



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 – 16.04.01 Техническая физика
Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА

Тема работы
Исследование потоков частиц и формирование элементного состава CrAlN_x покрытий с использованием магнетронных распылительных систем

УДК 621.793.182.02:669.26.058

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ11	Агатанова Алина Армановна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	Доктор физико-математических наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Кашук И.В.	к.т.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	Сечин А.А.	к.т.н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ Б.П. Вейнберга	Сиделёв Д.В.	к.т.н.		

Компетенции выпускников ООП «Пучковые и плазменные технологии» по направлению
16.04.01 Техническая физика (2021 года приёма)

Код компетенции	Наименование компетенции
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
ОПК(У)-1	Способен к профессиональной эксплуатации современного научного и технологического оборудования и приборов в своей профессиональной деятельности
ОПК(У)-2	Способен использовать углубленные теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, в том числе технической физики
ОПК(У)-3	Способен работать в научном коллективе, готов генерировать, оценивать и использовать новые идеи, способен находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач
ОПК(У)-4	Способен вскрывать физическую, естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе осуществления профессиональной деятельности, проводить их качественный и количественный анализ
ОПК(У)-5	Способен осуществлять научный поиск и разработку новых перспективных подходов и методов к решению профессиональных задач, участвовать в научной и инновационной деятельности
ОПК(У)-6	Способен осваивать и применять современные физико-математические методы и методы искусственного интеллекта для решения профессиональных задач, составлять практические рекомендации по использованию полученных результатов
ОПК(У)-7	Способен представлять результаты исследования в формах отчетов, рефератов, публикаций и презентаций
ОПК(У)-8	Способен проводить патентные исследования, определять формы и методы правовой охраны и защиты прав на результаты интеллектуальной деятельности.
ПК(У)-1	Способен самостоятельно проводить научные исследования в областях, связанных с применением пучковых и плазменных технологий, с использованием стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств

Код компетенции	Наименование компетенции
ПК(У)-2	Способен к организации и выполнению научно-исследовательских разработок в области создания функциональных покрытий и технологий их изготовления методами осаждения в вакууме
ПК(У)-3	Способен к организации и выполнению научно-исследовательских разработок в области создания микро- и наноразмерных систем с использованием плазменных и пучковых технологий
ПК(У)-4	Готов принимать непосредственное участие в учебной и учебно-методической работе по направлению «Техническая физика», участвовать в разработке программ учебных дисциплин и курсов
ПК(У)-5	Способен проводить учебные занятия, лабораторные работы, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся
ПК(У)-6	Способен применять и разрабатывать новые образовательные технологии
ПК(У)-7	Способен разрабатывать, оптимизировать и реализовывать современные наукоёмкие технологии в областях технической физики, связанных с применением пучковых и плазменных технологий
ПК(У)-8	Способен разрабатывать, проводить наладку и испытания, а также эксплуатировать наукоёмкое технологическое и аналитическое оборудование для решения технологических задач в областях, связанных с применением пучковых и плазменных технологий
ПК(У)-9	Готов решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи, связанные с применением пучковых и плазменных технологий, с помощью стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств



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 – 16.04.01 Техническая физика
Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ 06.02.2023 г. Сиделёв Д.В.
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
ОДМ11	Агатанова Алина Армановна

Тема работы:

Исследование потоков частиц и формирование элементного состава CrAlN_x покрытий с использованием магнетронных распылительных систем	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	Приказ №34-110/с от 03.02.2023 г.

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

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</p>	<ol style="list-style-type: none"> Вакуумно - плазменная установка для нанесения Cr-Al-N_x покрытий. Программы для расчётов скорости осаждения покрытий, плотности потоков энергии и частиц на подложку при планетарном вращении: «Hot target», «HIPIMS», «Planet rotation».
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы;</p>	<ol style="list-style-type: none"> Разработать методику для расчёта потоков частиц и энергии, поступающих на растущее покрытие при осаждении в режиме планетарного вращения подложки. Расчётным путём получить данные о соотношении плотностей потоков частиц Cr и Al, поступающих на растущее покрытие, при различной комбинации мощностей магнетронов, сопоставить с элементным составом покрытий, полученных в

<p>наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<p>экспериментах. 3. Рассчитать потоки энергии, поступающие на растущее покрытие, и показатели энергетического воздействия для выбора наиболее подходящих режимов осаждения с точки зрения обеспечения высокой твёрдости формируемых покрытий.</p>
<p>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Титульный лист. 2. Введение. 3. Цель и задачи. 4. Особенности применяемой схемы осаждения 5. Схема эксперимента. 6. Экспериментальное оборудование. 7. Методы и оборудование для анализа свойств покрытий. 8. Описание математических моделей, задействованных в расчётах. 9. Анализ потоков энергии на подложку. 10. Анализ потоков частиц на подложку. 11. Анализ скорости осаждения покрытий. 12. Оценка условия осаждения для обеспечения высокой твёрдости. 13. Анализ влияния мощностей магнетронов на элементный состав и твёрдость покрытия. 14. Положения, выносимые на защиту. 15. Заключение.
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Кащук И.В., к.т.н, доцент отделения социально-гуманитарных наук</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Сечин А.А., к.т.н., доцент отделения общетехнических дисциплин</p>
<p>Раздел на английском языке</p>	<p>Матвеев И.А., д.фил.наук, профессор отделения иностранных языков</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Особенности формирования защитных покрытий на основе нитридов металлов с помощью вакуумно-плазменных методов. 2. Features of the formation of protective coatings based on metal nitrides using vacuum-plasma methods. 	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	06.02.2023 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г. А.	Доктор физико-математических наук		06.02.23 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ11	Агатанова А.А.		06.02.23 г

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ11	Агатанова Алина Армановна

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ Б. П. Вейнберга
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих.	Стоимость материальных ресурсов, стоимость спецоборудования определены в соответствии с рыночными ценами г.Томск. Должностные оклады определены в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов.	Норма амортизационных отчислений на спецоборудование.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования.	Общая ставка взносов во внебюджетные фонды 30%.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)	Составление карты сегментирования рынка, анализ конкурентных технических решений, SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР.	Составление перечня этапов и работ, распределение исполнителей, определение трудоемкости выполнения работ, разработка графика проведения научного исследования.
3. Составление бюджета инженерного проекта (ИП).	Расчет материальных затрат НИИ. Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ. Основная и дополнительная заработные платы исполнителей темы. Отчисления во внебюджетные фонды. Амортизационные отчисления. Формирование бюджета затрат научно исследовательского проекта.
4. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков.	Определение ресурсной (ресурсосберегающей) и финансовой эффективности исследования.

Перечень графического материала

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Гантта
4. Бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	13.03.2023 г.
---	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н доцент		13.03.2023 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ11	Агатанова Алина Армановна		13.03.2023 г.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Обучающемуся:

Группа	ФИО
ОДМ11	Агатамова Алина Армановна

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p>Объектом исследования является плёнки на основе CrAlN, получаемые с помощью магнетронных распылительных систем.</p> <p>Область применения: Защитные и коррозионностойкие покрытия в машиностроении, аэрокосмической индустрии.</p> <p>Рабочая зона: лаборатория НОЦ Б.П.Вейнберга.</p> <p>Количество и наименование оборудования рабочей зоны: вакуумно-плазменная установка, нанотвердомер.</p> <p>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: осаждение покрытий, измерение твердости на нанотвердомере.</p>
<p>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</p>	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> - 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; - ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования. – ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).
<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Недостаточная освещенность рабочей зоны. – Электромагнитное излучение. – Повышенный уровень шума. – Повышенная температура поверхностей оборудования, изделий. – Отклонение показателей микроклимата.

	<p>Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека. <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: использование защитных костюмов, виброизолирующие рукавицы, перчатки, беруши, наушники.</p> <p>Расчет: расчет системы искусственного освещения.</p>
<p>3. Экологическая безопасность при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – атмосфера 	<ul style="list-style-type: none"> – Атмосфера: выброса продуктов горения машинного масла при работе пластинчато-роторного и диффузионного насосов
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Возможные ЧС – Наиболее типичная ЧС 	<p>Возможные ЧС:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Утечка газа из баллона, возникновение возгорания. – Поражение оператора установки электрическим током. <p>Наиболее типичная ЧС:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Возгорание.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

13.03.2023 г.

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	Сечин Андрей Александрович	к.т.н		13.03.2023 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ11	Агатанова Алина Армановна		13.03.2023 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 129 с., 23 рис., 23 табл., 51 источников литературы, 1 приложение на английском языке.

Ключевые слова: магнетронное распыление, дуальный магнетрон, «горячая» мишень, Cr-Al-N_x покрытие, планетарное вращение подложек.

Объектом исследования является нанесение Cr-Al-N_x покрытий с помощью магнетронной распылительной системы.

Цель работы – получить зависимости структуры потоков частиц и энергии, поступающих на растущее покрытие, от мощности магнетронов и напуска азота в рабочую камеру, также их оптимальные значения для обеспечения высокой твердости покрытий Cr-Al-N_x.

В процессе исследования рассчитаны потоки энергии и частиц, поступающие на растущее покрытие при осаждении в режиме планетарного вращения подложки, проведены эксперименты по нанесению Cr-Al-N_x покрытий с помощью магнетронной распылительной системы.

В результате исследования была изучена кинетика формирования потоков частиц, разработана методика для расчёта потоков частиц и энергии, поступающих на растущее покрытие при планетарном вращении подложек, выбран наиболее подходящий режим осаждения с точки зрения обеспечения высокой твердости формируемых Cr-Al-N_x покрытий.

Область применения: защитные, износостойкие покрытия.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	14
Глава 1. Особенности формирования защитных покрытий на основе нитридов металлов с помощью вакуумно-плазменных методов	16
1.1.Получение и свойства твёрдых покрытий на основе нитридов металлов 18	
1.2.Свойства и методы получения покрытий CrAlN	19
1.3.Постановка задачи исследований	30
Глава 2. Экспериментальное оборудование и методы исследования.....	33
2.1. Описание схемы осаждения и рабочих параметров экспериментального оборудования.....	33
2.2 Описание методов и оборудования для анализа свойств покрытия	39
2.3 Описание математических моделей, задействованных в расчётах потоков частиц, поступающих на поверхность растущего покрытия	41
2.3.1. Модель эрозии, охлаждаемой и сублимирующей металлической мишени.....	41
2.3.2. Методика Ламберта-Кнудсена для расчёта плотности потока осаждаемых металлических частиц.....	44
2.3.3. Структура потоков энергии, поступающих на подложку при осаждении покрытий.....	45
2.3.4. Описание комплекса программ для расчёта потоков частиц и энергии при осаждении покрытий с использованием планарных магнетронных распылительных систем	48
2.4. Расчётная методика для определения структуры потоков частиц в режиме планетарного вращения подложек.....	49
Глава 3. Анализ результатов	52
3.1 Расчёт потоков частиц азота, поступающих на поверхность растущего покрытия.....	52

3.2 Результаты расчёта плотностей потоков частиц, поступающих на растущее покрытие, для режимов осаждения, имеющих место в экспериментах	54
3.3 Сопоставление структуры осаждаемых потоков частиц с данными об элементном составе покрытий, полученных экспериментально	57
3.4 Анализ скорости осаждения покрытий	59
3.5 Влияние мощности магнетронов на соотношение потоков металлических атомов, поступающих на поверхность растущего покрытия	60
3.6 Анализ потоков энергии, поступающих на подложку при осаждении CrAlN _x покрытий.....	61
3.7 Оценка условия осаждения для обеспечения высокой твёрдости.....	63
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	67
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	68
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	68
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	68
4.1.3 SWOT анализ.....	71
4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	75
4.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	76
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	77
4.2.1 Определение трудоемкости выполнения работы.....	77
4.2.2 Разработка графика проведения научного исследования	78
4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	81
4.3.1 Расчет материальных затрат НТИ	81
4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования	82

4.3.3	Основная заработная плата	83
4.3.4	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)....	86
4.3.5	Накладные расходы	86
4.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования..	88
	Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность».....	90
	Глава 5. Социальная ответственность.....	92
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	92
5.1.1	Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства	92
5.1.2.	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.....	94
5.2	Производственная безопасность	95
5.3	Анализ опасных и вредных производственных факторов	96
5.3.1	Превышение уровня шума.....	96
5.3.2	Недостаточная освещенность рабочей зоны	97
5.3.3	Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	100
5.4	Экологическая безопасность	102
5.5	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	103
	Выводы по разделу «Социальная ответственность».....	106
	Заключение	107
	Список использованной литературы и источников.....	108
	Приложение А	114

Введение

Развитие технологий приводит к потребности в новых модифицированных материалах. Декоративные, износостойкие, защитные, оптические тонкопленочные покрытия находят широкое применение в различных отраслях, например, в микроэлектронике, машиностроении, медицине и т.д.

Актуальность темы настоящей работы связана с необходимостью разработки новых высокоэффективных методов и технологии получения защитных покрытий сложного состава. Работоспособность режущего инструмента можно повысить на основе изменения поверхностных свойств материала. Поскольку, материал инструмента должен обладать высокой прочностью при изгибе, сжатии и т.д. В последние годы, данной теме уделялось большое внимание. Требования к свойствам покрытия: высокие показатели микротвёрдости, износостойкости в сочетании с термической стабильностью. Покрытия состава Cr-Al-N_x обладают ими, поэтому они применяются для нанесения на металлорежущие инструменты (фрезы, свёрла, метчики и др.).

Как правило, вышеуказанные функциональные свойства главным образом определяются элементным составом и микроструктурой сформированных покрытий. Поэтому разрабатываемый метод осаждения, прежде всего, должен обеспечить элементный и фазовый состав, наиболее близкий к стехиометрическому соединению Cr-Al-N_x с кристаллической структурой. Кроме этого производительность осаждения должна быть не хуже и даже превосходить возможности традиционно применяемых методов для нанесения подобных покрытий и минимизировала основные недостатки реактивного магнетронного осаждения.

Основная цель исследования разрабатываемого метода (на уровне его технологической реализации) научиться получать покрытия Cr-Al-N_x с высокими показателями твёрдости (вплоть до 40 ГПа) и других механических

свойств (износостойкости, прочности), а также термостабильности и адгезии. В связи с этим, одной из первоочерёдных задач является научиться управлять:

1) элементным составом в зависимости от мощности магнетронов и напуска реактивного газа азота в вакуумную камеру;

2) микроструктурой и механическими характеристиками формируемых покрытий.

Для достижения определенных целей нужен достоверный инструмент, который позволит определить оптимальные параметры нанесения и прогнозировать нужный элементный состав, близкий к стехиометрическому соединению Cr-Al-N_x покрытий. Одним из таких инструментов можно рассматривать расчетные методики, математические модели.

Основные задачи ВКР сформулированы следующим образом.

1. Разработать методику для расчёта потоков частиц и энергии, поступающих на растущее покрытие при осаждении в режиме планетарного вращения подложки;

2. Расчётным путём получить данные о соотношении плотностей потоков частиц Cr и Al, поступающих на растущее покрытие, при различной комбинации мощностей магнетронов, сопоставить с элементным составом покрытий, полученных в экспериментах;

3. Рассчитать потоки энергии, поступающие на растущее покрытие, и показатели энергетического воздействия для выбора наиболее подходящих режимов осаждения с точки зрения обеспечения высокой твёрдости формируемых покрытий.

Глава 1. Особенности формирования защитных покрытий на основе нитридов металлов с помощью вакуумно-плазменных методов

Разработка функциональных покрытий, обладающих, превосходными эксплуатационными свойствами вызывают интерес в разных областях промышленности.

В последние несколько десятилетий разработка современных технологии стимулирует необходимость улучшение физико-механических характеристик защитных покрытий на основе металлов, которые интенсивно используется при изготовлении режущего инструмента. В частности, покрытия на основе нитридов металлов, характеризующихся превосходной долговечностью, износостойкостью и коррозионной стойкостью, активно изучается благодаря многочисленным возможностям применения в машиностроении, аэрокосмической промышленности, медицине и т.д.

Нитриды металлов представляют собой простые металлические структуры с меньшими по размеру атомами азота, которые размещены во внутренних узлах решетки. Возможны три вида химических связей между атомами в зависимости от металла, который вступает в реакцию с азотом. Они перечислены ниже.

1. Металлическая связь возникает между атомами в металлическом кристалле, возникающая за счёт перекрытия их валентных электронов.
2. Ковалентная связь образуется, когда электронная пара принадлежит двум атомам вещества при сближении ядер этих атомов.
3. Ионная связь возникает, когда взаимное электрическое притяжение двух ионов имеет разные заряды.

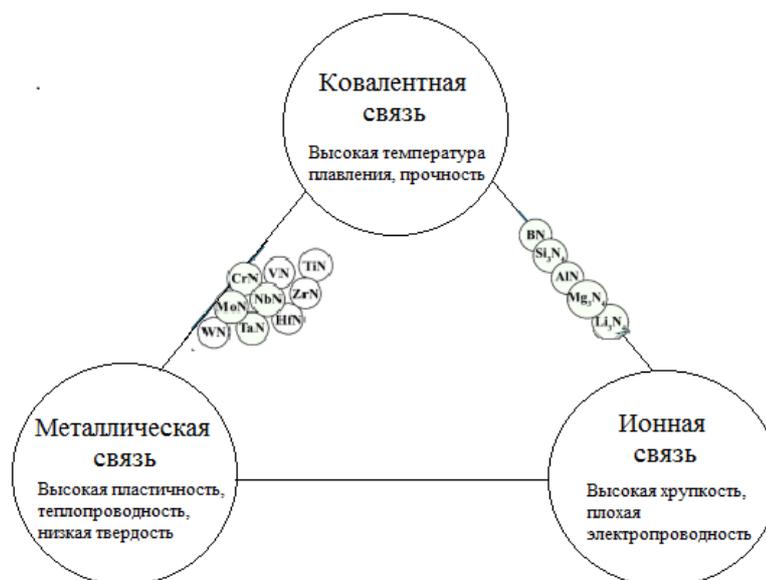


Рисунок 1.1 – Химические связи и основные свойства некоторых нитридов металлов [1]

Некоторые нитриды переходных металлов имеют более низкую температуру плавления, чем чистого металла. Причиной этому является тот факт, что прочность самых слабых связей, вдоль которых возбуждаются колебания решетки, определяется температурой плавления. Также, нитриды на основе переходных металлов являются хорошими сверхпроводниками, которые обладают высокой твёрдостью.

Благодаря универсальным и некоторым уникальным характеристикам покрытия на основе переходных металлов, широко используются в качестве конструкционных материалов в атомной и химической промышленности, при производстве режущего инструмента, износостойких материалов и т.д.

Например, в статьях [2-7] опубликованы результаты исследований, связанных с нанесением защитных покрытий различными вакуумно-плазменными методами. В данном разделе представлен обзор публикаций в научной литературе, посвящённых получению и характеристикам защитных покрытий на основе нитридов металлов, а также покрытий на основе Cr-Al-N_x.

1.1. Получение и свойства твёрдых покрытий на основе нитридов металлов

Одним из эффективных методов повышения работоспособности режущего инструмента является нанесение защитных покрытий на контактные площадки. Среди распространенных методов осаждения покрытий, наибольшее развитие получили методы физического осаждения, в частности, метод конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой поверхности. В качестве материала покрытий использование нитридов металла объясняется высоким показателем твердости, износостойкости, термической стабильности.

Необходимо отметить, что в зависимости от режима и условия осаждения, одно и то же покрытие может иметь широкий спектр физико-механических свойств.

На основе анализа зарубежных литературных источников было выявлено, что многоэлементные покрытия имеют достаточно высокое сопротивление к разрушению при эксплуатации благодаря тому, что такие покрытия включают в себя чередующие тонкие слои переменной твердости и тормозят развитие трещин. Низкие показатели модуля упругости покрытий дают возможность уменьшить остаточное напряжение на границе «покрытие-подложка», что соответственно повлияет на адгезию покрытия.

Многочисленные исследования нацелены именно на трибологические характеристики покрытий TiAlN, TiN, TiC, TiBC, CrAlN [8,9], которые являются наиболее перспективными в различных областях промышленного применения, а именно в качестве защитных покрытий на режущие инструменты. Тем не менее, результаты работы зависят от материала и свойств подложки, метода осаждения, параметров при осаждении и трибологических испытаний.

Также, в работах [4, 10-14] авторы высказывают предположение, что при добавлении дополнительного химического элемента (Al, B, Ti, W, Si и др.) в нитриды металлов, можно добиться улучшения механических,

антикоррозионных и термических свойств, а именно, повысить твердость покрытия и устойчивость к высоким температурам. Таким наиболее перспективным кандидатом является алюминий, поскольку алюминий характеризуется высокой стойкостью к абразивному износу и улучшенной стойкостью к окислению. Например, в статье [15] описан механизм износа покрытий в различных средах. Здесь подробно описываются результаты исследования, свидетельствующие о том, что введение атомов Al в состав покрытия из нитрида хрома может заменить некоторые положения атомов хрома для образования новой фазы AlN в процессе осаждения, что в свою очередь значительно повышает износостойкость покрытия.

1.2. Свойства и методы получения покрытий CrAlN

Покрытия Cr-Al-N_x отличаются уникальной кристаллической решеткой, которая значительно увеличивает твердость и жаропрочность при правильном подборе условий осаждения. Данные покрытия предназначены для равномерного износа и сопротивления сколам, благодаря высокой термостойкости и высокой производительности в сложных условиях эксплуатации.

Для нанесения покрытий на режущие инструменты наиболее распространенными методами являются CVD и PVD. Однако, из-за ограничений с выбором материалов подложки, сложности контроля процесса нанесения, сильного нагрева подложки, взаимодействия коррозионно-активных паров с подложкой, технология CVD ограничена в отношении достижимого количества слоев в многослойных покрытиях.

В данной работе исследуется получение покрытий Cr-Al-N_x методом магнетронного распыления. Метод магнетронного распыления в настоящее время является наиболее широко используемым методом физического осаждения. В методе магнетронного распыления мишень подвергается бомбардировке ионами, генерируемыми в плазме, что приводит к испусканию

довольно высокоэнергетических ионов с её поверхности, которые способны образовать плотную по структуре пленку.

Условия нанесения и исследование физико-механических свойств многослойных покрытий Cr-Al-N_x является актуальной темой в научно-исследовательских работах, т.к. такие покрытия показывают лучшие механические свойства, стойкость к окислению и коррозии. Например, в работе [16] представлены результаты по исследованию механических характеристик и микроструктуры Cr-Al-N_x покрытий, нанесенные с использованием сбалансированной системы магнетронного распыления, работающей в постоянном и импульсном режимах (с различными частотами импульсов). Покрытия, нанесенные импульсным способом, имеют более высокую твердость, меньшие размеры зерен, чем плёнки, полученные в режиме постоянного тока. В системе сбалансированного магнетронного распыления с импульсным постоянным током увеличивается энергия бомбардирующих частиц, но в то же время, снижение общего давления приводит к образованию пленок с более высоким внутренним напряжением и высокой твердостью. С увеличением частоты импульсов внутренние напряжения увеличиваются, размеры зерен значительно уменьшаются.

Авторы работы [17] продемонстрировали результаты по изучению окисления покрытий. В данной статье изучали кинетику окисления Cr-Al-N_x покрытия с разным содержанием алюминия и сравнивали с окислением подложки из никелевого сплава без покрытия. В результате оказалось, что подложки с покрытием имеют гораздо более низкую скорость окисления при температуре 1000-1100°C в течение 2 часов, чем подложки без покрытия. Морфология покрытия изменяется с мелкокристаллической на мелкозернистую столбчатую с увеличением содержания алюминия. Таким образом, при высоком содержании алюминия изменяется микроструктура, размеры зерен, шероховатость поверхности и снижается скорость окисления. Защитное покрытие из нитридов алюминия и хрома значительно подавляет диффузию кислорода.

Покрyтия, полученные с применением магнетронных распылительных систем, дают возможность получать покрyтия с высокими функциональными свойствами, например, с высокой твердостью при оптимальном выборе рабочих параметров: рабочего давления в камере, мощности разряда. Однако одним из главных недостатков метода осаждения с использованием магнетронных распылительных систем в среде реактивного газа является нестабильность процесса и низкая скорость осаждения за счёт отравления поверхности мишени магнетрона реактивным газом.

Большое количество ионов инертного газа аргона, образующихся в плазме и бомбардирующих поверхность мишени, увеличивает скорость распыления. Однако повышенное давление в вакуумной камере означает более высокую плотность газа, вызывающую большее рассеяние атомов материала мишени на пути к подложке. При добавлении к инертному газу реактивного газа скорость осаждения покрyтия уменьшается. Это связано с образованием соединения металла на поверхности мишени, так как скорость распыления (коэффициент распыления) химических соединений ниже, чем скорость распыления любого чистого металла. Данной проблеме посвящено значительное число работ [18-20].

Взаимодействие реактивного газа с поверхностью мишени магнетрона характеризуется двумя процессами: хемосорбцией и ионной имплантацией. При хемосорбции на поверхности металлической мишени образуется тонкий слой химического соединения реактивного газа с материалом мишени. Ионная имплантация также может повлиять на процесс реактивного распыления из-за внедрения ионов реактивного газа в мишень магнетрона, и в результате уменьшать коэффициент распыления. Из научной литературы известно, что при ионной имплантации снижение скорости распыления объясняется присутствием некоторого количества атомов реактивного газа внутри кристаллической решетки материала мишени магнетрона.

Образование химических соединений при реактивном магнетронном распылении наблюдается на трёх стадиях:

1) когда на поверхность мишени поступает смешанный поток ионов и атомов, образуя химическое соединение активных ионов, возбуждённых атомов с атомами материала мишени; наблюдается стадия мишенного синтеза;

2) на стадии пролетного синтеза образуется химическая связь распыленных частиц с активными частицами плазмы; вероятность взаимодействия распыленных атомов с частицами плазмы с образованием химических соединений определяется энергией связи, эффективным сечением взаимодействия, конфигурацией процесса, плотностью плазмы, давлением и расстоянием мишень-подложка;

3) стадия синтеза соединения на подложке наблюдается, когда атомы на поверхности подложки конденсируются, активно взаимодействуя между собой, с поверхностными атомами и атомами реактивного газа.

Для анализа результатов, полученных в различных условиях нанесения покрытий и на разных экспериментальных установках, в таблице 1 перечислены опубликованные статьи по нанесению Cr-Al-N_x покрытий магнетронным распылением. В каждой строке представлены сведения по одной конкретной статье. В примечании представлена цель исследования каждой работы. Этот обзор позволяет ознакомиться с результатами нанесения покрытий в разных условиях осаждения и оценить взаимосвязь между параметрами осаждения и свойствами сформированных покрытий.

Таблица 1 – Краткое изложение опубликованных работ по нанесению Cr-Al-N_x покрытий

Год публикации [ссылка]	Подложка / Подложкодержатель	W, Вт	Q Вт/ см ²	Конфигурация мишеней	d, мм	P, Па	Q(Ar), sccm	Q(N ₂), sccm	U _{bias} , В	h, мкм	t, мин	v, нм/с	H, ГПа	Cr, ат.%	Al, ат.%	N, ат.%	Примечание
2008 [21]	Сталь AISI H13, Si / карусель	Al - 3600 Cr - 2400	-	Cr (99.99%) – 2 шт Al (99.99%) – 2 шт	-	0,28- 0,35	-	-	0 -80 -120	5,07 4,92 4,85	-	-	16,5 19,8 28,6	18,0 5 19,0 4 18,1 3	11,20 12,13 13,12	70,75 19,8 28,6	Влияние отрицательного напряжения смещения на физико-механические свойства покрытия.
2020 [22]	Сталь SUS304, стекло, Si /	-	-	Cr (99.95%) – 1 шт Al (99.999%) – 1 шт	130	0,46- 0,5	4	2 3	-	1,08 0,514	60	0,3 0,41 2	26,6 5 42,0 6	38,2 9 31,8 2	19,76 10,24	41,95 57,93	Влияние содержания N ₂ на микроструктуру покрытий
2015 [23]	Al-Si / карусель	Cr – 350 Al – 200	-	Cr (99.99%) – 1 шт Al (99.99%) – 1 шт	150	0,59	20	-	-	2,79	180	0,25 83	42	71	24	5	Исследование физико-механических свойств покрытия.

2012 [24]	Si / карусель	-	Cr – 2,2 Al – 3,3	Cr (99.99%) – 1 шт Al (99.99%) – 1 шт	150	0,4	40	20	-50 -160 -210 -260	1	-	-	10,4 12,7 20,4 25,8	27,9 18,5 28,9 24,8	16,8 17,4 17,2 17,1	54,4 52,7 53,1 57,4	Влияние отрицательного напряжения смещения на механические свойства покрытий.
2017 [25]	Si /	-	-	Cr (99.95%) – 1 шт Al (99.95%) – 1 шт	-	0,5	10	2	-	3,47 5,47 1,047	60	0,96 1,52 0,3	36 45 46	34,4 28,4 17,8	10,78 30,28 54,19	54,74 41,23 28	Влияние электрических параметров на микроструктуру покрытий
2021 [26]	Сталь X50CrMo V8-1, Si / Карусель со скорость вращения 1,5 об/мин	Cr - 1500 Al - 1000	-	Cr (99.95%) – 1 шт Al (99.95%) – 1 шт	-	0,5	68,8	33,3	-500	1,94 1,90 2,11 2,05 2,04	-	-	35 37 40 39 43	41,9	7,1	46,4	Влияние толщины многослойного покрытия на микроструктуру, механические и трибологические свойства покрытий.
2019 [27]	Сталь HSS, DIN1.3343, AISIM2,	6000	-	CrAl (50:50) – 4 шт	-	0,62	230	143	-60	4,4	110	0,66	34	23,9	25,1	51	Исследование механических и трибологических свойств

	MgO, Si / карусель																	покрытий при высоких температурах.
2022 [28]	Стекло, Si / Карусель со скоростью вращения 5 об/мин	120	-	CrAl (50:50) – 1 шт	80	0,41	20	2 6	-	0,6	30	0,3	11,4 8 22,9 6	32,6 21,4	25,4 20,9	39 42,3		Влияние соотношение Ag/N ₂ на микроструктуру и механические свойства покрытий.
2021 [29]	Сталь HS6-5-2C / Карусель с планетарным вращением со скоростью вращения 1 об/мин	3000 5000	6,8 11, 36	1. CrAl20 – 6 шт 2. CrAl20 – 3 шт AlCr30 – 3шт 3. CrAl20 – 2шт AlCr30 – 3шт AlCr20 – 1шт вставки d = 15 мм	60	0,62	200	-	-100	1,6 1,7 1,7	-	0,47 2 0,41 6 0,36 1	43 35 31	5 12 16	52 53 53	20,9 22,5 26,7		Влияние содержание Al на упругопластические свойства покрытий.

2020 [14]	Сталь SUS304, HSS:AISI M2, Si /	3000	12. 4	Cr (99,99%) – 1 шт CrAl (50:50) – 1 шт	150	0.4	-	-	-30	0.97	40	0.4	24.1	21.7	54.1	24.1	Влияние отрицательног о напряжение смещения и содержание N ₂ на механические свойства и микроструктур у покрытий.
									-60	2.86		1.19	29.3	22.2	53.1	29.3	
									-90				30.1	21	52.9	30.1	
									-120				35.4	21.7	52.4	35.4	
									-150				34.1	21.1	52.7	34.1	

W – мощность магнетрона; Q – плотность мощности магнетрона; d – расстояние «мишень-подложка»; p – рабочее давление в камере; Q(Ar), Q(N₂) – напуск аргона и азота в камеру; U_{bias} – отрицательное напряжение смещения; h – толщина покрытия; t – время осаждения покрытий; v – скорость осаждения; H – твердость покрытий.

Проведенный анализ научных работ отечественных и зарубежных авторов по изучению свойств Cr-Al-N_x покрытий может послужить ориентиром для работы по нанесению Cr-Al-N_x.

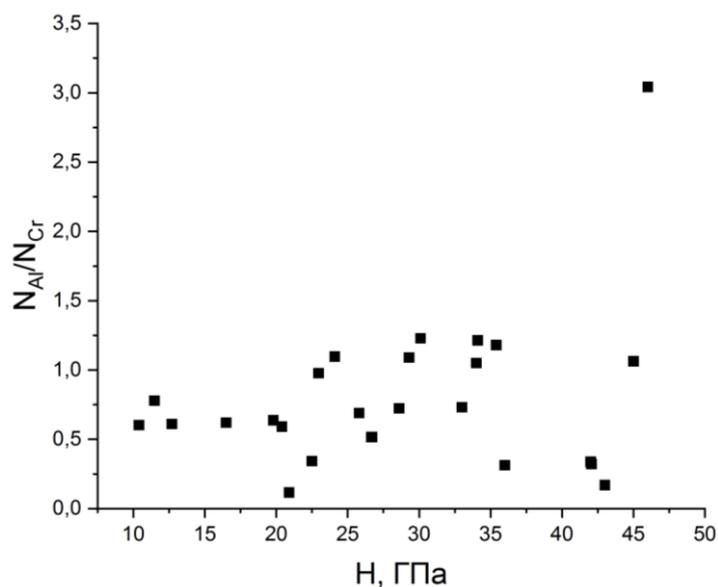


Рисунок 1.2 – Связь между твёрдостью и соотношением металлических частиц по данным литературного обзора в таблице 1; N_{Cr}, N_{Al} – атомная концентрация хрома и алюминия в Cr-Al-N_x покрытиях.

Данные из таблицы 1 позволяют оценить, что значения твердости покрытий варьируется в пределах 11 ГПа – 46 ГПа, в зависимости от условия осаждения, в частности, мощности магнетрона, напуска инертного и реактивного газов, отрицательного напряжения смещения, толщины, скорости осаждения, также микроструктуры и элементного состава покрытия.

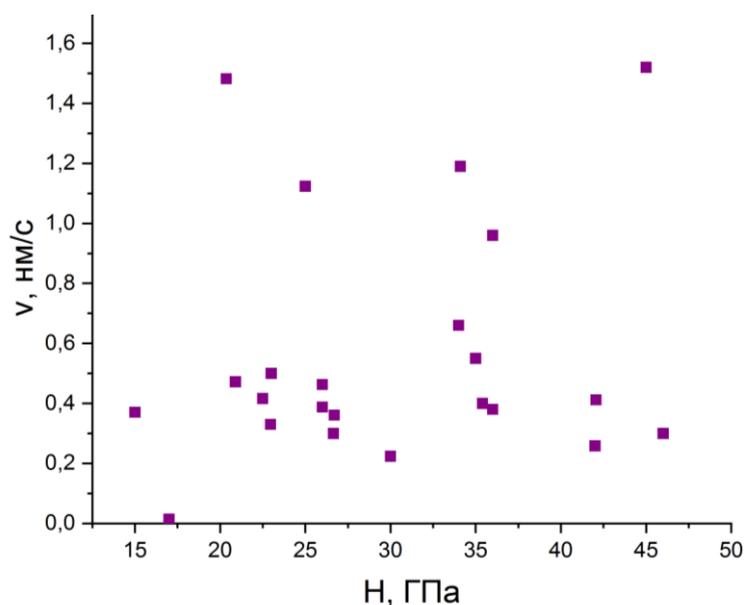


Рисунок 1.3 – Связь между твердостью покрытий и скоростью осаждения по данным литературного обзора в таблице 1

Проведенный анализ научных работ авторов по нанесению Cr-Al-N_x покрытий, позволяет прийти к следующему заключению.

1. Отрицательное напряжение смещения может повысить твердость покрытия, улучшая плотность микроструктуры при уменьшенном размере зерен. Но также увеличение напряжения смещения может внести вклад в увеличение внутренних остаточных напряжений и развить дефекты. Оптимальным значением U_{bias} является ≈ -100 В, при котором показатели твердости оказываются в диапазоне 30 – 43 ГПа.

2. Высокая скорость осаждения влияет на микроструктуру покрытия, соответственно и на твердость. При высоких скоростях осаждения покрытия могут иметь более рыхлую структуру, что снижает показатели твердости. Согласно данным из литературного обзора (табл.1, рис.1.3) высокие значения по твердости получаются при более низких значениях скорости осаждения. Максимальная твердость (31-46 ГПа) достигнута при скорости осаждения $\approx 0,3$ нм/с.

3. Покрытия Cr-Al-N_x с высоким значением твердости были получены при различных соотношениях элементного состава. Высокие показатели по

твердости и другим механическим свойствам (табл.1, рис.1.2) получают при оптимальном соотношении металлических частиц $\frac{N_{Al}}{N_{Cr}} \sim 0,3-1$.

Таким образом, выбирая наиболее подходящую комбинацию параметров нанесения, можно получить Cr-Al-N_x покрытия высокого качества, например, для упрочнения металлорежущих инструментов.

1.3. Постановка задачи исследований

В классических технологиях получения покрытия сложного состава магнетронным распылением, как правило, используют мишени, состоящие из сплавов, компоненты которых входят в состав формируемого покрытия, и совместный напуск инертного и реактивного газов в вакуумную камеру. При этом одно из проблемных мест – изготовление нужной мишени (это должен быть сплав сложного состава). Поэтому был предложен другой подход – использовать несколько мишеней, изготовленных из чистых металлов, входящих в состав покрытия, и отдельный напуск газов в камеру. Но здесь возникает проблема с выбором рабочих параметров задействованного оборудования, в первую очередь комбинации мощности магнетронов с разными мишенями, для обеспечения необходимого элементного и фазового состава. Также низкая скорость осаждения является одним из значительных недостатков магнетронного распыления (особенно когда получают покрытия сложного состава), которую очень желательно повысить.

В настоящей работе рассмотрена попытка реализации метода магнетронного осаждения Cr-Al-N_x покрытий с более высокой производительностью и возможностью гибкого управления составом и микроструктурой. Для этого задействован магнетрон с «горячей» хромовой мишенью и дуальный магнетрон с двумя алюминиевыми мишенями. Раздельная подача рабочего газа, аргона и реактивного газа, азота и обеспечения достаточной ионной бомбардировки растущего покрытия используется радиочастотный плазменный генератор.

Использование «горячей» мишени при реактивном распылении представляет большой интерес в ряде научных направлений. Всестороннее рассмотрение такого метода содержится в работах [30-33], где дается научное обоснование, что, нагрев мишени магнетрона может повлиять на процесс осаждения положительно. А именно, предложенный метод позволяет повысить скорость осаждения, стабилизирует процесс реактивного распыления, устраняя

петли гистерезиса, которые значительно его усложняют, и положительно влияет на текстуру растущей пленки.

Кроме этого, согласно фазовым диаграммам, при высоких температурах и низких давлениях соединения хрома и азота не образуются [34].

В данной работе поставлена цель, выяснить закономерности формирования структуры потоков частиц и энергии, поступающих на растущее покрытие при осаждениях в режиме планетарного вращения подложек, в зависимости от мощности магнетронов и напуска азота в рабочую камеру. Предстояло выяснить, при каких рабочих параметрах можно получить Cr-Al-N_x покрытия с высокими функциональными характеристиками. Методами исследования являются расчёты и эксперименты.

Поэтому были поставлены следующие задачи:

1) разработать методику для расчёта потоков частиц и энергии, поступающих на растущее покрытие при осаждении в режиме планетарного вращения подложки, а также проверить её адекватность;

2) расчётным путём получить данные о соотношении плотностей потоков частиц Cr и Al, поступающих на растущее покрытие, при различной комбинации мощностей магнетронов с Cr и Al мишенями, сопоставить с элементным составом покрытий, полученных в экспериментах;

3) рассчитать потоки энергии, поступающие на растущее покрытие, и показатели энергетического воздействия для выбора наиболее подходящих режимов осаждения с точки зрения обеспечения высокой твёрдости формируемых покрытий.

При решении вышеуказанных задач необходимо учитывать особенности применяемой схемы осаждения, а именно:

- задействовано 2 планарных магнетрона с дисковыми металлическими мишенями: «горячая» Cr мишень и дуальный магнетрон с двумя охлаждаемыми Al мишенями; размеры мишеней: $R = 4,5$ см; $h = 0,8$ см;

- источники питания всех магнетронов – импульсные (однополярные импульсы) среднечастотные;

- для диссоциации молекул азота и ионизации осаждаемых потоков частиц используется радиочастотный плазменный генератор (РПГ) мощностью $Q_{\text{РПГ}} = 1,25$ кВт;

- отдельный напуск инертного и реактивного газов; напуск аргона рядом с магнетроном с «горячей» хромовой мишенью и алюминиевой мишенью, напуск азота рядом с дополнительным источником плазмы РПГ;

- в процессе осаждения покрытия на подложки подаётся отрицательное напряжение смещения;

- подложки закреплены на держатель карусели с планетарным вращением, которая перемещается с периодом $T_1 = 48$ с, при этом период вращения подложки вокруг своей оси $T_2 = 6$ с;

- подложки из стали 12Х18Н10Т и монокристаллического кремния; размеры: 2.5×2.5 см²; $h = 2$ мм.

Глава 2. Экспериментальное оборудование и методы исследования

В данном разделе представлено описание схемы осаждения Cr-Al-N_x покрытий, рабочих параметров экспериментального оборудования, методов и оборудования для анализа свойств покрытия, а также математических моделей, с помощью которых выполнены расчеты тепловых и эрозионных процессов на поверхностях мишеней, плотностей потоков осаждаемых частиц и энергии, поступающих на подложку при планетарном вращении.

2.1. Описание схемы осаждения и рабочих параметров экспериментального оборудования

Эксперименты по нанесению Cr-Al-N_x покрытий проводились на вакуумно-плазменной установке (рис. 2.1), которая разработана в лаборатории НОЦ Б.П. Вейнберга ТПУ. Вакуумно-плазменная установка оснащена подложкодержателем с планетарным вращением, ионным источником, вакуумным нагревателем, комплектом магнетронных источников, системой отдельной подачи газов в камеру и имеет водяное охлаждение по всему периметру. Данная установка используется для осаждения модифицирующих покрытий с использованием плазменных источников.



Рисунок 2.1 – Внешний вид вакуумно - плазменной установки

На рисунке 2.2 показана схема катодного узла «горячей» хромовой мишени. Теплоизолированная хромовая мишень (за счёт зазора между её задней стороной и охлаждаемым корпусом магнетрона) имеет форму диска, площадь поверхности мишени составляет 63,6 см².



Рисунок 2.2 – Схема катодного узла с мишенью, имеющей ограниченный теплопроводный контакт с охлаждаемым корпусом магнетрона

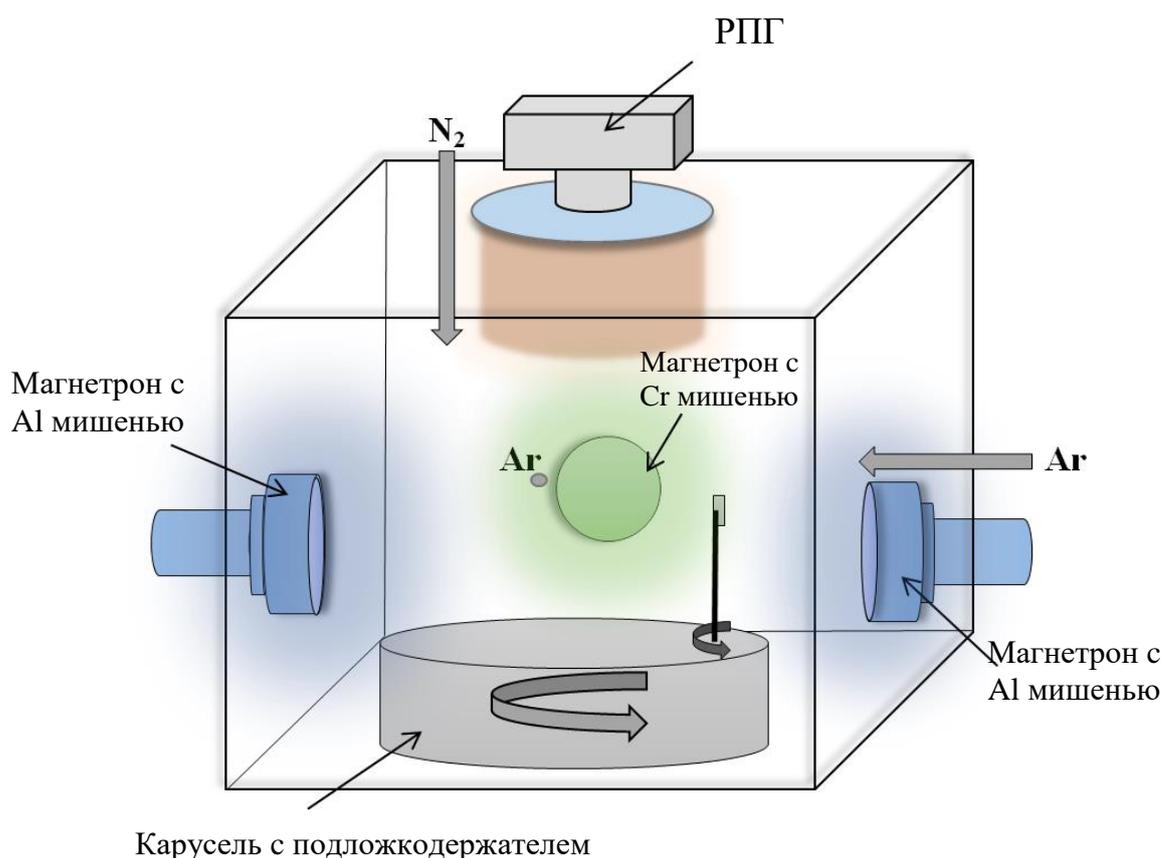


Рисунок 2.3 – Схема эксперимента

Схема эксперимента показана на рисунке 2.3. Карусель-подложкодержатель с планетарным вращением, радиусом $R =$

0,15 м позволяет установить максимально 16 деталей. Чтобы определить потоки частиц и энергии в зависимости от расположения подложки относительно магнетронов, было решено разбить карусель-подложкодержатель на сектора (рис.2.4).

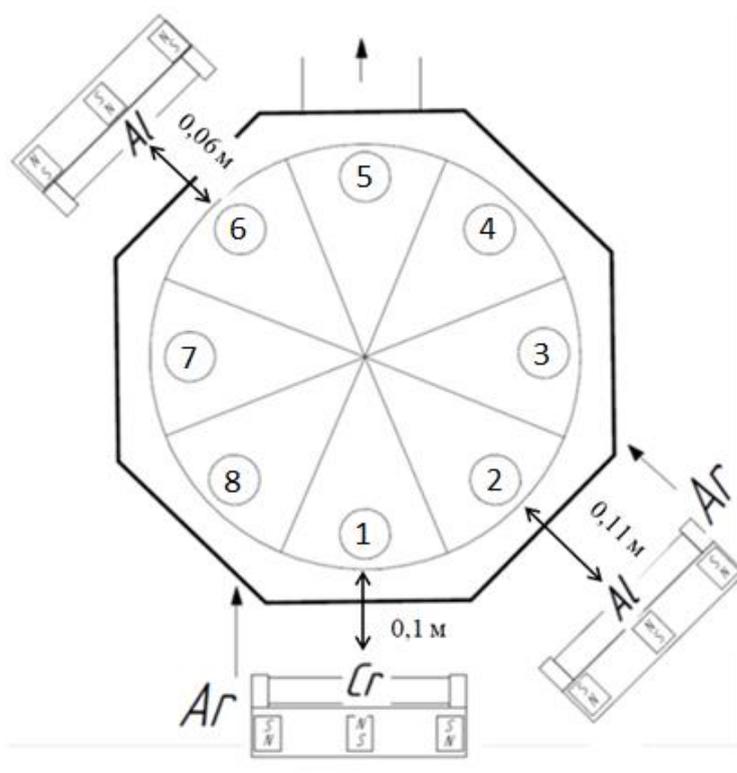


Рисунок 2.4 – Схема расположения магнетронов относительно секторов карусели – подложкодержателя

Технологический процесс осаждения покрытий представляется в несколько этапов:

- 1) подготовка подложек;
- 2) загрузка подложек в камеру и откачка вакуумной камеры;
- 3) прогрев камеры и ионная очистка поверхности подложек;
- 4) нанесение покрытий.

В каждой серии экспериментов были использованы подложки из стали 12X18Н10Т и подложка из монокристаллического кремния. Для пробоподготовки подложек использовалась полировально - шлифовальная машина МР-1В. Контроль внешних дефектов и царапин производился

визуально. После химической отмывки (обезжиривание) подложки были установлены в держатель карусели.

Для минимизации газовых примесей в камере осуществляется процесс нагрева с использованием системы нагрева ТЭН. Перед нанесением покрытий, подложки были протравлены ионами аргона в течение 20 минут с помощью ионного источника APCL – IS – 7CELL, с целью удаления поверхностных оксидов и загрязнений. Образцы подвергались планетарному вращению во время очистки. Обработка поверхности подложек проводилась при напуске аргона в камеру $4,5 \text{ см}^3/\text{мин}$, напряжении 2 кВ, токе 0,05 А ионного источника. Принцип работы ионного источника APCL–IS–7CELL основан на формировании плазмы путем ионизации рабочего газа в тлеющем разряде. Разряд между электродами возникает при подаче положительного потенциала на анод. Ионы аргона ускоряются, образуя ионный поток на образцы, тем самым термически активируя поверхность образцов.

Для диссоциации молекул азота и ионизации осаждаемых потоков частиц был использован радиочастотный генератор плазмы (РПГ) мощностью $W_{\text{РПГ}} = 1,25 \text{ кВт}$, который усиливает хемосорбцию реактивного газа азота на поверхности растущей плёнки.

На подложки подавалось отрицательное смещение, влияющее на ионную бомбардировку в вакуумной камере, следовательно, на свойства и структуру растущей пленки.

В процессе реактивного распыления часто проявляются эффекты гистерезиса. По этой причине важно было выяснить влияние напуска азота в камеру на развитие гистерезиса, для оценки стабильности процесса осаждения покрытий.

На рисунке 2.5 представлены результаты экспериментальных измерений напряжения МРС при увеличении и уменьшении напуска азота в камеру.

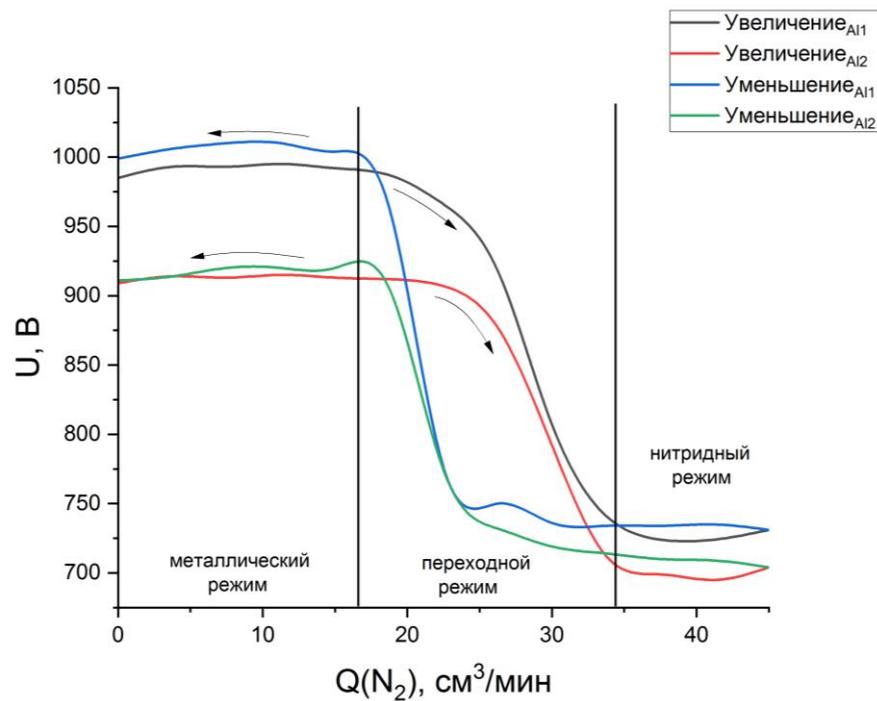


Рисунок 2.5 – Изменение напряжения в МРС при увеличении и уменьшении напуска азота в камеру; мощность дуального магнетрона с алюминиевой мишенью $Q_{Al} = 1$ кВт

По результатам измерений, было выявлено, что при сравнительно малых концентрациях реактивного газа в вакуумной камере, процесс распыления происходит в металлическом режиме. Когда на поверхности мишени магнетрона хемосорбируется тонкий слой реактивного газа с атомами материала мишени, напряжение разряда снижается, как показано на рис. 2.5. С увеличением потока напуска азота в камеру, поверхность мишени магнетрона отравляется, соответственно, столкновение и рассеяние атомов и молекул уменьшается, следовательно, уменьшается количество частиц и поток кинетической энергии частиц. Когда поверхность мишени отравляется, то снижается скорость распыления и увеличивается парциальное давление реактивного газа в камере. В результате, растущее покрытие адсорбирует чрезмерное количество реактивного газа, что приводит к нарушению свойства плёнки.

Коэффициенты распыления чистого металла и химического соединения различны. Это обуславливает возникновение переходной области при работе

магнетрона с алюминиевыми мишенями, как показано на рис. 2.5. Причём переход от металлического режима распыления к нитриднему режиму характеризуется возникновением гистерезисных петель, т.е. зависимость параметров процесса от подачи потока реактивного газа становится неоднозначной. Для обеспечения стабильности процессов осаждения необходимо поддерживать поверхность мишени магнетрона металлической. Но концентрация азота в камере должна быть приемлемой для образования нитридов. Поэтому для всех экспериментов рабочие параметры нанесения Cr-Al-N_x покрытий (т.е. значения напряжения на магнетроне с алюминиевыми мишенями и напуска азота) были выбраны по границе между металлическим и переходным режимом (рис. 2.5), т.е. обеспечивались условия для распыления алюминиевых мишеней в стабильном металлическом режиме.

В рамках данной работы были проведены несколько серий экспериментов. Покрытия Cr-Al-N_x наносились при постоянной мощности РПГ и разных значениях мощностей магнетронов, изменяемом напуске аргона и азота. На подложки подавалось импульсное отрицательное напряжение смещения частотой 50 кГц и паузой 3 мкс. В таблице 2.1 представлены параметры осаждения.

Таблица 2.1 – Рабочие параметры для осаждения Cr-Al-N_x покрытий

№	W _{Cr} , Вт	Q _{Cr} , Вт/см ²	W _{Al} , Вт	Q _{Al} , Вт/с м ²	Q(Ar), см ³ /ми н	Q(N ₂), см ³ /мин	W _{РПГ} , Вт	t _{осажд} , мин	p, Па	U _{bias} , В	I _{bias} , А	v _{кар} , об/с
1	1200	18,87	2000	31,45	30	15	1250	63		-100	0,16	12
2						30		99	0,4		0,08	
3						45		106			0,07	
4	600	9,43				30		184	0,45		0,12	
5	900	14,15				34,5		141	0,44		0,16	
6	1000	15,72			52,5			96	0,24		0,12	48
7	900	14,15			45			135	0,32		0,12	24
8						171	0,38		0,11	36		
9							0,37		0,1	6		
10	1000	15,72	1500	23,6		19,5		112	0,21		0,14	48
11			1000	15,72		16,5		84	0,18		0,13	

Примечание: W_{Cr} – мощность магнетрона с хромовой мишенью, W_{Al} – мощность, подаваемая на каждую алюминиевую мишень дуального магнетрона; Q_{Cr} , Q_{Al} – плотность мощности на хромовой и алюминиевой мишенях; $Q(Ar)$, $Q(N_2)$ – напуск аргона и азота в камеру; $t_{осажд}$ – время осаждения; p – рабочее давление в камере; U_{bias} – отрицательный потенциал смещения; I_{bias} – ток смещения; $v_{кар}$ – скорость вращения карусели.

2.2 Описание методов и оборудования для анализа свойств покрытия

Исследования толщины и элементного состава покрытий проводились в учебно-научной лаборатории электронно-оптической диагностики кафедры геоэкологии и геохимии ТПУ. Для определения толщины и элементного состава покрытия применялся сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Hitachi S-3400N с приставкой для энергодисперсионного анализа (рис.2.6).



Рисунок 2.6 – Внешний вид сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N с энергодисперсионным спектрометром Bruker XFlash 4010

Сканирующий электронный микроскоп состоит из источника электронных пучков, оптической системы для фокусировки, камеры с системой откачки для создания вакуума в микроскопе, детектора для регистрации сигналов. Принцип работы основан на регистрации детектором вторичных электронов. В результате, на систему сбора данных поступает информация о координатах пучка на образце и величине сигнала с детектора. При построении

изображения каждой точке образца приписывается яркость пропорциональная величине сигнала, измеренного в момент, когда пучок находился в этой точке.

Принцип работы энергодисперсионного спектрометра заключается во взаимодействии пучков электронов с исследуемым образцом, в результате которого возникает рентгеновское излучение, которое регистрируется детектором. Полный спектр об элементном составе исследуемого образца получается системой обработки сигнала, который разделяет рентгеновские фотоны по энергиям.

Твердость покрытий была проанализирована с помощью метода Оливера-Фарра с использованием твердомера (рис.2.7) с индентором в виде трехгранной пирамиды Берковича. Исследования проводились в лаборатории НОЦ Б.П. Вейнберга.



Рисунок 2.7 – Нанотвердомер NHT2

Для расчёта средних арифметических значений было измерено 10 вдавливаний индентора на каждый образец. Метод Оливера-Фарра позволяет определить твердость при максимальной нагрузке, в зависимости от глубины проникновения индентора в образец. Максимальная нагрузка выбирается исходя из толщины покрытия, при котором глубина проникновения индентора составляет ~10% толщины исследуемого покрытия.

Значения твердости были вычислены из соотношения:

$$H = \frac{P_{max}}{A} \quad (2.1)$$

P_{max} – максимальная приложенная нагрузка, A – площадь контакта индентора с образцом.

$$A = k_1 h_c^2 + k_2 h_c \quad (2.2)$$

где k_1 и k_2 – константы, зависящие от геометрии индентора, которые описывают отклонение от идеальной геометрии пирамидки Берковича из за закругления острия; h_c – глубина контакта индентора с образцом.

Для идеально острого индентора Берковича $k_1 = 24,5$ и $k_2 = 0$, тогда $h_c = h_{max} - 0,75P_{max} \left(\frac{dh}{dP} \right)_{P_{max}}$ – глубина индентора с образцом, h_{max} – максимальная глубина проникновения индентора.

2.3 Описание математических моделей, задействованных в расчётах потоков частиц, поступающих на поверхность растущего покрытия

Для расчётов использовались программы «Hot target», «HIPIMS», «Planet rotation». Программа «Hot target» предназначена для расчётов тепловых процессов в мишени, скорости испарения, плотности потока частиц, потоков энергии на подложку и скорости осаждения за счёт сублимации. Программа «HIPIMS» - для расчётов скорости распыления, плотности потоков частиц, потоков энергии на подложку, за счет распыления мишени. «Planet rotation» - для расчётов потоков частиц при планетарном вращении карусели. Программы разработаны в НОЦ Б.П. Вейнберга ТПУ.

2.3.1. Модель эрозии, охлаждаемой и сублимирующей металлической мишени

Пространственное распределение интенсивности потока атомов и молекул, распылённых или сублимированных на поверхности мишени, рассматривается как косинусоидальное:

$$I = I_0 \cos(\varphi) \quad (2.3)$$

где φ – угол между нормалью к поверхности элементарной площадки на поверхности мишени и вектором, соединяющим центры элементарных площадок на поверхностях мишени и подложки.

Эрозионный поток частиц с «горячей» хромовой мишени представляется как сумма распыленных и испаренных потоков частиц. Скорость эмиссии частиц с поверхности теплоизолированной хромовой мишени (скорость эрозии) V_{Σ} , представляется как:

$$V_{\Sigma} = V_{sput} + V_{subl} \quad (2.4)$$

где V_{sput} – скорость распыления;

V_{subl} – скорость (сублимации) испарения;

Скорость удаления атомов с поверхности охлаждаемой алюминиевой мишени за счет распыления рассчитывается по формуле:

$$V_{\Sigma} = V_{sput}$$

Скорость распыления рассчитывается по формуле:

$$V_{sput} = \frac{Y \cdot I_{ion}}{e \cdot n_0} \quad (2.5)$$

где Y – коэффициент распыления материала мишени; e – заряд электрона; n_0 – атомная плотность вещества мишени; I_{ion} – плотность ионного тока.

Распыление наблюдается при любой мощности разряда, но интенсивность повышается с увеличением плотности ионного тока I_{ion} и коэффициента распыления Y .

Плотность ионного тока вдоль поверхности мишени соответствует распределению магнитной индукции вблизи мишени.

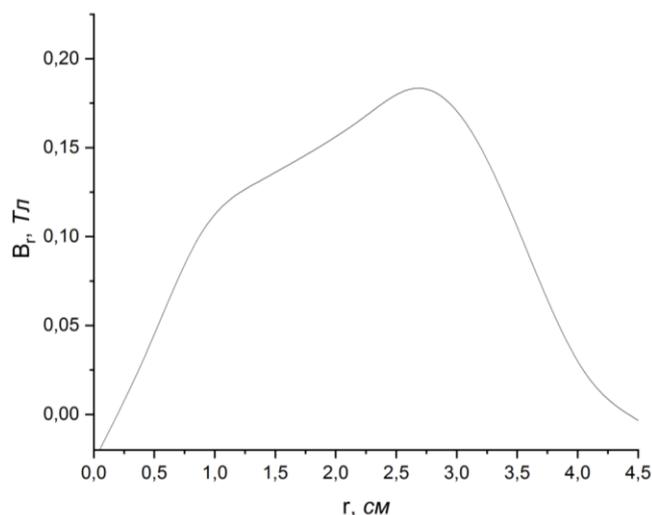


Рисунок 2.8 – Распределение продольной составляющей вектора магнитной индукции вдоль поверхности мишени

Значение магнитного поля обратно пропорционально толщине мишени МРС. На рис.2.8 представлены результаты моделирования распределение магнитного поля магнетрона с алюминиевой мишенью с помощью программы Elcut [35].

Коэффициент распыления – количество выбитых атомов на один бомбардирующий ион:

$$Y = \frac{n_a}{n_i} \quad (2.6)$$

Когда энергия бомбардирующих ионов $E < 1$ кэВ, коэффициент распыления определяется в соответствии с теорией упругих столкновений Зигмунда для режима первичного выбивания:

$$Y = \frac{3}{4\pi^2} \left(\frac{4M_i M_a}{(M_i + M_a)^2} \right) \frac{E}{U_s} \quad (2.7)$$

где M_i – атомная масса бомбардирующего иона; M_a – атомная масса атома мишени; E – энергия иона; U_s – энергия связи атомов мишени;

Коэффициент распыления зависит от энергии падающих ионов, в котором средняя энергия ионов определяется как [36]:

$$E_{ion} = 0.733 \cdot U \quad (2.8)$$

где U – напряжение в электрической цепи магнетрона.

Коэффициенты распыления, необходимые для расчетов, были вычислены с помощью программного кода SRIM [37].

Для расчетов скорости испарения (сублимации) используется формула Герца-Кнудсена:

$$V_{subl}(T) = \frac{1}{n_0(2\pi mkT)^{1/2}} (P_{sat}(T) - P^*) \quad (2.9)$$

где n_0 – атомная плотность вещества мишени; m – масса атома; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К постоянная Больцмана; $P_{sat}(T)$ – давление насыщенного пара при температуре поверхности T ; P^* – гидростатическое давление над поверхностью сублимации.

Для максимальной скорости испарения есть верхний предел, по которому она не будет больше числа молекул пара, ударяющихся о поверхность конденсата в состоянии равновесия:

$$i = \frac{v}{4} n_s \quad (2.10)$$

где v – средняя арифметическая скорость молекула, n_s – равновесная концентрация молекул пара.

Давление насыщенного пара при температуре поверхности мишени описывается уравнением состояния идеального газа:

$$P_{sat}(T) = n_{sat} kT \quad (2.11)$$

где n_{sat} – плотность насыщенных паров; T – температура поверхности мишени.

Плотность насыщенных паров над поверхностью мишени описывается приближением Эйнштейна для модели твердого тела:

$$n_{sat} = \left(\frac{mk\theta_0^2}{2\pi\hbar T_s} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{U_s}{kT_s} - 1\right) \quad (2.12)$$

где $\theta_0 = \hbar\nu_0/k$ – температура Дебая.

2.3.2. Методика Ламберта-Кнудсена для расчёта плотности потока осаждаемых металлических частиц

Поток частиц, эмитируемых с элементарной площадки на поверхности мишени и осаждаемых на поверхность растущего покрытия, подчиняется второму закону Ламберта-Кнудсена [38]:

$$V_{dep} = \frac{v_i dS_i \cos\varphi_i \cos\gamma_i}{\pi L^2} \quad (2.13)$$

где v_i – скорость частиц за счёт распыления с элементарной площадки на поверхности мишени dS_i ; φ_i – угол между нормалью к элементарной площадке dS_i на поверхности мишени и направлением осаждения на элементарную площадку подложки dS ; γ_i – угол между плоскостью элементарной площадки подложки и плоскостью перпендикулярной вектору, направленному от элементарной площадки dS_i на поверхности мишени к dS поверхности подложки; L – расстояние между подложкой и мишенью.

По второму закону Ламберта-Кнудсена: количество испаренных частиц, достигающих поверхность подложку в секунду, обратно пропорциональны квадрату расстояния «мишень-подложка»; интенсивность удаления частиц с элементарной площадки мишени пропорциональна косинусу угла между направлением движения частицы и нормалью к поверхности.

2.3.3. Структура потоков энергии, поступающих на подложку при осаждении покрытий

Свойства покрытия зависит от потоков энергии и частиц, поступающих на подложку. Количественная оценка дает возможность управлять структурными и функциональными характеристиками покрытия. Для этого были выполнены расчёты потоков энергии и частиц, с целью сравнения их с данными из экспериментов.

Поток энергии, поступающих на подложку F_{dep} состоит из трех компонентов:

$$F_{dep} = F_{targets} + F_{ППГ} + F_{bias} \quad (2.14)$$

где, $F_{targets}$ – потоки энергии со стороны магнетронов;
 $F_{РПГ}$ – потоки энергии, поступающие на подложку из области плазмы, генерируемой РПГ;

F_{bias} – потоки энергии за счёт отрицательного потенциала смещения.

Потоки энергии, поступающие на подложку со стороны мишеней МРС:

$$F_{targets} = F_{rad_Cr} + F_{cond_subl_Cr} + F_{cond_sput_Cr} + F_{cond_sput_Al} + F_{kin_subl_Cr} + F_{kin_sput_Cr} + F_{kin_sput_Al} \quad (2.15)$$

где F_{rad_Cr} – плотность потока теплового излучения с поверхности «горячей» хромовой мишени;

$F_{cond_subl_Cr}$ – плотность потоков энергии, выделяющейся при конденсации на подложке сублимирующих атомов хрома;

$F_{cond_sput_Cr}$ – потоки энергии, выделяющейся при конденсации распыленных атомов хрома;

$F_{cond_sput_Al}$ – потоки энергии, выделяющейся при конденсации распыленных атомов алюминия;

$F_{kin_subl_Cr}$ – потоки энергии, передаваемые подложке при термализации осаждаемых сублимирующих атомов хрома;

$F_{kin_sput_Cr}$ – потоки энергии, передаваемые подложке при термализации осаждаемых распыленных атомов хрома;

$F_{kin_sput_Al}$ – потоки энергии, передаваемые подложке при термализации осаждаемых распыленных атомов алюминия;

Плотность потока теплового излучения на поверхности подложки с координатами (X, Y) рассчитывается на основе законов Ламберта и Стефена – Больцмана. Если учесть неравномерное распределение температуры на поверхности мишени, формула для расчета [32]:

$$F_{rad}(X, Y) = \frac{L^2}{\pi} \int_{S_{targ}} \frac{\varepsilon_p \sigma_{SB} (T_{targ}^4(x_{targ}, y_{targ}) - T_{sub}^4) dx_{targ} dy_{targ}}{(L^2 + (X - x_{targ})^2 + (Y - y_{targ})^2)^2} \quad (2.16)$$

где σ_{SB} – постоянная Стефена-Больцмана;

T_{targ} – температура на поверхности мишени в области с координатами (x_{targ}, y_{targ}) ;

T_{sub} – температура подложки;

ε_p – приведенная степень черноты ($\varepsilon_p = \frac{1}{(\frac{1}{\varepsilon_{targ}} + \frac{1}{\varepsilon_{sub}} - 1)}$);

ε_{targ} – степень черноты поверхности мишени;

S_{targ} – площадь поверхности мишени;

ε_{sub} – степень черноты поверхности подложки;

Плотность потока тепла, выделяемого при конденсации сублимирующих или распыленных атомов, описывается как:

$$F_{cond_subl}(X, Y) = F_{dep_subl}(X, Y) \cdot U_s \quad (2.17)$$

$$F_{cond_sput}(X, Y) = F_{dep_sput}(X, Y) \cdot U_s \quad (2.18)$$

F_{dep_sput} – плотность потока осаждаемых распыленных атомов;

F_{dep_subl} – плотность потока сублимирующих атомов;

U_s – поверхностная энергия связи атомов;

Кинетическая энергия осаждаемых испаренных частиц, которая передается поверхности подложки при их термализации, оценивается по средней скорости частиц из распределения Максвелла:

$$F_{kin_subl}(X, Y) = \frac{L^2 n_0}{\pi} \int_{S_{targ}} \frac{(4k_B \frac{T_{targ}(x_{targ}, y_{targ})}{\pi}) \cdot V_{subl}(x_{targ}, y_{targ}) dx_{targ} dy_{targ}}{(L^2 + (X - x_{targ})^2 + (Y - y_{targ})^2)^2} \quad (2.19)$$

k_B – постоянная Больцмана.

Наиболее вероятная энергия в энергетическом спектре Томсона, характеризующем распыленные атомы, была использована для оценки кинетической энергии осаждаемых распыленных частиц:

$$F_{kin_sput}(X, Y) = \frac{U_s}{2} F_{dep_sput}(X, Y) \quad (2.20)$$

Вклад потоков энергии, поступающих на подложку за счёт отрицательного напряжения смещения можно описать как:

$$F_{bias} = \frac{U_{bias} \cdot I_{bias}}{S_{подл+держ}} \quad (2.21)$$

где U_{bias}, I_{bias} – напряжение и ток смещения; $S_{\text{подл+держ}}$ – площадь поверхности подложки и держателя подложки;

Помимо потоков энергии, поступающих на подложку, должны учитываться потери энергии, которые описываются как:

$$F_{out} = F_{\text{тепл.подложка}} + F_{sput} + F_{\text{тепл.на держатель}} \quad (2.22)$$

где $F_{\text{тепл.подложка}}$ – потоки энергии за счёт теплового излучения подложки;

F_{sput} – потоки энергии перераспыленных частиц при бомбардировке растущей пленки на подложке;

$F_{\text{тепл.на держатель}}$ – потоки энергии за счёт теплового излучения держателя подложки.

2.3.4. Описание комплекса программ для расчёта потоков частиц и энергии при осаждении покрытий с использованием планарных магнетронных распылительных систем

Потоки энергии и частиц при осаждении покрытий, были рассчитаны с помощью программ «Hot target», «HIPIMS» и «Planet rotation». Данные программы разработаны в НОЦ Б. П. Вейнберга ТПУ. Для расчётов коэффициента распыления была использована программа «SRIM».

«Hot target» - программа, разработанная для расчёта потоков энергии и частиц при сублимации и скорости сублимации «горячей» мишени. Расчёты тепловых процессов в мишени реализуется с указанием входных данных о материале мишени (толщина, радиус и начальная температура мишени; плотность, коэффициент теплопроводности, удельная теплоёмкость, атомный вес, удельная теплота плавления и поверхностная энергия связи атомов вещества мишени).

«HIPIMS» - программа, предназначена для расчёта скорости распыления мишени, плотности потоков частиц и энергии при распылении мишени. Расчёты реализуются на основе закона Ламберта-Кнудсена, с указанием

мощности магнетрона, напряжение в электрической цепи магнетрона, радиуса мишени, энергии связи атомов на поверхности и коэффициента распыления мишени.

«Planet rotation» - программа, предназначенная для расчетов потоков энергии и частиц при планетарном вращении карусели-подложкодержателя. Для расчётов вводятся входные данные, такие как, распределение скоростей сублимации и/или распыления, расстояние подложка-мишень, плотность и атомный вес вещества мишени, радиус мишени, период вращения карусели и подложкодержателя вокруг своей оси.

«SRIM» - программа, разработанная для моделирования потоков частиц металла при магнетронном распылении и ионной имплантации по методу Монте-Карло. Начальными условиями для моделирования являются данные материала мишени магнетрона и энергии ионов, бомбардирующих поверхность мишени [37].

«Elcut» - программа для проведения инженерного анализа и двумерного моделирования методом конечных элементов. Данная компьютерная программа была использована для проектирования модели и расчёта распределения вектора магнитной индукции магнетронной распылительной системы [35].

2.4. Расчётная методика для определения структуры потоков частиц в режиме планетарного вращения подложек

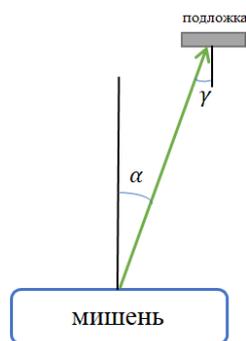


Рисунок 2.9 – Схема нанесения покрытия из элементарной области на мишени по второму закону Ламберта-Кнудсена

Когда мишень и подложка имеют плоскую форму, начало координат находится в плоскости, совпадающей с поверхностью мишени, то плотность потока осаждаемых частиц N_{dep} в любой точке на поверхности подложки, совершающей планетарное вращение на карусели, рассчитывается по формуле:

$$N_{dep_k}(X, Y) = \int_{S_k} \frac{N_i(x_{targ}, y_{targ}) \cos \alpha_i(x_{targ}, y_{targ}) \cos \gamma_i(x_{targ}, y_{targ}) dx_{targ} dy_{targ}}{\pi L^2(x_{targ}, y_{targ})} \quad (2.23)$$

$$k = 1, 2, 3$$

где $\cos \alpha_i$ – угол между нормалью к элементарной площадке dS_i на поверхности мишени и направлением осаждения на элементарную площадку dS на поверхности подложки, $\cos \gamma_i$ – угол между нормалью к элементарной площадке на подложке и вектором, определяющим направление осаждения металлической частицы; S_k – площадь k -ой мишени; L – расстояние между подложкой и мишенью.

Потоки осаждаемых хромовых частиц:

$$N_{dep_Cr}(X, Y) = N_{dep_sput}(X, Y) + N_{dep_subl}(X, Y) = \frac{L^2 n_0}{\pi} \int_{S_{targ}} \frac{(V_{sput}(x_{targ}, y_{targ}) + V_{subl}(x_{targ}, y_{targ})) \cos \alpha_i(x_{targ}, y_{targ}) \cos \gamma_i(x_{targ}, y_{targ}) dx_{targ} dy_{targ}}{(L^2 + (X - x_{targ})^2 + (Y - y_{targ})^2)^2}$$

Поток осаждаемых алюминиевых частиц на подложку с координатами:

$$N_{dep_Al}(X, Y) = N_{dep_sput}(X, Y) = \frac{L^2 n_0}{\pi} \int_{S_{targ}} \frac{(V_{sput}(x_{targ}, y_{targ})) \cos \alpha_i(x_{targ}, y_{targ}) \cos \gamma_i(x_{targ}, y_{targ}) dx_{targ} dy_{targ}}{(L^2 + (X - x_{targ})^2 + (Y - y_{targ})^2)^2}$$

Сначала производился расчёт N_{dep} для каждой мишени отдельно для каждого из 8 секторов карусели. Затем все потоки металлических частиц складывались с учётом геометрии осаждения, изображённой на рис. 2.4. При этом было установлено единое начало координат. Оно совпадало с вершиной квадрата, в который вписана хромовая мишень. Порядок пересчёта потоков осаждаемых частиц содержится в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Порядок пересчёта секторов карусели.

№ сектора	Магнетрон с Cr мишенью	Магнетрон с Al ₁ мишенью	Магнетрон с Al ₂ мишенью
1	1	8	4
2	2	1	5
3	3	2	6
4	4	3	7
5	5	4	8
6	6	5	1
7	7	6	2
8	8	7	3

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данной магистерской диссертации является получить Cr-Al-N_x покрытия с высоким показателем твердости и других физико-механических свойств. Вакуумно-плазменная установка по нанесению покрытий на основе нитрида хрома располагается в лаборатории НОЦ Б.П. Вейнберга. Настоящая работа предполагает исследование эффективности способа решения поставленной инженерной задачи, а именно – применения программного кода «Hot target» и «HIPIMS» в качестве средства для получения зависимости структуры потоков частиц и энергии, поступающих на растущее покрытие, от мощности магнетронов и напуска азота в рабочую камеру. Оценка перспективности, планирование и формирование бюджета научного исследования позволяют анализировать его экономическую эффективность.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является оценить перспективность развития и коммерческую ценность исследования. экономическое планирование и оценка ресурсоэффективности исследования. Достижение цели обеспечивается решением задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

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

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Работа посвящена на разработку высокопроизводительной технологии по нанесению Cr-Al-N_x покрытий с использованием комплекса оборудования на основе магнетронных распылительных систем, чтобы минимизировать недостатки традиционного метода реактивного магнетронного осаждения.

Покрытия из Cr-Al-N_x можно получить методом вакуумно-дугового испарения в вакууме, магнетронного реактивного распыления и ионного распыления. По сравнению с другими методами, использование метода реактивного магнетронного распыления позволяет получать покрытия высокого качества, с высокими характеристиками физико-механическими свойствами. Однако, низкая скорость осаждения и возможно отравление поверхности металлической мишени остаются основными недостатками данного метода. Для минимизирования данных недостатков было решено использовать 3 планарных магнетрона с дисковыми металлическими мишенями, а именно: магнетрон с Cr «горячей» мишенью (1 шт.) и с Al охлаждаемой мишенью (2 шт.).

Разработанная технология может быть востребована на любом производстве, связанном с технологиями тонких плёнок.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку

сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Предлагаемый метод для повышения производительности технологии по нанесению Cr-Al-N_x покрытий с использованием комплекса оборудования на основе магнетронных распылительных систем позволяет минимизировать основные недостатки данного метода.

Технология получения тонких плёнок с применением магнетронных распылительных систем дает преимущества по следующим параметрам:

- невысокие тепловые нагрузки на подложку, что важно при нанесении покрытий на полимерные подложки;
- возможность нанесения покрытий сложного состава из сплавов;
- возможность нанесения покрытий в среде реактивного газа (оксиды, нитриды, карбиды);
- возможность нанесения покрытия с хорошей воспроизводимостью по толщине и составу на подложки больших размеров;

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. Данное исследование целесообразно производить с использованием оценочной карты, показанной в таблице 4.1. Для этого были определены 2 конкурента на рынке технологии нанесения покрытий на основе покрытий сложного состава методом высокоскоростного магнетронного распыления из жидкой фазы (Б₁) и технология среднечастотного магнетронного распыления (Б₂).

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							

1. Повышение производительности труда пользователя	0,2	4	3	4	0,2	0,15	0,1
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,05	4	3	4	0,16	0,3	0,16
3. Помехоустойчивость	0,05	4	4	5	0,5	0,3	0,5
4. Энергоэкономичность	0,1	4	4	4	0,2	0,8	0,16
5. Надежность	0,05	5	5	5	0,2	0,6	0,6
6. Уровень шума	0,01	5	4	5	0,5	0,3	0,5
7. Безопасность	0,05	4	5	4	0,16	0,12	0,2
8. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,03	5	5	3	0,25	0,12	0,2
9. Простота эксплуатации	0,02	5	5	4	0,16	0,24	0,16
10. Качество интеллектуального интерфейса	0,1	4	4	3	0,15	0,16	0,12
11. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,07	5	5	4	0,25	0,15	0,1
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,02	5	5	5	0,16	0,1	0,15
2. Уровень проникновения на рынок	0,03	5	5	4	0,24	0,16	0,15
3. Цена	0,02	4	4	3	0,25	0,12	0,1
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,01	3	4	5	0,25	0,16	0,24
5. Послепродажное обслуживание	0,08	3	5	4	0,16	0,15	0,25
6. Финансирование научной разработки	0,05	4	3	5	0,5	0,24	0,25
7. Срок выхода на рынок	0,01	5	4	5	0,25	0,15	0,25
8. Наличие сертификации разработки	0,05	5	5	4	0,2	0,16	0,2
Итого	1	83	82	80	4,74	4,48	4,39

По итогам анализа, представленным в карте сравнения оценок конкурентных разработок (технических решений), можно сделать вывод, что предлагаемая нами технология осаждения покрытий сложного состава имеет более высокий показатель конкурентоспособности (4,74) и опережает своих конкурентов по многим показателям. А именно таким как удобство в

эксплуатации, количество потребления энергии, безопасность, простота в эксплуатации и т.д. Экономические показатели оценки эффективности разработки превосходят своего основного конкурента по ряду факторов.

4.1.3 SWOT анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Целью SWOT-анализа является определение всех сильных и слабых сторон научной разработки, которые рассматриваются как внутренние факторы, а также изучение внешних факторов, каковыми являются рыночные возможности и угрозы, для получения четкого представления основных направлений развития предприятия. На основе такого исследования организация должна максимально использовать свои сильные стороны, попытаться преодолеть слабости, воспользоваться благоприятными возможностями и защититься от потенциальных угроз. Он проводится в несколько этапов. Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Предварительное моделирование. С2. Высокая производительность метода. С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями. С4. Простая методика получения плёнок.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки. Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой. Сл3. Сложность управления</p>
--	--	---

	С5. Квалифицированный персонал.	некоторыми параметрами осаждения. Сл4. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца. Сл5. Изнашивание мишени магнетрона.
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Использование инфраструктуры ОЭЗ ТВТ Томск	1. Получение технологии исследования 2. Продвижение технологии на рынке.	3. Приобретение необходимого оборудования. 4. Сокращение поставок или смена поставщика. 5. Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др.
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства У4. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции	1. Продвижение технологии с целью создания спроса. 2. Сертификация и стандартизация технологии	3. Приобретение необходимого оборудования. 4. Продвижение технологии с целью создания спроса.

Выявлены сильные и слабые стороны исследования, а также его возможности и вероятные угрозы при помощи SWOT анализа: быстрота анализа многослойных покрытий с возможностью исследования химического состава материалов с высокой точностью позволят быстро занять свою нишу на рынке тонкопленочных технологии.

Для противодействия угрозе У1 следует приобрести и ввести в эксплуатацию современное оборудование, чтобы увеличить производительность и качество получаемых покрытий, но, так как стоимость таких установок значительно высока, необходимо активное участие принимать в конкурсах на гранты для разработок научных исследований. Также необходимо учувствовать в различных конференциях с целью продвижения технологии. Для противодействия угрозе У2 необходимо своевременно сертифицировать и стандартизировать технологии в соответствии с

актуальными ГОСТами РФ. В случае, если этим пренебречь, разработанная технология может не выйти в промышленное использование.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Возможно использование этой матрицы в качестве одной из основ для оценки вариантов стратегического выбора. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Интерактивная матрица проекта представлена в таблице 4.3. Анализ интерактивных таблиц представляется в форме записи сильно коррелирующих сильных сторон и возможностей, или слабых сторон и возможностей и т.д. следующего вида: B1C1C2C3C4; B2C1C2C3C4. Каждая из записей представляет собой направление реализации проекта.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны проекта				
		C1	C2	C3	C4	C5
Возможности проекта	B1	+	+	-	0	+
	B2	-	+	+	-	0
	B3	-	+	+	-	0
	B4	+	-	0	+	0

В рамках третьего этапа составлена итоговая матрица SWOT-анализа, (табл. 4.4).

Таблица 4.4 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Предварительное моделирование. С2. Высокая</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки. Сл2. Отсутствие у</p>
--	---	---

	<p>производительность метода.</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4. Простая методика получения плёнок.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал.</p>	<p>потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.</p> <p>Сл3. Сложность управления некоторыми параметрами осаждения.</p> <p>Сл4. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца.</p> <p>Сл5. Изнашивание мишени магнетрона.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Использование инфраструктуры ОЭЗ ТВТ Томск</p>	<p>Из данной комбинации видно, что существует возможность создания надежного и экономически выгодного способа создания пленок с помощью плазмы магнетронного разряда. Спрос на продукт даст возможность приобретения качественного оборудования.</p>	<p>Спрос на новый продукт может быть увеличен за счет его технологических возможностей. Если использовать инновационную инфраструктуру и необходимое оборудования для проведения испытания опытного образца в ТПУ, то появится возможность избавиться от недостатка финансовых средств</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства</p> <p>У4. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции</p>	<p>Исследуемая технология получения тонких пленок дает возможность получать пленки необходимых характеристик при существенно меньших затратах аналогов.</p>	<p>Недостаток финансовых средств приводит к отсутствию спроса на новые технологии производства. Уменьшение производственных затрат приведет к повышению спроса на новые технологии.</p>

Исходя из анализа матрицы, можно сделать вывод, что необходимо задействовать информационную структуру ТПУ для привлечения ресурсов и покупателей к данной разработке, т.к. она привлекательна с точки зрения экономичности производства, энергоэффективности данного метода и значительно производительней конкурентных методик получения металлических покрытий сложного состава.

4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На любой стадии цикла жизни научной разработки необходимо проводить оценку степени готовности данной разработки к коммерциализации. Результаты данных исследований приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Таблица оценки степени готовности научно-исследовательской разработки к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	2	5
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	2	3
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	2	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	1	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	2	3
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	4
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	1	4
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	3
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	3
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	1	3
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	4
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	5
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	5
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	5
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	2	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	28	58

При проведении анализа по таблице, приведенной выше, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Так, при оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать. Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i \quad (4.1)$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению, B_i – балл по i -му показателю.

По результатам анализа можно сделать вывод, что перспективность данного исследования находится ниже среднего уровня, так как данное исследование имеет фундаментальный характер исследования.

4.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

В основном выделяют основные методы коммерциализации научных разработок:

1. Торговля патентными лицензиями.
2. Передача ноу-хау.

3. Инжиниринг.
4. Франчайзинг.
5. Организация собственного предприятия.
6. Передача интеллектуальной.
7. Организация совместного предприятия.
8. Организация совместных предприятий.

Из всех перечисленных методов коммерциализации, инжиниринг и торговля патентными лицензиями поможет успешному продвижению разрабатываемого проекта.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Определение трудоемкости выполнения работы

Основная часть стоимости разработки проекта составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников разработки проекта. Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить экспертным путем, в «человеко-днях». Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости определяется по формуле:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{min}i} + 2t_{\text{max}i}}{5} \quad (4.2)$$

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

t_{min} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы, чел.дн;

t_{max} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы, чел.дн.

На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях $T_{\text{рд}}$:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} \quad (4.3)$$

где $Ч_i$ – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Постановка целей и задачи исследования»:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8 \text{ чел. – дн} \quad (4.4)$$

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{Ч_i} = \frac{2,8}{1} = 2,8 \text{ раб. дн} \quad (4.5)$$

4.2.2 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ и представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи. Для построения графика Ганта длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней переводились в календарные дни по формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} \quad (4.6)$$

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

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

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \quad (4.7)$$

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

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

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

Расчет календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$K_{\text{кал}} = \frac{365}{365-104-14} = 1,48 \quad (4.8)$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Выбор направления исследований»:

$$T_{ki} = 2.8 \cdot 1.48 = 4.144 \approx 4 \text{ кал. дн} \quad (4.9)$$

Все полученные значения в календарных днях округлялись до целого числа. Результаты представлены в таблице 4.6, где Р – руководитель, И – инженер.

Таблица 4.6 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{\min} , чел-дни		t_{\max} , чел-дни		$t_{\text{ожг}}$, чел-дни					
	Р	И	Р	И	Р	И	Р	И	Р	И
Постановка целей и задач исследования	2		4		2,8		2,8		4,1	
Составление и утверждение технического задания	2		4		2,8		2,8		4,1	
Выбор направления исследований и способа решения задач	2		4		2,8		2,8		4,1	
Подбор и изучение материалов по теме		21		28		23,8		23,8		35,2
Составление плана экспериментов	1	4	2	5	1,4	4,4	0,7	2,2	1	3,3
Подготовка образцов для экспериментов		3		5		3,8		3,8		5,6
Проведение экспериментальных работ	14	24	20	34	16,4	28	8,2	14	12,1	20,7
Выполнение расчетов		10		15		12		12		17,8

Анализ и обработка полученных результатов		6		10		7,6		7,6		11,2
Обсуждение и оценка эффективности результатов	5	5	10	10	7	7	3,5	3,5	5,2	5,2
Составление пояснительной записки		4		6		4,8		4,8		7,1
Подготовка к защите		4		6		4,8		4,8		7,1
Итого					33,2	96,2	20,8	76,5	30,8	113,2

Таблица 4.7 - Календарный план-график проведения НИОКР

№	Вид работ	Исполнители	T _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				февр.		март			апрель			май			июнь		
				15	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	
1	Постановка целей и задач исследования	Руководитель	4,1	■													
2	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4,1		■												
3	Выбор направления исследований и способа решения задач	Руководитель	4,1			■											
4	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер (дипломник)	35,2			▨	▨	▨	▨	▨	▨						
5	Составление плана экспериментов	Руков., инж.	3,3							▨	■						
6	Подготовка образцов для экспериментов	Инженер (дипломник)	5,6									▨					
7	Проведение экспериментальных работ	Руков., инженер (дипломник)	20,7										▨	■			
8	Выполнение расчетов	Инженер	17,8										▨				

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода. Также в стоимость материальных затрат включают транспортнозаготовительные расходы (3 – 5 % от цены). Теоретические исследования, а также моделирование системы требуют ряд программных продуктов: Microsoft Office, HIPIMS, HOT TARGET, SRIM др. Большинство из них предоставляются бесплатно для студентов ТПУ, другие находятся в свободном доступе в сети «Интернет». Расчёт материальных затрат приведён в таблице 4.9.

Таблица 4.8 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.
1.	Баллон Водорода	1	15000	15000
2.	Баллон Аргон	1	12000	12000
Всего за материалы				27000
Транспортно-заготовительные расходы (3–5%)				1350
Итого по статье				28350

4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

При выполнении исследования дополнительное оборудование для проведения исследований не было приобретено. Все использованное оборудование являлось собственностью отделения экспериментальной физики НИИ ТПУ. Необходимо рассчитать амортизационные отчисления для использованного оборудования

Таблица 4.9 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во ед. использования,	Время использования, мес.	N_A , %	Цена оборудования, руб.	Амортизация
-------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	-----------	-------------------------	-------------

1	ВЧ генератор COMDEL СВ 5000	1	7	0,16	0,142	1000000	1893
2	Нанотвердомер «NanoTest 600»	1	10	0,1	0,1	300000	250
Итого:						2143 руб.	

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n} \quad (4.10)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m \quad (4.11)$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Таким образом, для ВЧ генератора COMDEL СВ 5000 норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{7} = 0.142 \quad (4.12)$$

Амортизация будет составлять:

$$A = \frac{1000000 \cdot 0.142}{12} \cdot 0.16 = 1893 \text{ руб.} \quad (4.13)$$

Норма амортизации для нанотвердомера «NanoTest 600» норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{10} = 0.1 \quad (4.14)$$

Амортизация будет составлять:

$$A = \frac{300000 \cdot 0.1}{12} \cdot 0.1 = 250 \text{ руб.} \quad (4.15)$$

4.3.3 Основная заработная плата

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада. Заработная плата включает в себя основную и дополнительную части:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.16)$$

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

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

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (4.17)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (4.18)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M=11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M=10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 4.10 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	104	104
- выходные дни	14	14
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	24	24
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	223	223

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (4.19)$$

где Z_{tc} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от Z_{tc});

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от Z_{tc});

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Гомска).

Тарифная заработная плата Z_{tc} находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда $T_{ci} = 600$ руб. на тарифный коэффициент k_T и учитывается по единой для бюджетной организации тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии.

Таблица 4.11 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Z_{tc} , руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	24960	0,3	0,3	1,3	51917	2608	20,8	54757
Инженер	12664	0,3	0,3	1,3	26341	1323	76,5	101868
Итого $Z_{осн}$								156625

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10–15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Таким образом, дополнительная заработная плата, по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (4.20)$$

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

Таблица 4.12 – Зарплата исполнителей

Зарплата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата	54757	101868
Дополнительная зарплата	8213	15280

Зарплата исполнителя	62970	117148
Итого по статье $C_{зп}$	180118	

Таким образом, расчет дополнительной заработной платы производился с дополнительным коэффициентом 15%, и итоговая суммарная заработная плата составила 180118 рублей.

4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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.

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) \quad (4.21)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

– для руководителя:

$$Z_{внеб} = 0,3 \cdot (54757 + 8213) = 18891$$

– для инженера:

$$Z_{внеб} = 0,3 \cdot (101868 + 15280) = 35144$$

Таким образом, затраты на социальный налог составляют 54035 рублей.

4.3.5 Накладные расходы

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

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей} \div 5) \cdot k_{\text{пр}}, \quad (4.22)$$

где $k_{\text{пр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

$$Z_{\text{накл}} = 264646 \cdot 0,2 = 52929 \text{ руб}$$

Таблица 4.13 – Группировка затрат по статьям

Статьи					
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов
2143	28350	156625	23493	54035	264646

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИ по форме, приведенной в таблице 4.14. В таблице также представлено определение бюджета затрат двух конкурирующих научно-исследовательских проектов.

Таблица 4.14 – Группировка затрат по статьям

№	Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
		Текущий Проект	Исп.2	Исп.3	
1	Материальные затраты НИР	28350	200710	200710	Пункт 4.3.1
2	Затраты на специальное оборудование	2143	2143	2143	Пункт 4.3.2
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	156625	156625	156625	Пункт 4.3.3
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	23493	23493	23493	Пункт 4.3.3
5	Отчисления во внебюджетные фонды	54035	54035	60535	Пункт 4.3.4
6	Накладные расходы	52929	66074	66074	Пункт 4.3.5

Бюджет затрат НИР	317575	503080	509580	Сумма ст. 1- 5
-------------------	--------	--------	--------	----------------

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

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносится финансовые значения по всем вариантам исполнения. В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги магнетронного распыления с «горячей» мишенью ($\Phi_{p1}=316952$), электролитический метод осаждения пленок ($\Phi_{p2}=503080$) и дуговые источники плазмы ($\Phi_{p3}=509580$).

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.23)$$

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

Φ_{ri} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп1}} = \frac{317575}{540000} = 0,58$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп2}} = \frac{503080}{540000} = 0,93$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп3}} = \frac{509580}{540000} = 0,94$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее

численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.24)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

n – число параметров сравнения.

Таблица 4.15 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	5	3	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	4	2	3
3. Помехоустойчивость	0,15	5	3	3
4. Энергосбережение	0,20	4	3	3
5. Надежность	0,25	4	4	4
6. Материалоемкость	0,15	4	4	4
ИТОГО	1			

$$I_{p-ucn1} = 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,05 + 4 \cdot 0,01 = 3,94;$$

$$I_{p-ucn2} = 3 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,05 + 4 \cdot 0,1 = 3,15;$$

$$I_{p-ucn3} = 4 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,05 + 4 \cdot 0,1 = 3,5.$$

Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность»

В данном разделе была проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности научного исследования:

1. Выявлены потенциальные потребители результатов исследования. Разработанная технология может быть востребована на любом производстве, связанном с технологиями тонких плёнок.

В результате SWOT – анализа были выявлены сильные и слабые стороны исследования, а также угрозы и возможности последнего. Показано, что, не смотря на имеющиеся недостатки и явные угрозы, исследование характеризуется огромным потенциалом и существенными преимуществами, среди которых актуальность тематики исследования и высокое качество покрытий.

2. Проведён анализ конкурентных технических решений. Были определены 2 конкурента на рынке технологии нанесения покрытий на основе нитридов. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.

3. В ходе планирования научно-исследовательских работ определены структура и перечень работ, выполняемых рабочей группой. В данном случае рабочая группа состоит из двух человек: руководитель и инженер. На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график, построенный на основе диаграммы Ганта, по которому можно увидеть, что самые продолжительные по времени работы – это теоретические и экспериментальные исследования;

4. Оценена экономическая эффективность разработки. Были выбраны ближайшие аналоги магнетронного распыления, электролитический метод осаждения пленок и дуговые источники плазмы. Разрабатываемая система превосходит аналоги №2 и №3 по ресурсоэффективности в виду лучшего

получения качества покрытий. А также разработка превосходит аналоги по интегральному показателю эффективности вследствие меньшей стоимости реализации проекта.

5. Бюджет исследования составил 317575 руб. Он состоит из материальных затрат (28350 руб.), затрат на оплаты труда (180118 руб.), отчислений во внебюджетные фонды (54035 руб.) и накладных расходов (52929 руб.), амортизационные отчисления (2143 руб.); Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 3.94 и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

Таким образом, капиталовложения в размере 317575 рублей позволят реализовать разработанный проект по разработке исследовании потоков частиц и формирование элементного состава Cr-Al-N_x покрытий с использованием магнетронных распылительных систем.

Глава 5. Социальная ответственность

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Вредным производственным фактором - называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

Настоящая магистерская диссертация посвящена осаждению Cr-Al-N_x покрытий при помощи магнетронных распылительных систем. Процесс нанесения покрытий осуществлялся на вакуумно - плазменной установке. Исследование предполагает работу с высоким напряжением и различными газами.

Объектом исследования являются Cr-Al-N_x покрытия, а предметом исследования служат различные параметры осаждения данных покрытий.

Научно-технической базой для проведения исследований стала лаборатория научно-образовательного центра Б. П. Вейнберга

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа, и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Рабочее время – время, в течение которого работник в соответствии с правилами внутреннего трудового распорядка и условиями трудового договора должен исполнять трудовые обязанности, а также иные периоды времени, которые в соответствии с трудовым кодексом и другими федеральными законами относятся к рабочему времени. В соответствии с Трудовым кодексом РФ нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю. В целях обеспечения прав и свобод человека и гражданина работодатель и его представители при обработке персональных данных обязаны соблюдать определенные требования в соответствии с Конституцией и законами РФ. Обработка персональных данных может осуществляться исключительно в целях обеспечения соблюдения законов и иных нормативных правовых актов, получении образования и продвижении по службе, обеспечения личной безопасности, контроля количества и качества выполняемой работы и обеспечения сохранности имущества.

К работе на лабораторной вакуумно-плазменной установке допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, прошедшие 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 и имеющие не менее II группы по электробезопасности. Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, правил безопасной работы с химическими веществами проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца.

При введении в эксплуатацию нового оборудования сотрудники, которые будут работать на нем, должны пройти внеплановый инструктаж по правилам эксплуатации и безопасной работе на данном оборудовании [41].

5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1.

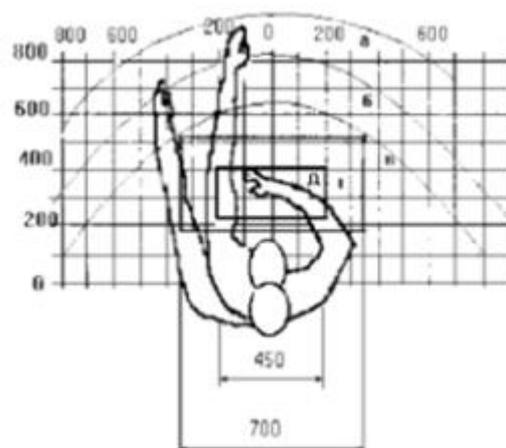


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

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

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420–

550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана. Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100–300 мм от края [42].

5.2 Производственная безопасность

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [43].
2. Превышение уровня шума	-	+	+	ГОСТ 12.1.029-80 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация» [44].

3.Отсутствие или недостаток естественного света	+	-	+	СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение [45].
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны	-	+	+	СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение [45].
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	-	-	+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [46].

Для идентификации потенциальных факторов был использован ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [47].

5.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов

В данном разделе представлены решения, обеспечивающие снижение влияния факторов, представленных в таблице 5.1. Также предлагаются мероприятия, обеспечивающие безопасность технологического процесса и эксплуатации оборудования.

5.3.1 Превышение уровня шума

Осаждение плёнок осуществлялось на вакуумной установке, одними из основных частей которой являются форвакуумный и турбомолекулярный насосы, создающие производственный шум. Воздействие шума в первую очередь влияет на органы слуха, нервную и сердечно-сосудистую системы. В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 допустимый уровень шума при сосредоточенной умственной работе составляет 75 дБА. Зоны с уровнем звука

или эквивалентным уровнем звука выше 80 дБА обозначены знаками безопасности по ГОСТ 12.4.026. Рекомендуется использовать следующие средства коллективной защиты: акустические экраны, выгородки, объемные поглотители звука, виброизолирующие опоры; средства индивидуальной защиты: специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противозумные каски. В качестве материалов для шумозащитных экранов применяют минеральную вату, композитные материалы, пластмассы, поликарбонаты, древесина, металлы, кирпичную кладку, бетон.

5.3.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Согласно СП 52.13330.2016 [48] в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 200 Лк. Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда. На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда. Для защиты от слепящей яркости видимого излучения (факел плазмы в камере с катализатором) применяют защитные очки, щитки, шлемы. Очки на должны ограничивать поле зрения, должны быть легкими, не раздражать кожу, хорошо прилегать к лицу и не покрываться влагой.

Используются три вида освещения: естественное (от солнца), искусственное (от искусственных источников), совмещенное. При недостатке естественного света нарушаются обмен веществ и резистентность организма, поэтому используются газоразрядные источники, близкие по спектру к

естественному свету. Источники искусственного освещения: лампы накаливания, газоразрядные низкого (люминесцентные) и высокого (ДРЛ) давления. Существуют системы общего освещения (светильники распределяются равномерно по площади освещения), локализованные (для освещения оборудования и рабочих мест), местные (освещение рабочей поверхности), комбинированные. В лаборатории применяется общая система освещения люминесцентными лампами ЛД. Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем $\lambda=1,1$, расстояние светильников от перекрытия $h_c = 0,3$ м. Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h=h_n-h_p \quad (5.1)$$

где h_n – высота светильника над полом, высота подвеса, h_p – высота рабочей поверхности над полом.

Высота светильника над полом, высота подвеса:

$$h_n = H - h_c = 3700 - 300 = 3400 \quad (5.2)$$

Высота рабочей поверхности над полом: $h_{pp} = 800$.

Расчетная высота, высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h=h_n-h_{pp}=3400-800=2600=2,6 \text{ м} \quad (5.3)$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1.1 \cdot 2.6 = 2.86 \text{ м} \quad (5.4)$$

Число рядов светильников в помещении:

$$Nb = \frac{B}{L} = \frac{4.3}{2.86} = 1.5 \approx 2 \quad (5.5)$$

Число светильников в ряду:

$$Na = \frac{A}{L} = \frac{5.7}{2.86} \approx 2 \quad (5.6)$$

Общее число светильников:

$$N = Na \cdot Nb = 4 \quad (5.7)$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле:

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2.86}{3} 0.953 \quad (5.8)$$

Размещаем светильники в два ряда. На рисунке изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами. Однако необходимо провести дополнительные расчеты для ширины комнаты, для точного определения расположения светильника, где L_1 – расстояние между светильниками по ширине, L_2 – расстояние между светильниками по длине:

$$4300 = L_1 + 2/3 L_2 + 2 \cdot 1150 \quad (5.9)$$

$$L_2 = \frac{(4300 - 2300) \cdot 3}{5} = 1200 \quad (5.10)$$

$$I = L_2/3 = 1200/3 = 400 \quad (5.11)$$

Расчёты для длины комнаты:

$$5700 = L_1 + 2/3 L_2 + 2 \cdot 60 \quad (5.12)$$

$$L_1 = \frac{(5700 - 120) \cdot 3}{5} = 3348 \quad (5.13)$$

$$I = L_1/3 = 3348/3 = 1116 \quad (5.14)$$

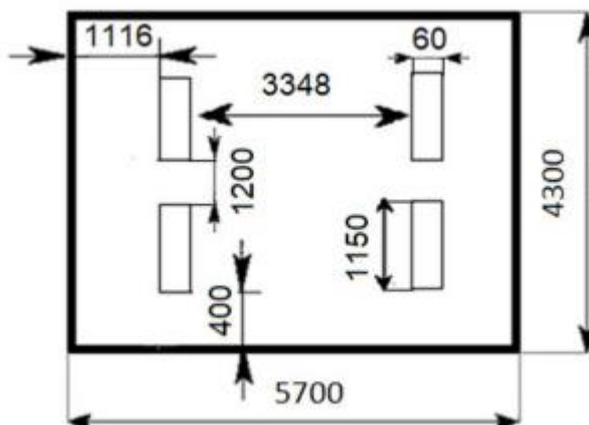


Рисунок 5.2 – Схема размещения светильников в помещении

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{5.7 \cdot 4.3}{2.6 \cdot (5.7 + 4.3)} = 0.94 \quad (5.15)$$

Для коэффициентов отражения берутся приблизительные значения: = 50% и потолка = 30%. Значения коэффициента использования светового потока

светильников с люминесцентными лампами прием равным 53 %. Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\Pi} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 5.7 \cdot 4.3 \cdot 1.5 \cdot 1.1}{4 \cdot 0.53} = 2861.42 \text{ лм} \quad (5.16)$$

Проверка выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\Pi}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% \leq 20\% \quad (5.17)$$

$$\frac{2900 - 2861.42}{2900} \cdot 100\% = 1,3\% \quad (5.18)$$

Нормы освещенности определяются основными признаками зрительной работы: размер различаемого объекта (буквы, штрих рисунка и т.д.), коэффициент отражения фона, контраст между объектом и фоном. На этой основе разработаны требования к естественному и искусственному, совмещенному освещению жилых и общественных зданий [49]. Согласно им в лаборатории наноструктурных биокomпозитов норматив естественного освещения при боковом освещении – 1,3 %, он выполняется. Норматив общего искусственного освещения (по СНиП 23-05-95 [45]): 400 лк. Измерения на рабочем месте дали результат: 470 лк

5.3.3 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

Несоблюдение правил ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов» может привести к опасным последствиям [50]. Поражение электрическим током может произойти при прикосновении к токоведущим частям, находящимся под напряжением, на которых остался заряд или появилось напряжение. Электрический ток оказывает на человека термическое, электролитическое, биологическое и механическое воздействие. Действие электрического тока на человека приводит к травмам или гибели людей. Для переменного тока частотой 50 Гц допустимое значение напряжения прикосновения составляет 2

В, а силы тока – 0,3 мА, для тока частотой 400 Гц, соответственно – 2 В и 0,4 мА, для постоянного тока – 8 В и 1 мА.

Мерами защиты от воздействия электрического тока являются:

1. Защитные оболочки, защитные ограждения (временные или стационарные). В этом случае достигается недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения. Ограждения в виде корпусов выполняются сплошными или сетчатыми. Для доступа непосредственно к электрооборудованию или токоведущим частям в ограждениях предусматриваются открывающиеся части: крышки, дверцы и т.д. Эти части закрываются специальными запорами или снабжаются блокировками.

2. Защитное заземление – это преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением. Защитное действие заземления основано на снижении напряжения прикосновения при переходе напряжения на нетоковедущие части, что достигается уменьшением потенциала корпуса относительно «земли» как за счет малого сопротивления заземления, так и за счет повышения потенциала примыкающей к оборудованию поверхности земли.

3. Изоляция токоведущих частей. Использование двойной изоляции, состоящей из рабочей и дополнительной изоляции. Дополнительная изоляция предусмотрена для защиты от поражения электрическим током в случае повреждения рабочей изоляции. Дополнительная изоляция может выполняться покрытием металлических конструктивных частей (корпусов, рукояток и т.д.) слоем изоляционного материала. Для этого целесообразно использовать лаки, смолы, изолирующие пленки. Наиболее совершенным, обеспечивающим практически полную безопасность, является изготовление корпусов электрооборудования из изоляционного материала.

4. Защитное отключение – быстродействующая защита, которая обеспечивает автоматическое отключение электроустановки при возникновении в ней опасности поражения током. Устройства защитного

отключения должны осуществлять защиту при глухих и неполных замыканиях на землю, автоматически контроль изоляции, цепей защитного. К устройствам защитного отключения предъявляются следующие требования: чувствительность, быстродействие (не более 0,2 с), стабильность, надежность, помехоустойчивость.

5.4 Экологическая безопасность

В настоящее время одним из важных вопросов в любой сфере деятельности является вопрос экологичности. Экологичность отхода представляет собой способность отхода не оказывать отрицательного воздействия на окружающую среду за пределами допустимых значений. В настоящий момент ведутся активные работы по переработке отходов, их утилизации или обеспечения повторного использования. Переработка является процессом деятельности, направленным на изменение физического, химического состояния отхода для дальнейшего обращения с отходами.

В данной работе отходами являются продукты реакций, полученные вследствие взаимодействий вакуумно-плазменной установки с хромовыми покрытиями. К газообразным отходам, загрязняющие атмосферу помещения, относятся естественные выделения – углекислый газ, пары воды, пары спирта и бензина, с помощью которых происходит отмывка образцов. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения. К жидким отходам относятся отходы, образующиеся в процессе отмывки образцов в органических и неорганических растворителях (спирт, бензин, ацетон), в процессе влажной уборки помещения лаборатории, при пользовании водопроводом. Данные отходы сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях.

К сфере защиты окружающей среды и рационального использования природных ресурсов относится и экономия ресурсов, в частности, энергетических. Реальным вкладом здесь может стать экономия электрической и тепловой энергии на территории предприятия. Несмотря на кажущуюся малость вклада в энергосбережение и в защиту атмосферного воздуха от загрязнения массовое движение в этом направлении, в том числе, в быту, принесет значимый эффект.

По степени воздействия на организм человека вредные вещества, согласно ГОСТ 12.1.007-99 [51], делятся на четыре класса опасности:

1. 1-й класс – вещества чрезвычайно опасные (ртуть, свинец, тетраэтилсвинец и др.);
2. 2-й класс – вещества высокоопасные (бензол, марганец, медь, сероводород и др.);
3. 3-й класс – вещества умеренно опасные (толуол, метанол, уксусная кислота и др.);
4. 4-й класс – вещества малоопасные (нефть, бензин, ацетон, этиловый спирт и др.).

5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – это состояние, при котором в результате возникновения источника чрезвычайной ситуации на объекте, определенной территории или акватории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, народному хозяйству и окружающей природной среде. ЧС делятся на два типа:

1. ЧС природного характера;
2. ЧС техногенного характера.

Виды ЧС природного характера: землетрясения; наводнения (половодье, паводок, затор, зажор, ветровой нагон, прорывы плотин); извержения вулканов;

цунами; ураганы, бури, смерчи, сильный ветер; обвалы; оползни; снежные лавины; сели; пожары; грозы; Чрезвычайные ситуации техногенного характера: транспортные аварии (катастрофы); пожары, взрывы, угроза взрывов; аварии с выбросом (угрозой выброса) химически опасных веществ; аварии с выбросом (угрозой выброса) радиоактивных веществ; аварии с выбросом (угрозой выброса) биологически опасных веществ; внезапное обрушение зданий, сооружений; аварии на электроэнергетических системах; аварии на коммунальных системах жизнеобеспечения; аварии на очистных сооружениях; гидродинамические аварии.

Возможные ЧС, которые могут возникнуть при осаждении хромовых покрытий методом магнетронной распылительной системы: землетрясение, пожар, отключение света, удар током, террористические действия, диверсия. Основными, наиболее вероятными ЧС, являются возникновение пожара.

Причинами пожара могут быть: перегрузка проводов, короткое замыкание, большие переходные сопротивления в электрических цепях, электрическая дуга, искрение и неисправности оборудования. К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара; системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или углекислотных огнетушителей, два ящика с песком 0,5 м³.

В качестве организационно-технических мероприятий выполняют инструктаж работающих по пожарной безопасности, разработку схемы действия администрации и работающих в случае пожара и организацию эвакуации людей.

Порядок действия в результате возникновения пожара и меры по ликвидации последствий: при обнаружении загорания рабочему немедленно необходимо сообщить по телефону 01 в пожарную охрану, сообщить руководителю, приступить к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения

пожара. Пострадавшим при пожаре необходимо обеспечить скорую медицинскую помощь.

Выводы по разделу «Социальная ответственность»

В главе социальной ответственности были рассмотрены условия работы с вакуумной установкой при напылении покрытий на основе Cr-Al-N_x, выделены опасные и вредные производственные факторы, а также существующие средства и методы защиты, описаны организационные и технические мероприятия, проводимые перед началом работы.

К опасным и вредным производственным факторам относятся повышенный уровень шума, недостаточная освещенность и повышенный уровень напряжения. Источником всех вышеперечисленных производственных факторов является установка магнетронного распыления. Обоснованы мероприятия по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя. Рассмотрены вопросы экологической безопасности и безопасности в чрезвычайных ситуациях. Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией является возникновение пожара вследствие короткого замыкания токоведущих частей. Разработан порядок действия в результате возникновения чрезвычайной ситуации и меры по ликвидации её последствий.

Грамотное соблюдение норм и правил, приведенных в нормативных документах, позволяет снизить воздействие вредных и опасных факторов на окружающую среду и организм человека при работе над научно-исследовательской работой.

Заключение

Основные выводы по научно-исследовательской части ВКР.

1. Основной поток энергии на поверхность растущего покрытия – поток энергии за счёт теплового излучения со стороны «горячей» хромовой мишени.

2. В режиме планетарного вращения подложки имеет место неравномерное поступление атомов хрома и алюминия на поверхность растущего покрытия, что может привести к формированию слоистой структуры с разным элементным и фазовым составом.

3. Разработанная методика для определения потоков металлических частиц при осаждении Cr-Al-N_x покрытий в режиме планетарного вращения корректно описывает результаты экспериментов.

4. Наибольшая твёрдость сформированных покрытий оказалась при мощности 0,6 кВт магнетрона с хромовой мишенью и 2 кВт на каждом магнетроне с алюминиевыми мишенями.

5. Наибольшая твердость покрытий (35 ГПа) достигнута при соотношении Cr:Al:N как 17,1 : 28,68 : 54,22 и обеспечении критерия $k_{ion} \approx 2,41$ ион/атом.

Таким образом, для обеспечения высокой твёрдости Cr-Al-N_x покрытий необходимо обеспечить нужный элементный состав и величину ионного тока, который будет уплотнять микроструктуру многослойного Cr-Al-N_x покрытия.

Список использованной литературы и источников

1. Holleck, H., Schier, V. Multilayer PVD coatings for wear protection // *Surface and Coatings Technology*. – 1995. – №76(77). – P.328–336.
2. Lee D.-B., Kim G.-Y., Lee J.-K. Oxidation of TiN and Ti(C,N) thin films deposited on titanium substrate // *Metals and Materials International*. – 2003. – №9(1), – P.43-46.
3. Lugscheider E., Bobzin K., Bärwulf S., Hornig, T. Oxidation characteristics and surface energy of chromium-based hardcoatings for use in semisolid forming tools // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – №133(134). – P.540-547.
4. Banakh O. High-temperature oxidation resistance of $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ thin films deposited by reactive magnetron sputtering // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – №163. – P.57–61.
5. Wuhrer R., Yeung W. Y. A comparative study of magnetron co-sputtered nanocrystalline titanium aluminium and chromium aluminium nitride coatings // *Scripta Materialia*. – 2004. – №50(12). – P.1461-1466.
6. Kimura A., Kawate M., Hasegawa H., Suzuki T. Anisotropic lattice expansion and shrinkage of hexagonal TiAlN and CrAlN films // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – №169(170). – P.367–370.
7. Hirai M., Ueno Y., Suzuki T., Jiang W., Grigoriu C., Yatsui K. Characteristics of $(\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}$ Films Prepared by Pulsed Laser Deposition // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2001. – №40(25). – P.1056.
8. Tillmann W., Diego Grisales, Stangier D., Butzke T. Tribomechanical Behaviour of TiAlN and CrAlN Coatings Deposited onto AISI H11 with Different Pre-Treatments // *Coatings*. – 2019. – №9(8). – P.519.
9. PalDey S., Deevi S. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N // *Materials Science and Engineering*. – 2003. – №346. – P.58–79.

10. Chen Z., Peng G., Chen P., Xia Y., Li G. Investigation of the tribological behavior of chromium aluminum silicon nitride coatings via both scratch sliding test and FEM simulation // AIP Advances. – 2019. – №9(2).
11. Khamseh S., Nose M., Kawabata T., Saiki A., Matsuda K., Terayama K., Ikeno S. Effect of Deposition Conditions on the Structure and Properties of CrAlN Films Prepared by Pulsed DC Reactive Sputtering in FTS Mode at High Al Content // Materials transactions. – 2008. – №49(9). – P.2082–2090.
12. Barshilia H. C., Selvakumar N., Deepthi B., Rajam K. S. A comparative study of reactive direct current magnetron sputtered CrAlN and CrN coatings // Surface and Coatings Technology. – 2006. – №201(6). – P.2193–2201.
13. Wagh S. S., Kulkarni A. P., Sargade V. G. Machinability Studies of Austenitic Stainless Steel (AISI 304) Using PVD Cathodic Arc Evaporation (CAE) System Deposited AlCrN/TiAlN Coated Carbide Inserts // Procedia Engineering, – 2013. – №64. – P.907–914.
14. Tang J.-F., Lin C.-Y., Yang F.-C., Chang C.-L. Influence of Nitrogen Content and Bias Voltage on Residual Stress and the Tribological and Mechanical Properties of CrAlN Films // Coatings. – №10(6). – 2020. –P.546.
15. Wen P., Zhang F., Chen Y., Guo S., Zhou, S., Ye, Y., Chen, H. Comparative study on tribological behavior of CrAlN coating in atmosphere, deionized water and 5 wt% NaCl solution // Surface Topography: Metrology and Properties. – 2019. – №7(4).
16. Khamseh, S., Nose, M., Kawabata, T., Nagae, T., Matsuda, K., & Ikeno, S. A comparative study of CrAlN films synthesized by dc and pulsed dc reactive magnetron facing target sputtering system with different pulse frequencies // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – №508(1). – P.191–195.
17. Zhu, M., Li, M., & Zhou, Y. Oxidation resistance of Cr_{1-x}Al_xN (0.18≤x≤0.47) coatings on K38G superalloy at 1000–1100°C in air // Surface and Coatings Technology. – 2006. – №201(6). – P.2878–2886.
18. Metel, A., Grigoriev, S., Volosova, M., Melnik, Y., Mustafaev, E. Synthesis of aluminum nitride coatings assisted by fast argon atoms in a magnetron

sputtering system with a separate input of argon and nitrogen // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – №398.

19. Strijckmans, K., Schelfhout, R., Depla, D. Tutorial: Hysteresis during the reactive magnetron sputtering process // *Journal of Applied Physics*. – 2018. – №124(24).

20. Berg, S., Blom, H., Larsson, T., & Nender, C. Modeling of reactive sputtering of compound materials // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. – 1987. – №5(2). – P.202–207.

21. Chunyan, Y., Linhai, T., Yinghui, W., Shebin, W., Tianbao, L., Bingshe, X. The effect of substrate bias voltages on impact resistance of CrAlN coatings deposited by modified ion beam enhanced magnetron sputtering // *Applied Surface Science*. – 2009. – №255(7), – P.4033–4038.

22. Paksunchai, C., & Chantharangsi, C. CrAlN film hardness uniformity affected by nitrogen content // *The second materials research society of thailand international conference*. – 2020.

23. Mehran, Q. M., Bushroa, A. R., Fazal, M. A. Evaluation of CrAlN multilayered coatings deposited by PVD magnetron sputtering // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2015. – №29(19). – P.2076–2089.

24. Wang, Y. X., Zhang, S., Lee, J.-W., Lew, W. S., Li, B. Influence of bias voltage on the hardness and toughness of CrAlN coatings via magnetron sputtering // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – №206(24). – P.5103–5107.

25. Khambun, A., Buranawong, A., Witit-Anun, N. Effect of Al Sputtering Current on Structure of CrAlN Thin Films Prepared by Reactive DC Magnetron Co-Sputtering // *Applied Mechanics and Materials*. – 2017. – №866. – P.322-325.

26. Aouadi, K., Nouveau, C., Besnard, A., Tlili, B., Montagne, A., Chafra, M. The Effect of Bilayer Periods and Their Thickness in Magnetron Sputtering Protective Multilayer Coatings for Tribological Applications // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2021. – №30(4). – P. 2526–2535.

27. Drnovšek, A., de Figueiredo, M. R., Vo, H., Xia, A., Vachhani, S. J., Kolozsvári, S., Franz, R. Correlating high temperature mechanical and tribological

properties of CrAlN and CrAlSiN hard coatings // Surface and Coatings Technology. –2019. – №372. – P. 361-368.

28. Sharmistha A., Shahid A., Barsha P., Rapaka S., Evaluation of structural and mechanical properties of CrAlN single layer coating deposited by reactive magnetron sputtering // Materials Chemistry and Physics. – 2022. – №292.

29. Bobzin K., Kalscheuer C., Carlet M., Tayyab M. Влияние содержания алюминия на ударную усталость покрытий системы CrAlN, нанесенных на инструментальную сталь методом сильноточного импульсного магнетронного распыления // Физ. мезомех. - 2021. - Т. 24. - №5. - С. 138-146.

30. G.A. Bleykher, A.O. Borduleva, V.P. Krivobokov, D.V. Sidelev. Evaporation factor in productivity increase of hot target magnetron sputtering systems // Vacuum. – 2016. – №132. – P.62–69.

31. V. A. Grudin, G. A. Bleykher, D. V. Sidelev, V. P. Krivobokov, M. Bestetti, A. Vincenzo, S. Franz. Chromium films deposition by hot target high power pulsed magnetron sputtering: Deposition conditions and film properties // Surface and Coatings Technology. – 2019. – №375. – P.352-362.

32. V.A. Grudin, G.A. Bleykher, D.V. Sidelev, Yu.N. Yuriev, A.D. Lomygin. Magnetron deposition of chromium nitride coatings using a hot chromium target: Influence of magnetron power on the deposition rate and elemental composition // Surface and Coatings Technology. – 2022. № 433. - article number 128120.

33. D.V. Sidelev, G.A. Bleykher, M. Bestetti, V.P. Krivobokov, A. Vincenzo, S. Franz, M.F. Brunella. A comparative study on the properties of chromium coatings deposited by magnetron sputtering with hot and cooled target // Vacuum. – 2017. – № 143. – P.479-485.

34. Ю. В. Левинский Диаграммы состояния металлов с газами: научное издание / М.: Metallurgy, 1975.

35. Программа Elcut [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elcut.ru/>.

36. Matthew J. Goeckner, John A. Goree, and Terrence E. Sheridan, Jr, Monte Carlo Simulation of Ions in a Magnetron Plasma // IEEE transactions on plasma science. – 1991. – №19(2). – P.301-308.
37. Программа Srim.org [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.srim.org>;
38. Технология тонких пленок: справочник. Т.1 / Л. Майссел, Р.Глэнг. – М.: Сов. радио, 1977.
39. J. Lin, J. J. Moore, W. D. Sproul, B. Mishra, Z. Wu. Modulated pulse power sputtered chromium coatings // Thin Solid Films. – 2009. – № 518. – P. 1566-1570.
40. F.Ferreira, R. Serra, J.C. Oliveira, A. Cavaleiro. Effect of peak target power on the properties of Cr thin films sputtered by HiPIMS in deep oscillation magnetron sputtering (DOMS) mode // Surface and Coatings Technology. – 2014. – № 258. – P. 249-256.
41. ГОСТ Р 12.1.019- 2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
42. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года).
43. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Минздрав России. – Москва. – 1997.
44. ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
45. СанПин 23-05-95 Естественное и искусственное освещение.
46. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
47. ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».

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

49. ГОСТ12.1.002-84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. Издательство стандартов. – Москва. – 1984.

50. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов».

51. ГОСТ 12.1.007-99 «Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности».

Приложение А

(Справочное)

Protective films based on metal nitrides using vacuum-plasma methods

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ11	Агатанова А.А.		

Консультант НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	д.ф-м.н, доцент		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОИЯ	Матвеев И.А.	д.фил.наук		

Contents

1. Features of the formation of protective coatings based on metal nitrides using vacuum-plasma methods	116
1.1 The properties of solid coatings based on metal nitride	117
1.2 Properties and methods of obtaining CrAlN coatings	118
References	126

Features of the formation of protective coatings based on metal nitrides using vacuum-plasma methods

Physical Vapor Deposition (PVD) technique has collected a lot of variants and enhancements in the last decades, trying to improve the coatings characteristics and the deposition rate. Nowadays the production of high-quality thin-film layers of various alloys, metals, semiconductors and dielectrics is one of the most pressing issues of material manufacturing technology. One of the main goals in the development of technologies based on modification of the surface properties of materials and products is to increase the deposition performance of coatings from metals, alloys, dielectrics and semiconductors of high quality. In science and industries, magnetron sputtering systems are widely used for the deposition of films and coatings on the surface of various materials. The demand and promising nature of this method is due to a good quality of coatings obtained.

Carbides, nitrides, metal oxides attract special attention of experts engaged in modifying the surface of cutting tools. This section presents the results of the analysis of the study of the method of obtaining protective coatings based on metal nitrides.

There are a number of research papers [1-6], which methods of applying protective coatings using vacuum – plasma methods are disclosed. High hardness, abrasive ability, refractory, ductility at elevated temperatures causes great interest in coatings based on metal nitride as protective coatings.

Transition metal nitrides are widely used as hard protective coatings due to their high hardness, good wear resistance and corrosion resistance [1].

An extensive body of literature exists on the magnetron sputtering of chromium nitride. This topic is very relevant at the moment in the field of the coating technology.

In magnetron sputtering, the main disadvantage is the deposition rate. In order to describe this problem, the research paper considers how the deposition rate can be increased due to the occurrence of sublimation on the target surface. In this regard, the purpose of this study is to identify patterns of particle and energy input to the

substrate, as well as an increase in the deposition rate of chromium nitride coatings during operation of a magnetron sputtering system with a hot target in the atmosphere of argon and nitrogen.

1.1 The properties of solid coatings based on metal nitride

One of the effective methods of increasing the efficiency of the cutting tool is the application of protective coatings on the contact pads. Among the common methods of deposition of coatings, the methods of physical deposition have received the greatest development, in particular, the method of condensation of matter in vacuum with ion bombardment of the surface. As a coating material, the use of metal nitrides is explained by a high value of hardness, wear resistance, and thermal stability.

It should be noted that depending on the mode and conditions of deposition, the same coating can have a wide range of physical and mechanical properties. Coatings applied to cutting tools lead to the expected increase in physical and mechanical properties, including

Based on the analysis of foreign literature sources, it was revealed that multielement coatings have a sufficiently high resistance to destruction during operation, due to the fact that such coatings include alternating thin layers of variable hardness and inhibit the development of cracks; low elastic modulus of the coating makes it possible to reduce the residual stress in the coatings at the coating-substrate interface, which accordingly it will affect the adhesion of the coating.

Numerous studies are aimed specifically at the tribological characteristics of TiAlN and CrAlN coatings [7-9], which are the most promising in various fields of industrial applications, namely as protective coatings for cutting tools. Nevertheless, the results of the work depend on the material and the properties of the substrate, the deposition method, deposition parameters and tribological tests.

Also, in [10-15], the authors suggest that by adding an additional chemical element (Al, B, Ti, W, Si, etc.) to metal nitrides, it is possible to improve mechanical,

anticorrosive and thermal properties, namely, to increase the hardness of the coating and resistance to high temperatures. Aluminum is the most promising candidate, since aluminum is characterized by high resistance to abrasive wear and improved resistance to oxidation. For example, the article [16] presents the results of the mechanism of coating wear in various media and describes in detail the results of a study that the introduction of Al to a chromium nitride coating can replace some positions of the chromium atom to form a new AlN phase during deposition, which in turn significantly increases the wear resistance of the coating.

1.2 Properties and methods of obtaining CrAlN coatings

According to the results of numerous studies, the investigation and production of multilayer CrAlN coatings do not lose its relevance, because such coatings show the best mechanical properties, resistance to oxidation and corrosion. CrAlN coatings are applied by various PVD methods: magnetron sputtering [2, 17], cathode-arc evaporation [5] and pulsed laser spraying [6]. It is important to note that high hardness values (26-38 GPa) and oxidation resistance are shown by coatings in which the elemental composition is represented as Cr – 12 at.%, Al– 36 at.%, N – 51 at.%, CrN – 30 at.%, AlN -70 at.%. [18, 19]

In this paper, the preparation of multilayer CrAlN coatings by magnetron sputtering is investigated. The magnetron sputtering method is currently the most widely used method of physical deposition. In the magnetron sputtering method, the target is bombarded by ions generated in plasma, which leads to the release of energetic atoms that are capable of forming a film dense in structure. Coatings obtained using magnetron spray systems make it possible to obtain coatings with high functional properties, high hardness with an optimal choice of operating parameters: operating pressure in the chamber, discharge power. However, one of the main disadvantages of the method using magnetron sputtering systems in a reactive gas environment is the low deposition rate due to poisoning of the magnetron target

surface with reactive gas. The low deposition rate during magnetron sputtering is associated with the sputtering process.

A large number of inert gas ions, argon, formed in plasma and bombarding the target surface increases the sputtering rate. However, the increased pressure in the vacuum chamber means a higher gas density, causing more scattering of atoms of the target material on the way to the substrate. When a reactive gas is added to an inert gas, the deposition rate of the coating decreases. This is due to the formation of a metal compound on the target surface, since the sputtering rate (sputtering coefficient) of chemical compounds is lower than the sputtering rate of any pure metal. A significant number of papers have been devoted to this problem [20-22].

The interaction of the reactive gas with the magnetron target surface is explained by two processes: chemisorption and ion implantation.

During chemisorption on the surface of a metal target, due to the adsorption of reactive gas particles and chemical compounds with target atoms, the formation of a thin layer of reactive gas chemical compounds with magnetron target material is possible. Ion implantation can also affect the process of reactive sputtering by introducing reactive gas ions into the magnetron target and, as a result, reduce the sputtering coefficient. This effect is observed at low chemical activity of the reactive gas with the target material. It is known from scientific literature that during ion implantation, the effect on the sputtering coefficient, respectively, and on the sputtering rate, is due to the presence of a certain number of reactive gas atoms inside the crystal lattice of the target material of the MSS.

The development of thin films is complicated by the mechanism of their deposition. One of the current difficulties is that multiple deposition parameters operate simultaneously in each deposition process.

In order to minimize poisoning of the target surface, it is necessary to study in detail the complexities of reactive magnetron sputtering.

During reactive spraying, the formation of a thin chemical compound on the surface of a metal target is observed in three stages:

1. The stage of target synthesis is observed when a mixed flow of ions and atoms enters the surface of the target, forming a chemical compound of active ions, excited atoms with atoms of the target material.

2. At the stage of flight synthesis, the formation of a chemical bond of atomized particles with active plasma particles and atoms of a working, inert gas is possible. The probability of interaction of atomized atoms with plasma particles with the formation of chemical compounds is determined by the binding energy, the effective cross-section of the interaction, the configuration of the process, plasma density, pressure and the target -substrate distance.

3. The stage of synthesis of a compound on a substrate is observed when atoms on the surface of the substrate condense, actively interacting with each other, with surface atoms and reactive gas atoms.

Table 1- «Summary of published research works on the application of CrAlN coatings» published articles on the application of CrAlN coatings by magnetron sputtering. These works are selected for the analysis of the results under various conditions of coating and experimental installations. Each line contains information about one specific article. The note presents the purpose of the study of each work. This overview allows you to get acquainted with the results of coating under different deposition conditions and to assess the relationship between deposition parameters and results. The hardness value of the applied coatings is observed in the range of 10.4 – 46 GPa.

The analysis of scientific works of domestic and foreign authors on the study of the properties of CrAlN coatings allows us to formulate that the hardness values of these coatings vary between 11 GPa – 46 GPa.

Studies on the properties of Cr-Al-N coatings have shown that these coatings can protect the substrate from oxidation at a steam temperature of 1000°C and delay the oxidation process for more than 15 minutes at a steam temperature of 1200°C.

The authors of work [23] demonstrated the results of studying the oxidation behavior of the CrAlN coating. In this article, the kinetics of oxidation of a coating with different aluminum content and an uncoated substrate were studied. According

to the results of the study, compared with the uncoated substrate, coated substrates have a much lower oxidation rate at a temperature of 1000-1100°C for 2 hours. Also, with an increase in the aluminum content in the coatings, the oxidation rate decreases. The protective coating of aluminum and chromium significantly suppresses the diffusion of oxygen.

According to literature data, high density is important for increasing the wear resistance of the coating. Aluminum alloying can replace some positions of chromium atoms, as a result of precipitation, a new phase of aluminum nitride are formed, which favorably affects the increase in the wear resistance of the coating.

The work on applying CrAlN coatings on different substrates and at different application parameters was analyzed. The data from the table can serve as a guide for the work on applying the CrAlN film. Analyzing the data from the table, the roles and ranges of deposition parameters were discussed.

The temperature of the substrate during deposition significantly affects the kinetic energy. However, after reaching the optimal substrate temperature, the thermal stress in the film increases.

The coating properties depend on the substrate material and application parameters. Thus, choosing the most suitable combination of application parameters, it is possible to obtain high-quality coatings for use in metal-cutting tools.

Year of publication [reference]	Substrate	W (W)	Q (W/cm ²)	Target configuration	d, mm	p (Pa)	Q(Ar) (sccm)	Q(N ₂) (sccm)	U _{bias} (V)	h (μm)	t (min)	v (nm/s)	H (GPa)	Cr (ar.%)	Al (ar.%)	N (ar.%)	Note
2008 [24]	SteelAI SIH13, Si	Al -3600 Cr - 2400	-	Cr (99.99%) – 2pc Al (99.99%) – 2pc	-	0,28 - 0,35	-	-	0 -80 - 120	5,07 4,92 4,85	-	-	16,5 19,8 28,6	18,05 19,04 18,13	11,20 12,13 13,12	70,75 19,8 28,6	The effect of negative bias voltage on the physical and mechanical properties of the coating.
2020 [25]	SteelSU S304, glass, Si	-	-	Cr (99.95%) – 1 pc Al (99.999%) – 1 pc	130	0,46 -0,5	4	2 3	-	1,08 0,514	60	0,3 0,412	26,65 42,06	38,29 31,82	19,76 10,24	41,95 57,93	Effect of N ₂ content on the microstructure of coatings
2015 [26]	Al-Si	Cr – 350 Al – 200	-	Cr (99.99%) – 1 pc Al (99.99%) – 1 pc	150	0,59	20		-	2,79	180	0,258 3	42	71	24	5	Investigation of the physical and mechanical properties of the coating.
2012 [27]	Si	-	Cr – 2,2 Al – 3,3	Cr (99.99%) – 1 pc Al (99.99%) – 1 pc	150	0,4	40	20	-50 - 160 - 210 - 260	1	-	-	10,4 12,7 20,4 25,8	27,9 18,5 28,9 24,8	16,8 17,4 17,2 17,1	54,4 52,7 53,1 57,4	The effect of negative bias voltage on the mechanical properties of coatings.
2017 [28]	Si	-	-	Cr (99.95%) – 1 pc Al (99.95%) – 1 pc	-	0,5	10	2	-	3,47 5,47 1,047	60	0,96 1,52 0,3	36 45 46	34,48 28,49 17,81	10,78 30,28 54,19	54,74 41,23 28	Influence of electrical parameters on the microstructure of coatings

2021 [29]	SteelX5 0CrMo V8-1, Si	Cr - 1500 Al - 1000	-	Cr (99.95%) – 1 pc Al (99.95%) – 1 pc	-	0,5	68,8	33,3	- 500	1,94 1,90 2,11 2,05 2,04	-	-	35 37 40 39 43	41,9	7,1	46,4	The effect of the thickness of the multilayer coating on the microstructure, mechanical and tribological properties of coatings.
2019 [30]	SteelHS S, DIN1.33 43,AISI M2, MgO, Si	6000	-	CrAl (50:50) – 4 pc	-	0,62	230	143	-60	4,4	110	0,66	34	23,9	25,1	51	Investigation of mechanical and tribological properties of coatings at high temperatures.
2022 [9]	Steel, Si	120	-	CrAl (50:50) – 1 pc	80	0,41	20	2 6	-	0,6	30	0,3	11,48 22,96	32,6 21,4	25,4 20,9	39 42,3	The effect of the Ar/N ₂ ratio on the microstructure and mechanical properties of coatings.
2021 [7]	SteelHS 6-5-2C	3000 5000	6,8 11,36	1.CrAl20 – 6 pc 2.CrAl20 – 3 pc AlCr30 – 3 pc 3.CrAl20 – 2 pc AlCr30 – 3 pc	60	0,62	200	-	- 100	1,6 1,7 1,7	-	0,472 0,416 0,361	43 35 31	5 12 16	52 53 53	20,9 22,5 26,7	The effect of Al content on the elastic-plastic properties of coatings.

				AlCr20 – 1 pc													
2020 [8]	Steel SUS304 , HSS:AI SIM2, Si	3000	12.4	Cr (99,99%) – 1 pc CrAl (50:50) – 1 pc	150	0.4	-	-	-30 -60 -90 - 120 - 150	0.97 2.86	40	0.4 1.19	24.1 29.3 30.1 35.4 34.1	21.7 22.2 21 21.7 21.1	54.1 53.1 52.9 52.4 52.7	24.1 29.3 30.1 35.4 34.1	The effect of negative bias voltage and N ₂ content on the mechanical properties and microstructure of coatings.
<p>W – magnetron power, Q – magnetron power density, d – «target-substrate» distance, p – working pressure in the chamber, Q(Ar), Q(N₂) – intake of argon and nitrogen into the chamber, U_{bias} – negative bias voltage, h – coating thickness, t – coating deposition time, v – deposition rate, H – hardness of coatings.</p>																	

The physical and mechanical properties of the coating are affected by the deposition conditions, in particular, the power of the magnetron, the intake of inert and reactive gases, negative bias voltage, thickness, deposition rate, microstructure of coatings.

The analysis of the authors' scientific papers on the application of CrAlN coatings allows us to conclude that:

1. Negative bias stress can increase the hardness of the coating, improving the density of the microstructure with a reduced grain size, but also, an increase in the bias stress can contribute to the development of internal residual stresses and develop defects. The most optimal value of U_{bias} is ≈ 100 V, at which hardness values are considered in the range of 30 – 43 GPa.

2. High deposition rate affects the microstructure of the coating, respectively, and the hardness. At high deposition rates, the coatings may have a looser structure, which reduces the hardness readings. According to the literature review (Table 1) high hardness values are obtained at lower deposition rates. The maximum hardness (31-46 GPa) was achieved at a deposition rate of ≈ 0.3 nm/s.

3. CrAlN coatings with a high hardness value are obtained at different ratios of elemental composition. High values of hardness and other mechanical properties are obtained with an optimal ratio of $N_{\text{Al}}/N_{\text{Cr}} \sim 0.3-1$.

References

1. Lee D.-B., Kim G.-Y., Lee J.-K. Oxidation of TiN and Ti(C,N) thin films deposited on titanium substrate // *Metals and Materials International*. – 2003. – №9(1), – P.43-46.
2. Lugscheider E., Bobzin K., Bärwulf S., Hornig, T. Oxidation characteristics and surface energy of chromium-based hardcoatings for use in semisolid forming tools // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – P.540-547.
3. Banakh O. High-temperature oxidation resistance of $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ thin films deposited by reactive magnetron sputtering // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – P.57–61.
4. Wuhrer R., Yeung W. Y. A comparative study of magnetron co-sputtered nanocrystalline titanium aluminium and chromium aluminium nitride coatings // *Scripta Materialia*. – 2004. – №50(12).
5. Kimura A., Kawate M., Hasegawa H., Suzuki T. Anisotropic lattice expansion and shrinkage of hexagonal TiAlN and CrAlN films // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. –P.367–370.
6. Hirai M., Ueno Y., Suzuki T., Jiang W., Grigoriu C., Yatsui K. Characteristics of $(\text{Cr}_{1-x}, \text{Al}_x)\text{N}$ Films Prepared by Pulsed Laser Deposition // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2001.
7. Tillmann W., Diego Grisales, Stangier D., Butzke T. Tribomechanical Behaviour of TiAlN and CrAlN Coatings Deposited onto AISI H11 with Different Pre-Treatments // *Coatings*. – 2019. – №9(8).
8. PalDey S., Deevi S. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N // *Materials Science and Engineering*. – 2003, – P.58–79.
9. Chen Z., Peng G., Chen P., Xia Y., Li G. Investigation of the tribological behavior of chromium aluminum silicon nitride coatings via both scratch sliding test and FEM simulation // *AIP Advances*. – 2019. – №9(2).

10. Khamseh S., Nose M., Kawabata T., Saiki A., Matsuda K., Terayama K., Ikeno S. Effect of Deposition Conditions on the Structure and Properties of CrAlN Films Prepared by Pulsed DC Reactive Sputtering in FTS Mode at High Al Content // *Materials transactions*. – 2008. – №49(9). – P.2082–2090.
11. Barshilia H. C., Selvakumar N., Deepthi B., Rajam K. S. A comparative study of reactive direct current magnetron sputtered CrAlN and CrN coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – №201(6). – P.2193–2201.
12. Wagh S. S., Kulkarni A. P., Sargade V. G. Machinability Studies of Austenitic Stainless Steel (AISI 304) Using PVD Cathodic Arc Evaporation (CAE) System Deposited AlCrN/TiAlN Coated Carbide Inserts // *Procedia Engineering*, – 2013. – P.907–914.
13. Tang J.-F., Lin C.-Y., Yang F.-C., Chang C.-L. Influence of Nitrogen Content and Bias Voltage on Residual Stress and the Tribological and Mechanical Properties of CrAlN Films // *Coatings*. – 2020. –P.546.
14. Wen P., Zhang F., Chen Y., Guo S., Zhou, S., Ye, Y., Chen, H. Comparative study on tribological behavior of CrAlN coating in atmosphere, deionized water and 5 wt% NaCl solution // *Surface Topography: Metrology and Properties*. – 2019. – №7(4).
15. Khamseh, S., Nose, M., Kawabata, T., Nagae, T., Matsuda, K., & Ikeno, S. A comparative study of CrAlN films synthesized by dc and pulsed dc reactive magnetron facing target sputtering system with different pulse frequencies // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2010. – 508(1). – P.191–195.
16. Zhu, M., Li, M., & Zhou, Y. Oxidation resistance of Cr_{1-x}Al_xN (0.18≤x≤0.47) coatings on K38G superalloy at 1000–1100°C in air // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – 201(6). – P.2878–2886.
17. Metel, A., Grigoriev, S., Volosova, M., Melnik, Y., Mustafaev, E. Synthesis of aluminum nitride coatings assisted by fast argon atoms in a magnetron sputtering system with a separate input of argon and nitrogen // *Surface and Coatings Technology*. – 2020.

18. Strijckmans, K., Schelfhout, R., Depla, D. Tutorial: Hysteresis during the reactive magnetron sputtering process // *Journal of Applied Physics*. – 2018. – №124(24).
19. Berg, S., Blom, H., Larsson, T., & Nender, C. Modeling of reactive sputtering of compound materials // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. – 1987. – 5(2). – P.202–207.
20. Chunyan, Y., Linhai, T., Yinghui, W., Shebin, W., Tianbao, L., Bingshe, X. The effect of substrate bias voltages on impact resistance of CrAlN coatings deposited by modified ion beam enhanced magnetron sputtering // *Applied Surface Science*. – 2009. – №255(7), – P.4033–4038.
21. Paksunchai, C., & Chantharangsi, C. CrAlN film hardness uniformity affected by nitrogen content // *The second materials research society of thailand international conference*. – 2020.
22. Mehran, Q. M., Bushroa, A. R., Fazal, M. A. Evaluation of CrAlN multilayered coatings deposited by PVD magnetron sputtering // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2015. – 29(19). – P.2076–2089.
23. Wang, Y. X., Zhang, S., Lee, J.-W., Lew, W. S., Li, B. Influence of bias voltage on the hardness and toughness of CrAlN coatings via magnetron sputtering // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – 206(24). – P.5103–5107.
24. Khambun, A., Buranawong, A., Witit-Anun, N. Effect of Al Sputtering Current on Structure of CrAlN Thin Films Prepared by Reactive DC Magnetron Co-Sputtering // *Applied Mechanics and Materials*. – 2017. – 866. – P.322-325.
25. Aouadi, K., Nouveau, C., Besnard, A., Tlili, B., Montagne, A., Chafra, M. The Effect of Bilayer Periods and Their Thickness in Magnetron Sputtering Protective Multilayer Coatings for Tribological Applications // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2021. – 30(4). – P. 2526–2535.
26. Drnovšek, A., de Figueiredo, M. R., Vo, H., Xia, A., Vachhani, S. J., Kolozsvári, S., Franz, R. Correlating high temperature mechanical and tribological

properties of CrAlN and CrAlSiN hard coatings // Surface and Coatings Technology. –2019.

27. Sharmistha A., Shahid A., Barsha P., Rapaka S., Evaluation of structural and mechanical properties of CrAlN single layer coating deposited by reactive magnetron sputtering // Materials Chemistry and Physics. –2022. –292.

28. Bobzin K., Kalscheuer C., Carlet M., Tayyab M. Влияние содержания алюминия на ударную усталость покрытий системы CrAlN, нанесенных на инструментальную сталь методом сильноточного импульсного магнетронного распыления // Физ. мезомех. - 2021. - Т. 24. - № 5. - С. 138-146.

29. Graillet-Vuilecot, R., Anne-Lise, T., Lecas, T., Cachoncinlle, C., Millon, E., Caillard, A. Hot target magnetron sputtering process: Effect of infrared radiation on the deposition of titanium and titanium oxide thin films // Vacuum. – 2020.

30. Holleck, H., Schier, V. Multilayer PVD coatings for wear protection // Surface and Coatings Technology. – 1995. – 76-77. – P.328–336.