечным временем работы оборудования. Затем пропорционально преобразовали ось временных координат в глубокую ось, наконец-то получена диаграмма уровней элемента-глубина.

Наша задача состоит в том, чтобы исследовать состав тонкопленочного покрытия на поверхности материала.

На начальной стадии (с 0 до 160 секунд) можно наблюдать, что в интервалах между 0-80 секунд постоянно доминируют титановые элементы, в которых присутствуют другие элементы с очень низким содержанием. Но ввремя 80 секунд ситуация изменилась, и титановые элементы начали постепенно сокращаться до нуля, в то время как количество Cr, Cu, двухвалентного железа и три валентного железа начало резко расти. В частности, тройное железо, содержащее больше титанового элемента, чем раньше.

Исходя из этого, можно приблизительно оценить, что поверхность материала покрыта примерно двумя слоями. Первой слой покрыт (0 — 80 секунд) Ti элемент. Второй слой покрыт большим количеством трехвалентного железа и небольшим количеством хрома, двухвалентного железа, меди.

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

Студенту:

Группа	ФИО
150Б95	Ван Чжихуай

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	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>	- материально-технические затраты, - энергетические, - финансовые - информационные - человеческие
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Знакомство и установление норм и нормативов расходования ресурсов</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Знакомство с системой налогообложения, со ставками налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	- Потенциальные потребители результатов исследования; - Проведение анализа конкурентоспособности.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	- цели и результаты проекта; - организационная структура проекта.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	- Структура работ в рамках научного исследования; - Разработка графика проведения научного исследования; - Бюджет научно-технического исследования.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений;</i> 2. <i>SWOT- анализ;</i> 3. <i>График проведения и бюджет НИ;</i> 4. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН	Верховская Марина Витальевна	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б95	Ван Чжихуай		

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Анализ аналогичных конкурентных технических решений с точки зрения ресурсосбережения и ресурсоэффективности

С целью успешного вывода разработки на рынок, необходимо постоянно и систематически проводить анализ аналогичных товаров конкурирующих групп, т.к. новые разработки постоянно появляются и изменяются с течением времени. Анализ группы конкурирующих товаров необходимо проводить с целью внесения, в научное исследование, важных корректировок и исправлений, целью которых является постоянное повышение конкурентоспособности товара (разработки) на рынке. Рассматривая вышеописанный анализ с точки зрения ресурсосбережения и ресурсоэффективности, мы получаем группу показателей сравнительной эффективности научной разработки и определяем пути и возможности ее развития и востребованности в обозримом будущем. Разработка тонкопленочных материалов методом оптической эмиссионной спектроскопии тлеющих разрядов и анализ содержания элементарного водорода в образцах с помощью анализатора водорода являются техническими решениями, разработанными в рамках данной работы. Эти работы способствуют созданию или изменению стандартов на экспериментальные методы и условия производства материалов.

К1 - методика качественного анализа тонкопленочных материалов с помощью спектрометра GD-Profilier 2 фирмы Horiba Jobin Yvon и анализатора водорода Leco RHEN 602.

Для проведения вышеописанного анализа, используем оценочную карту, приведенную в таблице 4.

Таблица 4 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _Ф	Б _{К1}	К _{КФ}	К _{К1}
1	2	3	4	6	7
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1) Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,2	4	4	0,8	0,8
2) Помехоустойчивость	0,05	4	2	0,2	0,1
3) Энергоэкономичность	0,05	4	4	0,2	0,2
4) Надежность	0,1	4	3	0,4	0,3
5) Уровень шума	0,05	5	5	0,25	0,25
6) Безопасность	0,01	5	5	0,05	0,05
7) Простота эксплуатации	0,05	4	5	0,2	0,2
8) Качество интеллектуального интерфейса	0,03	5	5	0,015	0,015
9) Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,02	5	5	0,1	0,1
10) Быстрота обработки полученных результатов	0,1	4	5	0,4	0,5
11) Компактность	0,02	5	5	0,1	0,1
12) Необходимость контролирования выполняемых процессов оператором установки	0,05	4	5	0,2	0,25
Экономические критерии оценки эффективности					
1) Конкурентоспособность продукта	0,05	4	4	0,2	0,2
2) Уровень проникновения на рынок	0,02	5	5	0,1	0,1
3) Цена	0,03	4	4	0,12	0,12
4) Предполагаемый срок эксплуатации	0,02	4	4	0,08	0,08
5) Послепродажное обслуживание	0,01	4	4	0,04	0,04
6) Финансирование научной разработки	0,08	4	5	0,32	0,4
7) Срок выхода на рынок	0,05	4	4	0,2	0,2
8) Наличие сертификации разработки	0,01	4	4	0,04	0,04

Итого	1	87	86	4,015	4,009
-------	---	----	----	-------	-------

На основании анализа, представленного в сравнительной таблице показателей, можно сделать вывод, что технология тонкопленочного анализа, разработанная с использованием радиочастотных источников переменного тока, опережает своих конкурентов по многим показателям. Это, например, легкость в эксплуатации, энергопотребление, безопасность и простота эксплуатации. Экономические показатели этой разработки во многом превосходят показатели основных конкурентов. Предлагаемый метод анализа тонких пленок с использованием ВЧ источника переменного тока имеет более высокий уровень качества и способность конкурировать с другими разработками со стандартными заданными параметрами.

4.2 Организация и планирование работ

Определяющим фактором, выражающим большую часть стоимости НТД, является заработная плата людей, участвующих в проекте. Поэтому очень важно определить размер заработной платы рабочей силы.

Таблица 5 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Разработка технического задания	Науч. руководитель (НР)	НР - 100%
Выбор направления исследований	Науч. руководитель (НР) Студент-инженер (СИ)	НР - 90% СИ - 10%
Теоретические и экспериментальные исследования	Студент-инженер (СИ) Науч. руководитель (НР)	НР - 50% СИ - 50%
Обобщение и оценка результатов	Науч. руководитель (НР) Студент-инженер (СИ)	НР - 30% СИ - 70%
Разработка технической документации	Науч. руководитель (НР) Студент-инженер (СИ)	НР - 20% СИ - 80%
Изготовление исследуемых образцов	Студент-инженер (СИ) Науч. руководитель (НР)	НР - 60% СИ - 40%
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	Студент-инженер (СИ)	СИ - 100%

4.2.1 Продолжительность этапов работ

Для определения трудоёмкости реализации научного исследования выпускной квалификационной работы используется экспертный способ, основным показателем которого является человеко-день. Для расчета предполагаемого значения трудоёмкости используют следующую формулу:

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}, \quad (4)$$

где $t_{ож}$ - ожидаемая трудоёмкость выполнения работы чел.-дн.; t_{min} - минимально возможная трудоёмкость выполнения работы чел.-дн.; t_{max} - максимально возможная трудоёмкость выполнения работы, чел.-дн.

Произведем оценку трудоёмкости выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 5}{5} = 3,2 \text{ чел. -дн.}, \quad (5)$$

Произведем оценку трудоёмкости выполнения научного исследования для студента-инженера:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 90 + 2 \cdot 180}{5} = 126 \text{ чел. -дн.}, \quad (6)$$

Рассчитав ожидаемую трудоёмкость работ, определим продолжительность каждой работы в рабочих днях $T_{РД}$, учитывая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями, по следующему соотношения:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} * K_{Д}, \quad (7)$$

где $T_{РД}$ - продолжительность одного этапа работы, раб.дн.; $t_{ож}$ - продолжительность работы, дн.; $K_{ВН}$ - коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно $K_{ВН} = 1$; $K_{Д}$ -

коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию не предвиденных задержек и согласование работ, $K_d = 1$.

Произведем расчет продолжительности работы выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$T_{РД} = \frac{3,2}{1} = 3,2 \text{ раб. дн.}, \quad (8)$$

Произведем расчет продолжительности работы выполнения научного исследования для студента-инженера:

$$T_{РД} = \frac{126}{1} = 126 \text{ раб. дн.}, \quad (9)$$

Для проведения научного исследования, представленного в выпускной квалификационной работе, выбирают специальную узко направленную научную тему. Для этого строится специальный ленточный график проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Для построения графика необходимо перевести рабочие дни в календарные дни, для чего воспользуемся следующим соотношением (формула 10):

$$T_{КД} = T_{РД} * T_K, \quad (10)$$

где $T_{КД}$ - продолжительность выполнения этапа в календарных днях; T_K - коэффициент календарности, определяющийся выражением (формула 11):

$$T_K = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (11)$$

где $T_{КАЛ}$ - количество календарных дней в году; $T_{ВД}$ - количество выходных дней в году; $T_{ПД}$ - количество праздничных дней в году.

Рассчитаем коэффициент календарности (формула 12):

$$T_K = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205 \quad (12)$$

Далее необходимо построить таблицу по результатам расчетов, в которой необходимо указать трудоемкость работы, название работы, а также указать длительность работ в рабочих и календарных днях.

Таблица 6 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ						Длитель. работ в рабочих днях $T_{РД}$		Длитель. работ в календар. днях $T_{КД}$	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни					
Исполнители	НР	СИ	НР	СИ	НР	СИ	НР	СИ	НР	СИ
Разработка технического задания	2		5		3,2		3,2		3,9	
Выбор направления исследований	2	4	4	8	2,8	5,6	2,8	5,6	3,4	6,8
Теоретические и экспериментальные исследования	5	30	10	35	7	32	7	32	8,4	38,6
Обобщение и оценка результатов	1	5	2	10	1,4	7	1,4	7	1,7	8,4
Разработка технической документации	6	20	12	25	8,4	22	8,4	22	10,1	26,5
Изготовление опытного образца	4	10	8	15	5,6	12	5,6	12	6,8	14,5
Оформление отчета по НИР		25		30		27		27		32,5
Итого					28,4	105,6	28,4	105,6	34,3	127,3

На основании таблицы 7 был построен календарный план-график.

Таблица 7 – Исполнители календарного план-графика

Научный руководитель	
Студент-инженер	

4.3 Бюджет научного исследования

4.3.1 Расчет материальных затрат

Расчет материальных затрат включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- приобретаемые со стороны сырье и материалы;
- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции;
- покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;
- сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований и для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделий.

Таблица 8 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед.,руб.	Сумма, руб.
Круг ниобиевого сплава НБ 1-0	кг	1	12500	12500
Круг циркониевого сплава Э100	кг	1	7500	7500
Баллон с газом (аргон особой чистоты)	шт	1	8800	8800
Кремниевая подложка	шт	25	120	3000
Халат	шт.	1	500	500
Резиновые перчатки	шт.	4	21	84
Спирт	мл	100	67	7
Итого:				32391

Для выполнения выпускной квалификационной работы использовался спектрометр тлеющего разряда GD-Profilер 2 фирмы Horiba Jobin Yvon, работа которого основана на оптической эмиссии возбужденных атомов в плазме тлеющего разряда, необходимый для проведения работ по научной теме. В качестве расходного материала для данного анализатора используется газообразный аргон особой чистоты, как рабочий газ плазмы, являющийся обязательным материалом для проведения анализа.

С учетом транспортно-заготовительных расходов (ТЗР) в 10% материальные затраты составляют (формула 13):

$$C_{\text{мат}} = 32391 * 1,1 = 35630,1 \text{ руб.} \quad (13)$$

4.3.2 Расчет заработной платы

Для вычисления основной заработной платы необходимо учесть научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, участвующих в выполнении выпускной квалификационной работе.

Таблица 9 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52/14	104/14
- выходные дни		
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	48/5	24/10
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Среднедневная тарифная заработная плата рассчитывается по формуле 14:

$$Z_{\text{дн-т}} = \frac{MO}{25,083}, \quad (14)$$

где MO - месячный должностной оклад работника, руб.

В таблице 10 произведен расчет заработной платы.

Таблица 10 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб/мес	Среднедневная ставка, руб/раб. день	Затраты времени, раб. дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб
НР	33664	1342,09	28	1,699	63845,91
СИ	16470	616,75	106	1,62	107906,58
Итого:					171752,49

4.3.3 Дополнительная заработная плата

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (15)$$

где, $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0.12-0.15).

Дополнительная заработная плата руководителя:

$$Z_{доп} = 0,13 \cdot 63845,91 = 8\,299,96 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата инженера (магистранта):

$$Z_{доп} = 0,13 \cdot 107906,58 = 14\,027,85 \text{ руб.}$$

Суммарная дополнительная заработная плата равна 22 327,75 рублей.

4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляет 30% от полной заработной платы по проекту (формула 16):

$$C_{соц} = 171752,49 \cdot 0,3 = 51525,747 \text{ руб.} \quad (16)$$

4.3.5 Расчет затрат на электроэнергию

Потребляемая мощность анализатора GD-Profilер2 и Leco RHEN 602 составляет 7кВт/час и 7,5кВт/час соответственно. Длительность еженедельной работы на анализаторах составляет 2 часа. Стоимость электроэнергии в Томске составляет 4,39 рубля за 1 кВт.час. Следовательно, стоимость электропотребления за 5 месяцев составляет (формула 17):

$$C_{эл.об.} = P_{об} \cdot Ц_{э} \cdot t_{об}, \quad (17)$$

где $P_{об}$ - мощность, потребляемая оборудованием, кВт; $Ц_{э}$ - тариф на 1 кВт·час; $t_{об}$ - время работы оборудования, час.

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{об}$, час	Потребляемая мощность $P_{об}$, кВт	Затраты $\Delta_{об}$, руб.
Персональный компьютер	884,8*0,6	0,3	699,17
Спектрометр GD-Profiler 2	40	7	1229,2
Анализатора RHEN602	40	7.5	1317
Итого:			3245,37

4.3.6 Расчет амортизационных расходов

Средства на приобретение спектрометра не затрачивались, так как спектрометр уже был приобретен кафедрой. Необходимо рассчитать амортизационные отчисления на данный вид оборудования.

Срок полезного использования анализатора составляет 10 лет, поэтому норма амортизации равна (формула 18):

$$H_a = \frac{1}{n} * 100 = \frac{1}{10} * 100 = 10\%, \quad (18)$$

где H_a - норма амортизации в процентах, n - срок полезного использования в годах.

Первоначальная стоимость оборудования составляет 7 000 000 рублей. Из этого следует, что годовая сумма амортизации составит (формула 19):

$$C_{ам} = \frac{C_{об} * H_a * t_{рф}}{F_d} = \frac{7000000 * 0,1 * 40}{200} = 140000 \text{ руб}, \quad (19)$$

где $C_{об}$ - первоначальная стоимость оборудования; $t_{рф}$ - фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта; F_d - действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования.

Первоначальная стоимость персонального компьютера составляет 45 000 рублей. Из этого следует, что годовая сумма амортизации составит (формула 20):

$$C_{AM} = \frac{Ц_{ОБ} * H_a * t_{рф}}{F_d} = \frac{45000 * 0,4 * 884,8}{2384} = 6680,54 \text{ руб.} \quad (20)$$

4.3.7 Расчет прочих расходов

Прочие расходы научного исследования составляют 10 % от суммы всех предыдущих расходов, а именно (формула 21):

$$\begin{aligned} C_{проч} &= (C_{мат} + C_{зп} + C_{соц} + C_{эл.об} + C_{AM}) \\ &= (35630,1 + 171752,49 + 51525,747 + 3245,37 \\ &\quad + 146680,54) * 10\% = 40883,42 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (21)$$

4.3.8 Формирование бюджета затрат НИИ

Формирование бюджета научно-исследовательского проекта является основой для определения бюджета затрат проекта, и формируется исходя их вышеприведенных расчетов. Результатом является таблица 12 расчетов бюджета затрат проекта.

Таблица 12 – Формирование бюджета затрат НИИ

Статья затрат	Сумма, руб
Материалы и покупные изделия	35630,1
Основная заработная плата	171752,49
Дополнительная заработная плата	22 327,75
Отчисления во внебюджетные фонды	51525,747
Расходы на электроэнергию	3245,37
Амортизационные отчисления	146680,54
Прочие расходы	40811,3767
Итого:	408875,64

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

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по формуле 22:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (22)$$

где Φ_{pi} - стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} - максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле 23:

$$I_{pi} = \sum a_i * b_i, \quad (23)$$

где a_i - весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки; b_i - бальная оценка i -го варианта исполнения разработки.

В таблице 13 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. Под исполнением 1 представлена методика качественного анализа материалов, заложенная в программе как базовая.

Таблица 13 – Сравнительная оценка характеристик

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Данный проект	Исполнение 1
Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	5
Соответствует требованиям потребителей	0,15	4	4

Энергосбережение	0,2	4	3
Надежность	0,2	4	5
Материалоемкость	0,2	5	4
Интегральный показатель ресурсоэффективности		4,45	4,25

Характеристики имеют схожие критерии, так как методики реализованы для одного прибора. Каждая из представленных методик реализована для определенной задачи.

Пример расчета интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_p = 0,25 * 5 + 0,15 * 4 + 0,2 * 4 + 0,2 * 4 + 0,2 * 5 = 4,45 \quad (24)$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле 24:

$$I_{\text{исп}} = \frac{I_{pi}}{I_{\text{финр}}}. \quad (25)$$

Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле 25:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{д.п.}}}{I_{\text{исп}}}. \quad (26)$$

В таблице 14 представлена сравнительная эффективность разработки.

Таблица 14 – Сравнительная эффективность

№	Показатели	Данный проект	Исполнитель 1
1	Интегральный финансовый показатель	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	4,45	4,25
3	Интегральный показатель эффективности	4,45	4,25
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,05	0,95

Как видно из таблицы 14, разработанная методика более эффективна, чем стандартная.

Традиционная оценка экономической эффективности полученных результатов невозможны, т.к. они носят чисто научный характер.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
150Б95	Ван Чжихуай

ШКОЛА	ИЯТШ	Отделение	
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	03.03.02Физика

Тема дипломной работы: «Анализ распределения водорода в наноразмерных металлических покрытиях Zr/Nb после наводораживания»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<ul style="list-style-type: none"> • Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения) <li style="text-align: center;">Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности • специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; • организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p style="text-align: center;">Объект исследования – Многослойные наноразмерные покрытия и оптический эмиссионный спектрометр тлеющего разряда.</p> <p style="text-align: center;">Область применения – Материалы защищающие от водорода и его хранения, тонкие плёнки, и т.д.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Производственная безопасность Анализ показателей шума и вибрации Анализ показателей микроклимата Анализ освещенности рабочей зоны Анализ электробезопасности Анализ пожарной безопасности</p>	<p style="text-align: center;">-Давыдов, Борис Ильич. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений / Б. И. Давыдов, В. С. Тихончук, В. В. Антипов. — Москва: Энергоатомиздат, 1984. — 177 с.: ил.: 21 -Грачёв, Николай Николаевич. Защита человека от опасных излучений / Н. Н. Грачёв, Л. О. Мырова. — Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. — 317 с.: ил. — Библиогр.: с. 316-317.</p>
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> • защита селитебной зоны • анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); • анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); • анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); • разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>Выброс криогенного газа аргона во время эксперимента. Возможное удаление обломков материала и отходов во время экспериментов. Во время экспериментов возникают следовые количества ионизирующего излучения и теплового излучения.</p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> • перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; • выбор наиболее типичной ЧС; • разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; • разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p>Были рассмотрены два типа чрезвычайных ситуаций:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) поражение сотрудников электрическим током 2) возникновение пожара <p>Необходимо предусмотреть меры по обеспечению стабильной работы производства в обоих случаях.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	24.05.2023г.
---	--------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доктор технических наук	Сечин Александр Иванович	д.т.н.		24.05.2023г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б95	Ван Чжихуай		24.05.2023г..

Введение

Для выполнения выпускной квалификационной работы «Анализ распределения водорода в наноразмерных металлических покрытиях Zr/Nb после наводороживания» была проведена серия экспериментов с использованием различного оборудования для решения поставленной задачи, такого как спектрометр тлеющего разряда GD-Profilер 2 производства Horiba Jobin Yvon, анализатор водорода RHEN602 производства Leco и т.д. Химический анализ и распределение слоев наноразмерных металлических слоев Zr/Nb, представленных в выпускной квалификационной работе, проводился на спектрометре тлеющего разряда GD-Profilер 2, используемом на кафедре экспериментальной физики Школы ядерной инженерии. Анализируя спектры оптического излучения распыленных атомов в плазме, можно определить химический состав материала и его распределение по глубине. В связи с этим детальное рассмотрение правил охраны труда и техники безопасности при работе на спектрометре GD-Profilер 2 особенно необходимо при проведении экспериментальных исследований, включенных в выпускную квалификационную работу.

Эти наноразмерные металлические Zr/Nb слои могут проявлять свойства хранения водорода в водородсодержащей среде, и поэтому изучение свойств этих покрытий может решить проблему преждевременного водородного охрупчивания материалов в агрессивных средах, например, потенциальное применение таких покрытий - защитные слои для топливных стержней ядерных реакторов, работы по хранению и транспортировке ядерного топлива и его отходов и т.д.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

К работе с спектрометром тлеющего разряда допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющих медицинских противопоказаний, прошедших вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний правил электробезопасности, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы с использованием спектрометра тлеющего разряда, ознакомленные с инструкцией по эксплуатации прибора имеющие не менее II группы по электробезопасности и получившие допуск к работе с газовыми баллонами, работающими под давлением.

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, правил безопасной работы с газовыми баллонами проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте - не реже 1 раза в 3 месяца.

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

По данной теме рассматриваются специальные законодательные и нормативные документы;

- инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В;
- инструкция № 2-07 по охране труда при работе с баллонами, работающими под давлением;
- инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ.

5.2 Производственная безопасность

Для идентификации потенциальных факторов был использован ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разрабо тка	Изготов ление	Эксплу тация	
1.Отклонение показателей микроклимата	-	-	+	Требования к микроклимату устанавливаются согласно СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
2. Превышение уровня шума		-	+	Требования к уровню шума на рабочих местах и производственной вибрации устанавливаются согласно СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.
3.Отсутствие или недостаток естественного света	-	-	-	-
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны		-	+	Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*.
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	-	-	+	Система стандартов по электромагнитной безопасности складывается из ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности. и СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические

				требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
--	--	--	--	--

5.2.1 Анализ вредных факторов

Микроклиматом производственных помещений - называют метеорологические условия внутри помещений. Эти условия определяются действующим на организм человека рядом факторов. В этот ряд входят температура воздуха, влажность, скорость движения воздуха и тепловое излучение. Так же на микроклимат влияет набор физических факторов, оказывающих влияние на состояние человека. Это теплообмен человека с окружающей средой и факторы, определяющие самочувствие. Такие факторы как работоспособность, здоровье и производительность труда.

Перегрев организма наступает при высокой температуре воздуха и высокой относительной влажности, которые сопровождаются низкой подвижностью воздушной массы. Симптомами перегрева являются – учащение пульса, ощущение слабости, сильное потоотделение, увеличение температуры тела, иногда головная боль. Переохлаждение организма возникает при наличии низкой температуры воздуха и высокой влажности в сочетании с высокой подвижностью воздушной массы. При наступлении переохлаждения снижается температура тела, происходит сужение кровеносных сосудов, возникают сбои в работе сердечнососудистой системы.

Санитарными нормами, установленными для производственных помещений утверждены оптимальные и допустимые интервалы температуры воздуха, относительной влажности и скорости движения воздушных масс. Нормативы установлены с учетом тяжести выполняемой работы и времени года.

В таблице 16 отражены наиболее оптимальные климатические параметры в производственных помещениях для категории легких работ. К

такovým относятся работы, которые выполняются сидя и не требуют высокого физического напряжения.

Таблица 16 – Оптимальные климатические параметры

Период года	Температура, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с, не более
Холодный	22-24	40-60	0,1
Теплый	23-25	40-60	0,1

Шум - колебания, как правило, беспорядочные, разнообразной физической природы. При эксплуатации спектрометра GD-Profiler 2 основными источниками шума являются генератор азота и форвакуумные насосы. Все электронное компьютерное оборудование создает шум от своих вентиляторов охлаждения. Длительное воздействие шумовых колебаний на человека может привести к ослаблению слуха, а в некоторых случаях - к полной его потере. Установлено, что загрязнение шумовыми колебаниями среды, на рабочем месте, негативно влияет на людей. Как следствие, у работающих, понижается внимание, увеличиваются затраты энергии при идентичной физической нагрузке, тормозятся психические реакции и т.п. Как итог - понижается производительность труда, страдает качество выполняемой работы.

Уровни шума на рабочих местах пользователей персональных компьютеров не должны превышать значений, утвержденных. Рабочая зона соотносится с категорией 3 тип «в» комфорт согласно ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Максимально допустимые уровни звука, уровни звукового давления и эквивалентные уровни звука для такой категории приведены в таблице 17. При значениях выше санитарных норм спектральных показателей вибрационной нагрузки на оператора необходимо предусмотреть средства коллективной (СКЗ) и индивидуальной защиты (СИЗ).

Таблица 17 – Санитарные нормы спектральных показателей вибрационной нагрузки на оператора. Локальная вибрация

Средне-геометрические частоты октавных полос, Гц	Нормативные значения в направлениях			
	виброускорения		виброскорости	
	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	дБ	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 10^{-2}$	дБ
8	1,4	123	2,8	115
16	1,4	123	1,4	109
31,5	2,7	129	1,4	109
63	5,4	135	1,4	109
125	10,7	141	1,4	109
250	21,3	147	1,4	109
500	42,5	153	1,4	109
1000	85,0	159	1,4	109

К СКЗ относятся: устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования; изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения; применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения. В качестве материала можно использовать минеральную вату, гипсокартон, стекловату, базальтовую вату, древесное волокно, вспененный полиэтилен и др. К СИЗ - применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

Уровень освещенности, на рабочем месте, должен соответствовать условиям работы и быть оптимальным по яркости. Световой спектр должен максимально соответствовать дневному освещению, так как оно оптимально соответствует человеческой физиологии. Очень высокий уровень освещенности, так же, как и недостаточный, приводит к быстрому утомлению зрения. Освещение должно быть равномерным на всей площади рабочего места, так как при переносе взгляда с более освещенных на менее освещенные участки рабочего места и наоборот происходит понижение остроты зрения на достаточно долгий промежуток времени. Требования к уровню освещенности в производственных помещениях утверждены сводом правил.

Для производственных помещений всех назначений применяются системы общего (равномерного или локализованного) и комбинированного (общего и местного) освещения. Выбор между равномерным и локализованным освещением проводится с учётом особенностей производственного процесса и размещения технологического оборудования. Система комбинированного освещения применяется для производственных помещений, в которых выполняются точные зрительные работы. Применение одного местного освещения на рабочих местах не допускается. Учитывая особенности процесса работы на спектрометре GD-Profilер 2 (не требуется освещения для проведения работ высокой точности) возможно применение схемы общего равномерного освещения.

Электромагнитное поле — это силовое поле, образованное вокруг электрического тока, эквивалентное электрическому полю и магнитному полю, расположенным под прямыми углами друг к другу.

Источниками электромагнитного излучения являются приборы, работающие от электрического тока. Например: линии электропередач компьютеры, телефоны, и т.д. Помещение, в котором располагается научно-исследовательское оборудование, оснащено персональными компьютерами. Исходя из этого основным источником электромагнитного излучения, в помещении лаборатории, является компьютер. В России система стандартов по электромагнитной безопасности складывается из ГОСТ 12.1.006-84 и СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Длительное воздействие электромагнитного излучения на организм человека ведёт к нарушениям процессов в центральной нервной системе, сбоям в работе сердечнососудистой системы. Возможно появление катаракты хрусталика глаза, ломкости ногтей и выпадения волос. Первыми симптомами воздействия электромагнитных полей являются быстрая утомляемость, слабость, головные боли, понижение частоты пульса и повышение температуры тела.

5.2.2 Анализ опасных факторов

Воздействие электрического тока на человека носит разносторонний и своеобразный характер. Прохождение электрического тока через организм может вызвать у человека раздражение кожных покровов и повреждения различных внутренних органов. Пороговое значение неотпускающего электрического тока составляет 10-15 мА. Проходя через живые ткани организма человека, электрический ток производит электролитическое, термическое, механическое, световое, биологическое, световое воздействие на организм. С целью обеспечения максимальной защиты от поражения электрическим током необходимо доскональное соблюдение правил технической эксплуатации электроустановок и проведение мероприятий по защите от электротравм.

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока. Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности), до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью) и свыше 1000 В (особо опасные помещения).

Лаборатория относится к помещению без повышенной опасности поражения электрическим током. В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений, расположения токоведущих частей на недоступной высоте. К СКЗ относятся заземление и разделение электрической сети с помощью трансформаторов - в

результате изолированные участки сети обладают большим сопротивлением изоляции и малой емкостью проводов относительно земли, за счет чего значительно улучшаются условия безопасности.

Основными электробезопасными средствами в электроустановках напряжением до 1000 В являются изолирующие штанги, указатели напряжения, а также изолирующие устройства и приспособления для ремонтных работ. К дополнительным изолирующим электробезопасным средствам относятся диэлектрические перчатки, резиновые коврики и дорожки, изолирующие подставки на фарфоровых изоляторах и переносные заземления.

При работе на спектрометре в качестве газа-носителя используется особо чистый аргон. Газообразный и жидкий аргон получают из воздуха и остаточных газов аммиачных производств. Газообразный аргон не оказывает опасного воздействия на окружающую среду. Он тяжелее воздуха и может накапливаться в слабо проветриваемых помещениях у пола. При этом снижается содержание кислорода в воздухе, что вызывает кислородную недостаточность и удушье. Однако, ПДК на данный газ не предусмотрен. Аргон по опасности относится к классу 2. Также необходимо проводить проверку баллонов на наличие неисправностей так как при утечке газа из баллона возможно удушье, поэтому необходимо знать и неукоснительно соблюдать правила пользования газовыми приборами. Проверить целостность газового баллона и прочность его крепления, наличие видимых повреждений. Вентиль газового баллона и резьба должны находиться в исправленном состоянии, редуктор должен соответствовать газу в баллоне.

5.3 Экологическая безопасность

Охрана окружающей среды - комплексная проблема и наиболее активной формой ее решения является сокращение вредных выбросов

промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства. Для перехода к безотходным производствам в лаборатории необходимо осуществлять сбор аргона в специальные емкости, в настоящее время он выпускается в воздух через специальный фильтр при продувке вакуумной системы.

Также необходимо улучшить систему улавливания/фильтрации масляных паров при работе пластинчато-роторных насосов, так как масло и масляные пары непосредственно влияют на окружающую среду в целом. В данный момент стоят фильтры, улавливающие масло и масляные пары, но все же, используемые фильтры не улавливают все вредные вещества. Следовательно, данный вопрос также необходим к рассмотрению.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований

При обнаружении неисправностей работы спектрометра GD-Profilер 2 необходимо выполнить следующие действия:

- выйти из программы;
- отключить питание компьютера;
- отключить спектрометр GD-Profilер 2 от электросети;
- закрыть вентиль подачи аргона;
- известить об этом вышестоящего руководителя.

В случае обнаружения утечки газа из баллона немедленно прекратить подачу газа из баллона и сообщить об аварийной ситуации непосредственному руководителю.

При возникновении возгорания необходимо немедленно прекратить работу, закрыть баллон с газом, отключить электрооборудование, позвонить в

подразделение пожарной охраны по телефону 01 или 112, сообщить о случившемся руководителю подразделения и приступить к тушению огня первичными средствами пожаротушения.

При поражении работника электрическим током необходимо как можно скорее освободить пострадавшего от воздействия электрического тока, проверить состояние пострадавшего и вызвать при необходимости скорую помощь, до приезда скорой помощи оказать пострадавшему необходимую первую помощь или, при необходимости, организовать доставку пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение, о произошедшем несчастном случае поставить в известность руководителя структурного подразделения.

Заключение по разделу

В данном разделе были рассмотрены необходимые правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, в которых регламентируются условия труда, необходимые инструкции по работе со специальным оборудованием, а также гигиенические требования к организации работы.

Были проанализированы и выявлены опасные и вредные факторы производственной среды. К вредным факторам можно отнести: воздействие электрического напряжения на организм человека, микроклимат, воздействие шума и высоких электромагнитных полей. К опасному фактору можно отнести: электробезопасность, термическую опасность и пожаровзрывобезопасность.

К факторам рабочего места, влияющим на окружающую среду, является газообразные аргон и масляные пары. Для предотвращения негативного влияния эксплуатации установки используются необходимые газовые и масляные фильтры. Установка ежегодно проходит поверку и аттестацию.

Также были рассмотрены различные чрезвычайные ситуации при работе на спектрометре и поведение в них. Приведен план эвакуации при пожаре и других чрезвычайных ситуациях из помещения, в котором проводились работы.

Заключение

Многослойные покрытия применяются в различных областях техники, от микроэлектроники до защитных покрытий от различных видов воздействий. Такое разнообразие в применение многослойных покрытий объясняется многослойной структурой, данные структуры гетерогенны и чередуя определенные слои с заданными свойствами, подбирая различные режимы осаждения покрытий и толщины индивидуальных слоев можно добиться необычных свойств покрытий.

Некогерентные границы раздела, присутствующие в наноразмерных многослойных покрытия являются стоком дефектов при их облучении. Также данные границы имеют высокие механические характеристики за счет ограничения в распространении дислокаций. При анализе твердости многослойные системы показывают высокие значения за счет ограничений в движении дефектов.

Следовательно, можно сделать вывод, что многослойные покрытия являются материалами, свойствами которых можно легко управлять, управляя их структурой.

В этом эксперименте было приблизительно проанализировано влияние некоторых экспериментальных параметров на результаты эксперимента. По приведенным выше экспериментальным результатам можно определить, что в определенном диапазоне, чем меньше количество слоев материала, чем больше толщина отдельного слоя, чем ниже частота импульсов и чем ниже давление, тем лучше экспериментальные результаты для образцов с многослойным покрытием Zr/Nb. Для наноразмерных многослойных материалов необходимо часто экспериментировать с редимами экспериментальных параметров, чтобы определить оптимальные настройки параметров для каждого материала.

Во втором эксперименте исследовалось влияние различных параметров наводороживания (время, давление) на концентрацию и распределение водорода в образцах. На основании результатов эксперимента можно судить, что в диапазоне условий, перечисленных в таблице 2, наибольшее содержание водорода в образце было обнаружено в образцах с многослойным покрытием Zr/Nb50 при времени наводороживания 7 ч или давлении водорода 20 атм, и что в целом, чем выше время и давление, тем выше содержание водорода в образце. Распределение водорода с глубиной образца было одинаковым.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Yu Zh., Li X., Zhang J. Research on AlTiN Coating Structure of Cutting Tool for High-temperature Alloy // Tool Engineering. – 2021. – Vol. 55. – P. 1–3 (In China)
2. Zhang B. Nanocrystalline diamond coating/polishing machine (CMM) measures that the probe can reduce wear and increase size accuracy // Abrasives and Tools Newsletter. – 2015. – Vol. 3. – P. 2–5 (In China)
3. Dai X. Studies on the preparation and anti-corrosion property of the double self-healing MgAlY-LDHs film on magnesium alloys // Chongqing university. – 2021. – P. 9 (In China)
4. Wieciński P, Smolik J, Garbacz H. Mechanisms of failure and deformation in nanostructured laminated coatings Cr/CrN // Surface and surface coverings. – 2014, – Vol. 240. – P. 23–31.
5. Li T., Liu Y., Wang C., Li J., Pei Zh. Latest Development in Synthesis and Modification of Hard Coatings // Chinese Journal of Vacuum Science and Technology. – 2018. – Vol. 38. – P. 10–13 (In China)
6. Jin Y. Microstructure, mechanical and tribological properties of NbN/MoN multilayers films // Xian university of technology. – 2014. – P. 45–47 (In China)
7. Wu Y., Wang B., Xiao L., Wang L., Zhang E., Chen Q., Huang B. Research on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-Al-Si-N Multilayer Gradient Coating // Surface technology. – 2021. – Vol. 50. – P. 3–4 (In China)
8. Zhang B., Deng W., Zhao Y., Li W. Effect of powder feeding rate on properties of plasma sprayed Mo₂NiB₂-based cermet coatings // Mechanical Engineering Materials. – 2022. – Vol. 46. – №. 5. – P. 4–7 (In China)
9. Shuai J. Study on erosion resistance and failure mechanism of Ti/TiAlN multilayer coatings / University of Chinese Academy of Sciences (Ningbo Institute

of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences). – 2020. – P. I–II (In China)

10. Jiang F., Cao X., Xian G., Fan H., Xiong J., Zhao H. Oxidation Resistance and Wear Resistance of TiAlN-TiAlN/CrSiAlN-TiAlON Multilayer Coatings // *Hot Working Technology*. – 2022. – Vol. 51. – №. 08. – P. 2–3 (In China)

11. Wang S., He W., Huang D., Li C., Cai Z., Wang X., Zhang Y. Damage Characteristics and Evolution of Multilayer TiN/Ti Coatings under Cyclic Impact with Different Temperatures // *Surface technology*. – 2022. – Vol. 51. – №. 1. – P. 2–4 (In China)

12. Liu Z. Nanocrystalline Cermet Coating: microstructure Dependence of Oxidation and Cavitation Behavior // *Anhui University of Science and Technology of China*. – 2020. – P. 14–16

13. González-Carrasco J. L., Perez P., Adeva P., Chao J. Oxidation behaviour of an ODS NiAl-based intermetallic alloy // *Intermetallics*. – 1999. – Vol. 7. – №. 1. – P. 69-78.

14. Gao B., Zeng F., Gu Y., Li Y. Bonding and anti-oxidation properties of cermet composite coatings with Ni on surface of nickel-based superalloy for aviation engines // *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*. – 2018. – Vol. 23. – P. 3–6 (In China)

15. Liao Y., Chen M., Wang F., Zhu S. Self-healing High-temperature Protective Metal-Enamel Composite Coatings // *Surface Technology*. – 2020. – Vol. 49. – P. 6–7 (In China)

16. Tan L., Allen T. Busby. Grain boundary engineering for structure materials of nuclear reactors//*Journal of Nuclear Materials*. – 2013. – Vol. 441. – № 1–3. – P. 661–666.

17. Usta M., Tozar A. The effect of the ceramic amount on the radiation shielding properties of metal-matrix composite coatings //*Radiation Physics and Chemistry*. – 2020. – Vol. 177. – P. 109086.

18. Park H. et al. Evaluation of functional loss to radiation detector in tomographic device for spent-fuel inspection by high-energy photons and neutrons: A preliminary study //Annals of Nuclear Energy. – 2023. – Vol. 181. – P. 109558.
19. Alsmadi Z. Y., Bourham M. A. An assessment of protective coating dry cask canisters with structurally amorphous metals (SAMs) for enhanced radiation shielding //Nuclear Engineering and Design. – 2022. – Vol. 388. – P. 111647.
20. Harrison C. et al. Polyethylene/boron nitride composites for space radiation shielding //Journal of applied polymer science. – 2008. – Vol. 109. – №. 4. – P. 2529-2538.
21. Li R. et al. Gamma ray shielding property, shielding mechanism and predicting model of continuous basalt fiber reinforced polymer matrix composite containing functional filler //Materials & Design. – 2017. – Vol. 124. – P. 121-130.
22. DeVanzo M., Hayes R. B. Ionizing radiation shielding properties of metal oxide impregnated conformal coatings //Radiation Physics and Chemistry. – 2020. – Vol. 171. – P. 108685.
23. Ge Y. L. et al. The improved thermal radiation property of SiC doped microarc oxidation ceramic coating formed on niobium metal for metal thermal protective system //Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 309. – P. 880-886.
24. Song X. et al. Preparation of infrared high radiation coatings from modified spinel NiFe₂O₄ and its energy saving applications //Ceramics International. – 2022. – Vol. 48. – №. 14. – P. 20362-20371.
25. Jia T, Wang Y, Li Z, Current status of hydrogen energy development research // Energy Conservation Technology – 2011. – Vol. 6. – P. 264-267.
26. Xu Y. et al. Research progress of hydrogen energy and metal hydrogen storage materials //Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2023. – Vol. 55. – P. 102974.
27. Schur D. V. et al. Hydrogen in lanthan–nickel storage alloys //Journal of alloys and compounds. – 2002. – Vol. 330. – P. 70-75.

28. Chen X. et al. Effect of Mn on the long-term cycling performance of AB5-type hydrogen storage alloy //International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – Vol. 46. – №. 42. – P. 21973-21983.
29. Yong H. et al. Improved hydrogen storage kinetics and thermodynamics of RE-Mg-based alloy by co-doping Ce–Y //International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44. – №. 31. – P. 16765-16776.
30. Li C. et al. Improvement of hydrogen absorption and desorption properties of TiFe-based alloys by adding yttrium //Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 927. – P. 166992.
31. Yang G. et al. Theoretical investigation of Ti and Ni co-doping on the anti-disproportionation ability of ZrCo alloy //Materials Research Express. – 2018. – Vol. 5. – №. 10. – P. 105501.
32. Liang Z. et al. Positive impacts of tuning lattice on cyclic performance in ZrCo-based hydrogen isotope storage alloys //Materials Today Energy. – 2021. – Vol. 20. – P. 100645.
33. Yao Z. et al. An in-depth study on the thermodynamics and kinetics of disproportionation behavior in ZrCo–H systems //Journal of Materials Chemistry A. – 2020. – Vol. 8. – №. 18. – P. 9322-9330.
34. Wang F. et al. Synergetic catalyst effect of Ni/Pd dual metal coating accelerating hydrogen storage properties of ZrCo alloy //International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Vol. 47. – №. 17. – P. 9946-9957.
35. Zainelabdin A. et al. CuO/ZnO nanocorals synthesis via hydrothermal technique: growth mechanism and their application as humidity sensor //Journal of Materials Chemistry. – 2012. – Vol. 22. – №. 23. – P. 11583-11590.
36. Dwivedi S. K., Vishwakarma M. Hydrogen embrittlement in different materials: A review //International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – Vol. 43. – №. 46. – P. 21603-21616.

37. Okonkwo P. C. et al. A focused review of the hydrogen storage tank embrittlement mechanism process //International Journal of Hydrogen Energy. – 2023.
38. Xu Z, Zhang P, Meng G. Review of Studies on Metal Hydrogen Permeation// Surface Technology. – 2019. – Vol. 48. – №. 11. – P. 45–58.
39. Fujii H. et al. Remarkable hydrogen storage, structural and optical properties in multi-layered Pd/Mg thin films //Materials Transactions. – 2002. – Vol. 43. – №. 11. – P. 2721-2727.
40. Jangid M. K. et al. Structural, optical and electrical characterizations of Mg/Ti/Ni multilayer thin films deposited by DC magnetron sputtering for hydrogen storage //International Journal of Hydrogen Energy. – 2022.
41. Shojaeinia A., Aghajani H., Tabrizi A. T. Evaluation of electrochemical hydrogen storage capability of graphene oxide multi-layer coating //International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Vol. 48. – №. 15. – P. 5836-5849.
42. Erdemir A., Eryilmaz O. L., Kim S. H. Effect of tribochemistry on lubricity of DLC films in hydrogen //Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 257. – P. 241-246.
43. Holmberg K., Andersson P., Erdemir A. Global energy consumption due to friction in passenger cars //Tribology international. – 2012. – Vol. 47. – P. 221-234.
44. Farfan-Cabrera L. I. et al. Tribological behavior of H-DLC and H-free DLC coatings on bearing materials under the influence of DC electric current discharges //Wear. – 2023. – Vol. 522. – P. 204709.
45. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon //Materials science and engineering: R: Reports. – 2002. – Vol. 37. – №. 4-6. – P. 129-281.
46. Erdemir A., Donnet C. Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2006. – Vol. 39. – №. 18. – P. R311.

47. Erdemir A., Eryilmaz O. L., Fenske G. Synthesis of diamondlike carbon films with superlow friction and wear properties //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2000. – Vo. 18. – №. 4. – P. 1987-1992.
48. Kano I. Oscillatory Dielectric Liquid Flow Generated by EHD Micropump //2010 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. – IEEE, 2010. – P. 1-8.
49. Martin J. M. et al. Gas-phase lubrication of ta-C by glycerol and hydrogen peroxide. Experimental and computer modeling //The Journal of Physical Chemistry C. – 2010. – Vol. 114. – №. 11. – P. 5003-5011.
50. Kim H. J. et al. A Case of Acromegaly Caused by Double Pituitary Adenomas //Journal of Korean Society of Endocrinology. – 2006. – Vol. 21. – №. 1. – P. 53-57.
51. Sanchez-Lopez J. C. et al. Friction-induced structural transformations of diamondlike carbon coatings under various atmospheres //Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 163. – P. 444-450.
52. Wu X. et al. Tribochemical investigation of DLC coating in water using stable isotopic tracers //Applied Surface Science. – 2008. – Vol. 254. – №. 11. – P. 3397-3402.
53. Wang S. Ma X. Tribological properties of hydrogen containing WC/C composite coatings in different lubricating oil environments // Aerospace Materials & Technology. – 2015. – Vol. 45. – P. 40–44.
54. Xue Q. J., Wang L. P. Diamond-like carbon film materials. – 2012.
55. Hsu S. M., Gates R. S. Boundary lubricating films: formation and lubrication mechanism //Tribology international. – 2005. – Vol. 38. – №. 3. – P. 305-312.
56. Yue Z., Zhou P., Shi J. Some Factors Influencing Corrosion--Erosion Performance of Materials //Wear of Materials 1987. – 1987. – Vol. 2. – P. 763-768.

57. Okolie J. A. et al. Futuristic applications of hydrogen in energy, biorefining, aerospace, pharmaceuticals and metallurgy //International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – Vol. 46. – №. 13. – P. 8885-8905.
58. Das S., Srivastava V. C. Synthesis and characterization of ZnO/CuO nanocomposite by electrochemical method //materials science in semiconductor processing. – 2017. – Vol. 57. – P. 173-177.
59. Chatterjee A. et al. Improvement in the light conversion efficiency of silicon solar cell by spin coating of CuO, ZnO nanoparticles and CuO/ZnO mixed metal nanocomposite material //Journal of the Indian Chemical Society. – 2022. – Vol. 99. – №. 9. – P. 100653.
60. Nwanya A. C. et al. Synthesis, characterization and gas-sensing properties of SILAR deposited ZnO-CdO nano-composite thin film //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2015. – Vol. 206. – P. 671-678.
61. Yang C. et al. Synthesis of multi walled carbon nanotubes covered copper oxide nanoberries for the sensitive and selective electrochemical determination of hydrogen peroxide //International Journal of Electrochemical Science. – 2017. – Vol. 12. – №. 7. – P. 5910-5920.
62. Horestani F. K., Eshghi M., Yazdchi M. An ultra-low power amplifier for wearable and implantable electronic devices //Microelectronic Engineering. – 2019. – Vol. 216. – P. 111054.
63. Farkoush S. G. et al. Minimizing static VAR compensator capacitor size by using SMC and ASRFC controllers in smart grid with connected EV charger //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2019. – Vol. 107. – P. 656-667.
64. Rainey J. K., DeVries J. S., Sykes B. D. Estimation and measurement of flat or solenoidal coil inductance for radiofrequency NMR coil design //Journal of Magnetic Resonance. – 2007. – Vol. 187. – №. 1. – P. 27-37.

65. Nakajima D. et al. Diamond-like carbon coating for effective electrical insulation of Cu and Al wires //Diamond and Related Materials. – 2020. – Vol. 103. – P. 107731.
66. Jia T, Wang Y, Li Z, Current status of hydrogen energy development research // Energy Conservation Technology – 2011. – Vol. 6. – P. 264-267.
67. Hu L. et al. Significant hydrogen isotopes permeation resistance via nitride nano-multilayer coating //International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – Vol. 45. – №. 38. – P. 19583-19589.
68. Wang Y. et al. Improved hydrogen embrittlement resistance after quenching–tempering treatment for a Cr-Mo-V high strength steel //International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44. – №. 54. – P. 29017-29026.
69. Pan Y., Li Y., Zheng Q. Influence of Ir concentration on the structure, elastic modulus and elastic anisotropy of NbIr based compounds from first-principles calculations //Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 789. – P. 860-866.
70. da Silva L. J., Scheuer C. J., D'Oliveira A. S. C. M. Effect of microstructure on wear performance of NiCrSiBC coatings //Wear. – 2019. – Vol. 428. – P. 387-394.
71. Pan Y., Guan W. M. The hydrogenation mechanism of PtAl and IrAl thermal barrier coatings from first-principles investigations //International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – Vol. 45. – №. 38. – P. 20032-20041.
72. Yu W. Li J. Zheng F. Zhou Z. Development of glow discharge optical emission spectroscopy instrument and its application // Metallurgical Analysis. – 2021. – Vol. 41. – P. 1 (In China)
73. Jung S., Kim S., Hinrichs J. Determination of trace elements in high purity alumina powder by helium enhanced direct current glow discharge mass spectrometry //Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 2016. – Vol. 122. – P. 46-51.

74. Mushtaq S. et al. Does asymmetric charge transfer play an important role as an ionization mode in low power–low pressure glow discharge mass spectrometry? //Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 2016. – Vol. 118. – P. 56-61.
75. Sánchez P. et al. Influence of the hydrogen contained in amorphous silicon thin films on a pulsed radiofrequency argon glow discharge coupled to time of flight mass spectrometry. Comparison with the addition of hydrogen as discharge gas //Journal of Analytical Atomic Spectrometry. – 2012. – Vol. 27. – №. 1. – P. 71-79.
76. Bogaerts A., Gijbels R. Fundamental aspects and applications of glow discharge spectrometric techniques //Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 1998. – Vol. 53. – №. 1. – P. 1-42.
77. Gai R. Application of liquid cathode glow spectrometer in ceramic material analysis -P. 25-34(In China)
78. Yu X. New development on glow discharge optical emission spectrometer // Modern instruments. – 2008. – Vol. 5. – P. 1–14.
79. Lei Y. Development and application of imaging spectrometer // Infrared and Laser Engineering. – 2022. – T. 51. – №. 1. – C. 20210940-1-20210940-11. (In China)
80. Zhu X., Guan W., Ye K., Lu Y., Luo H. Preparation and wear of PVD coated milling cutter// Tool technology. – 2022. – Vol. 56. – P. 1–3. (In China)
81. Shang J., Yang X., Sun D., Zhang J. Optimization and thermal electron emission of Barium tungsten cathode // Journal of physics. – 2022. – Vol. 4. – P. 2–5. (In China)
82. Liu H., Zhang C., Zhang J., Oyang Z., Wang J. Study on Low Temperature Brittleness of ZG20Mn Low Alloy Steel// Foundry Engineering. – 2022. – Vol. 46. – P. 6–9. (In China)

83. Li H. et al. Design and Experiment of a needle-to-cylinder electrode structure realizing the negative DC glow discharge in ambient air // Spectroscopy and Spectral Analysis. – 2014. – Vol. 34. – №. 7. – P. 1797-1800.