

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 16.04.01 Техническая физика  
 Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Напыление плёнок из карбида титана с помощью дуальной магнетронной распылительной системы</b>

УДК 621.385.64:539.216.2:621.793.7:669.295

#### Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ91	Гусс Людмила Евгеньевна		

#### Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ ТПУ	Сиделёв Д.В.	К.Т.Н.		

#### Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лаб. НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ ТПУ	Юрьев Ю.Н.	К.Т.Н.		

#### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Трубченко Т.Г.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООТД ШБИП ТПУ	Антоневич О.А.	К.б.Н.		

#### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ ТПУ	Сиделёв Д.В.	К.Т.Н.		

<b>Код компетенции</b>	<b>Наименование компетенции</b>
УК(У)-1	Способность осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способность управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способность организовывать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способность применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способность анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способность определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы её совершенствования на основе самооценки
ОПК(У)-1	Способность к профессиональной эксплуатации современного научного и технологического оборудования и приборов, предназначенных для использования в области технической физики
ОПК(У)-2	Способность демонстрировать и использовать углублённые теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, в том числе из области технической физики
ОПК(У)-3	Готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
ОПК(У)-4	Готовность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности в области технической физики
ОПК(У)-5	Способность осуществлять научный поиск и разработку новых перспективных подходов и методов к решению профессиональных задач, готовность к профессиональному росту, к активному участию в научной деятельности, конференциях, выставках и презентациях
ПК(У)-1	Способность критически анализировать современные проблемы технической физики, ставить задачи и разрабатывать программу исследования, выбирать

<b>Код компетенции</b>	<b>Наименование компетенции</b>
	адекватные способы и методы решения экспериментальных и теоретических задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты
ПК(У)-2	Способность самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для оптимизации параметров объектов и процессов с использованием стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств
ПК(У)-3	Готовность осваивать и применять современные физико-математические методы для решения профессиональных задач в области технической физики, составлять практические рекомендации по использованию полученных результатов
ПК(У)-4	Способность представлять результаты исследования в формах отчётов, рефератов, публикаций и презентаций
ПК(У)-5	Готовность принимать непосредственное участие в учебной и учебно-методической работе по направлению «Техническая физика», участвовать в разработке программ учебных дисциплин и курсов
ПК(У)-6	Способность проводить учебные занятия, лабораторные работы, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся
ПК(У)-7	Способность применять и разрабатывать новые образовательные технологии
ПК(У)-8	Способность разрабатывать и оптимизировать современные наукоёмкие технологии в областях технической физики, связанных с применением пучковых и плазменных технологий, с учетом экономических и экологических требований
ПК(У)-9	Способность разрабатывать, проводить наладку и испытания, эксплуатировать наукоёмкое технологическое и аналитическое оборудование
ПК(У)-10	Готовность решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки (специальность) 16.04.01 Техническая физика  
 Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

<b>Магистерской диссертации</b> (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)
---

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ91	Гусс Людмиле Евгеньевне

Тема работы:

<b>Напыление плёнок из карбида титана с помощью дуальной магнетронной распылительной системы</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p style="text-align: center;"><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования служит покрытие карбида титана, а предметом исследования являются параметры и свойства образца.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования,</i></p>	<p>Анализ литературных источников по методам получения износостойкого покрытия карбида титана и способам их применения; исследование полученных образцов после их получения;</p>

<p>конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<p>Определение свойств полученных покрытий; определение оптимальных режимов осаждения; раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»; раздел «Социальная ответственность».</p>
<p><b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Титульный лист.</li> <li>2. Abstract.</li> <li>3. Актуальность работы.</li> <li>4. Требования к технологии.</li> <li>5. Цель работы.</li> <li>6. Экспериментальное оборудование.</li> <li>7. Параметры осаждения.</li> <li>8. Скорость осаждения покрытий.</li> <li>9. Фазовый состав.</li> <li>10. Твёрдость и модуль упругости.</li> <li>11. Трибологические характеристики покрытия.</li> <li>12. Морфология поверхности.</li> <li>13. Научное положение.</li> <li>14. Оптимальные режимы травления.</li> <li>15. Заключение.</li> </ol>

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Трубченко Татьяна Григорьевна
«Социальная ответственность»	Антоневич Ольга Алексеевна
«Раздел на английском языке»	Зеремская Юлия Александровна

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

1. Износостойкое покрытие TiC
2. Свойства и применение пленок на основе TiC
3. Методы получения пленок TiC

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лаб. НОЦ Б.П.Вейнберга	Юрьев Ю.Н.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ91	Гусс Л.Е.		

## РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ91	Гусс Людмила Евгеньевна

Школа		Отделение (НОЦ)	
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	16.04.01 «Техническая физика»

Тема ВКР:

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объект исследования: Износостойкие покрытия TiC. Методика: осаждение плёнок TiC с помощью дуальной магнетронной распылительной системы. Место проведения исследований: НОЦ Б.П. Вейнберга, лаборатория 101. Область применения: сверла, пилы, плунжера насосов и шлифовально-абразивного инструмента. Рабочая зона: вакуумная установка для осаждения покрытий.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <p style="padding-left: 40px;">– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</p> <p style="padding-left: 40px;">– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>	<p>ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования; ГОСТ Р ИСО 6385-2016. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем.</p>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>– Электромагнитное излучение;</li> <li>– Повышенный уровень шума;</li> <li>– Отклонение показателей микроклимата;</li> <li>– Фактор, обладающий свойствами химического воздействия на организм.</li> </ul> <p>Опасные факторы:</p>

	–Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Атмосфера: – Выброс отработанного газа.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможные ЧС: – Возникновение пожара, при вышедшем из-под контроля процессе горения.

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич О.А.	к.б.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ91	Гусс Людмила Евгеньевна		

## РЕФЕРАТ

**Выпускная квалификационная работа** 119 с., 28 рис., 20 табл., 39 источников, 1 приложение на английском языке.

**Ключевые слова:** осаждение, дуальная магнетронная распылительная система (ДМРС), карбид титана, износостойкое покрытие, функциональные свойства, структурные свойства.

**Объектом исследования являются** плёнки карбида титана.

**Цель работы** – Исследование влияния мощности магнетрона на структурные и функциональные свойства карбида титана.

В процессе исследования были получены данные о влиянии мощности магнетрона на структурные и функциональные свойства карбида титана. Были определены оптимальные режимы для получения карбида титана с составом, наиболее близким к стехиометрическому.

В ходе работы была изучена технология напыления износостойких покрытий на основе TiC методом дуального магнетронного распыления.

Было установлено, что с увеличением мощности на катоде Ti, скорость осаждения возрастала и возрастали толщины покрытия в каждом из образцов.

Из результатов измерения фазового состава было замечено, что с увеличением мощности на катоде Ti, количество фаз TiC заметно увеличивается с 30 до 97 процентов.

Были определены оптимальные условия осаждения, при которых значения твёрдости и модуля упругости были максимальны, а коэффициента трения и износа – минимальны.

**Область применения:** свёрла, пилы, плунжера насосов, покрытия высокоскоростных буров, и шлифовально-абразивного инструмента.



## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	12
1 износостойкое покрытие TiC .....	15
1.1 Свойства и применение пленок на основе TiC .....	15
1.2 Методы получения пленок TiC .....	16
1.2.1 Химическое осаждение.....	17
1.2.2 Реактивное распыление .....	20
1.2.3 Вакуумно-дуговое испарение .....	22
1.2.4 Принцип работы магнетронного распыления.....	26
1.2.5 Высокочастотное магнетронное распыление.....	29
1.2.6 Принцип работы дуальной магнетронной системы .....	32
2 Экспериментальное оборудование.....	36
2.1 Схема вакуумной установки.....	36
2.2 Полировально-шлифовальные машины .....	37
2.3 Измерение толщины покрытий.....	38
2.4 Рентгеноструктурный анализ (X-Ray Diffraction) .....	40
2.5 Измерение физико-механических характеристик .....	41
2.6 Измерение трибологических характеристик.....	43
3 Осаждение плёнок карбида титана.....	45
3.1 Методика эксперимента .....	46
3.2 Скорость осаждения покрытий.....	48
3.3 Определение фазового состава .....	50
3.4 Твёрдость и модуль упругости .....	51
3.5 Трибологические характеристики покрытия .....	53

3.6 Морфология поверхности .....	55
Выводы .....	57
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И РЕСУРСООЭФФЕКТИВНОСТЬ.....	58
4.1 Анализ потенциальных потребителей и конкурентных технических решений .....	58
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	58
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	59
4.2 SWOT-анализ.....	61
4.2 Инициация проекта .....	63
4.3 Планирование управления научно-техническим проектом.....	65
4.4 Бюджет научного исследования .....	67
4.4.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты.....	68
4.4.2 Контрагентные расходы .....	68
4.4.3 Расчет амортизационных расходов .....	69
4.5 Основная заработная плата .....	69
4.6 Отчисления на социальные нужды .....	72
4.7 Накладные расходы.....	72
4.8 Реестр рисков проекта .....	75
4.9 Оценка сравнительной эффективности исследования .....	75
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	80
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	80
5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства .....	80

5.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	81
5.3 Производственная безопасность.....	83
5.4 Анализ опасных и вредных производственных факторов .....	84
5.4.1 Отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении.....	84
5.4.2 Отсутствие естественного света .....	86
5.4.3 Расчёт светильников и их размещение .....	86
5.4.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения.....	89
5.4.5 Повышенный уровень шума .....	90
5.4.6 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека .....	91
5.5 Экологическая безопасность.....	93
5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	95
Заключение по разделу «Социальная ответственность» .....	99
Список используемой литературы .....	100
<b>Приложение А</b> .....	<b>104</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Большинство отказов машин вызвано не переломами, а износом и повреждением поверхностей трения в динамических соединениях. В настоящее время существует множество передовых методов улучшения качества поверхности, таких как цементация, азотирование и нитроцементация. В общем, чем тверже материал, тем больше хрупкость. Исследователи пытаются найти идеальный материал, который обладает как высокой твердостью, так и высокой термической и изгибной прочностью. Методы обработки, такие как фрезерование, токарная обработка, электроэрозионная обработка и гальваника, изменяют структуру и физико-механические характеристики поверхностных слоев. В последнее время технологии модификации поверхности быстро развиваются и применяются для создания твердой поверхности, сохраняя при этом гибкость подложки. Одним из таких методов является нанесение покрытия на поверхность с высокой твердостью и малым коэффициентом истирания на материалы с высокой прочностью на изгиб.

Рынок режущего инструмента России интенсивно заполняется продукцией ведущих инструментальных фирм, предлагающих различные марки инструментальных материалов, которые отличаются, в том числе, различными износостойкими покрытиями.

Покрытие, нанесенное на инструмент должно обеспечивать хорошую твердость и стойкость, для того чтобы в течение длительного времени сохранять его режущие свойства. Покрывать можно инструмент любой геометрической сложности.

В настоящее время примерно 75% в мире режущего инструмента изготавливается из твердого сплава, так как материал режущей части инструмента, как правило, очень хрупкий [1].

Изобретение относится к составам и способам получения износостойких покрытий для защиты от изнашивания и может быть использовано в парах трения в машиностроении, металлообработке и нефтедобыче.

Нанесение покрытий может существенно повысить надежность и работоспособность изделий, что повсеместно практикуется на сегодняшний день. Износ изделий, работающих в условиях трения, является многопараметрической характеристикой, которая определяется видом изнашивания (механическое, молекулярно-механическое, коррозионно-механическое и др.); видом трения, реализующимся в паре (трение качения, скольжения и т.д.); наличием в зоне контакта трущихся деталей абразивных частиц; термическими условиями трения и прикладываемой нагрузкой (как ее величиной, так и условиями приложения - будет ли она постоянна или знакопеременна). С учетом этого факта появляется потребность создания таких защитных покрытий, которые будут обладать спектром свойств, позволяющим им эффективно работать в меняющихся условиях внешнего воздействия, меняя свои характеристики, то есть проявляя возможность адаптации.

В связи с этим **цель** данной работы заключается в получении исследовании влияния мощности магнетрона на структурные и функциональные свойства карбида титана.

**Задачи** на ВКР:

1. Получение износостойкого покрытия TiC методом магнетронного распыления с использованием отдельных катодов Ti и C;
2. Измерение толщины получаемого слоя;
3. Определение твердости и модуля упругости;
4. Определение фазового состава;
5. Определение коэффициента трения и износа;
6. Определение морфологии поверхности.

**Объект исследования** – процесс осаждения износостойкого покрытия – карбида титана, а **предмет исследования** – влияние мощности магнетрона на структурные и функциональные свойства карбида титана.

**Практическая значимость работы.**

1. Показано, что дуальная магнетронная распылительная система, является хорошим альтернативным решением для осаждения износостойкого покрытия карбида титана.

2. Выявлено, что с увеличением мощности на титановой мишени, увеличиваются значения твёрдости и модуля упругости и уменьшаются значения коэффициента трения и износа.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

Соотношение мощностей разряда на мишенях С и Ti оказывают значительное влияние на свойства покрытий из карбида титана. Наибольшими значениями твёрдости (25 ГПа), модуля упругости (250 ГПа), и наименьшими значениями площади износа (100 кв.мкм), коэффициента трения (0,25) обладают плёнки полученные при соотношении 5/6,5 кВт на С и Ti соответственно.

# 1 ИЗНОСОСТОЙКОЕ ПОКРЫТИЕ TiC

## 1.1 Свойства и применение пленок на основе TiC

Износостойкие покрытия - металлические и неметаллические покрытия, отличающиеся износостойкостью в условиях контактного трения. Такое покрытие, нанесенное на инструмент должно обеспечивать хорошую твердость и стойкость, для того чтобы в течение длительного времени сохранять режущие свойства инструмента. Защитные покрытия на основе различных тугоплавких материалов увеличивают срок службы, термостабильность и стойкость инструментальной основы к окислению. Многообразие применяемых в настоящее время способов физического осаждения износостойких покрытий сводится к испарению или ионному распылению титана или его сплавов.

Структуру и адгезию покрытия инструмента, а также его режущие свойства определяет многие параметры: степень ионизации, скорость и плотность потока напыляемых частиц, оптимизация температуры нанесения покрытий, различные режимы нанесения, конфигурация технологической оснастки, проведение предварительного ионного травления или легирования и многие другие особенности определяют структуру самих покрытий и строение межфазной границы «покрытие — подложка» [2].

Нитриды, карбиды и карбонитриды переходных металлов представляют большой интерес для сообщества тонких пленок из-за их превосходных свойств, включая твердость, химическую стабильность, электрическую проводимость и сверхвысокие температуры плавления, которые делают карбиды и нитриды переходных металлов потенциальными кандидатами на роль нескольких приложений [3-8]. Среди этих соединений карбид титана (TiC), нитрид титана (TiN) и карбонитрид титана Ti (C, N), используемые в качестве твердых керамических материалов, которые могут быть нанесены на титановые сплавы, стали, карбиды и алюминиевые сплавы для изменения их механических свойств поверхности, например: твердость и износостойкость [9]. Кроме того, эти

соединения считаются высокотехнологичными материалами, обычно используемыми в микроэлектронике, космической технике, авиастроении и полупроводниковой технологии, благодаря их уникальным характеристикам, таким как высокая твердость и высокий модуль Юнга, низкий трение, хорошая коррозионная стойкость, хорошая теплопроводность, более высокая электропроводность и более высокие температуры плавления. Эти покрытия были приготовлены разными способами, и распыление является одним из наиболее успешных методов. Осаждение этих тонких пленок распылением имеет важные особые преимущества, такие как низкий уровень примесей и простой контроль скорости осаждения. Этот метод также позволяет получать тонкие пленки различной морфологии и кристаллографической структуры. Когда для нанесения тонких пленок используется метод распыления, свойства тонких пленок сильно меняются в зависимости от условий распыления, таких как давление реактивного газа, общее давление, напряжение смещения подложки, мощность приходящаяся на катоды, скорость движения карусели. Тонкий слой TiC снижает трение и предотвращает взаимную диффузию и истирание. Таким образом, установлено, что покрытие толщиной около 2-10 мкм увеличивает срок его службы более чем на несколько сотен процентов. Поэтому представляет интерес изучить влияние параметров осаждения на покрытия TiN, TiC, TiCN. В данной работе мы исследовали влияния мощности магнетрона на структурные и функциональные свойства карбида титана.

## **1.2 Методы получения пленок TiC**

В настоящее время все методы получения покрытий условно делятся на две большие группы – физические (PVD - physical vapor deposition) и химические (CVD - chemical vapor deposition).

Карбид титана (TiC) - твердый, износостойкий и химически инертный материал. Таким образом, покрытие TiC на режущих инструментах,



металлообрабатывающих инструментах, шарикоподшипниках, твердосплавных и керамических инструментах широко используется на практике. Тонкий слой TiC снижает трение и предотвращает взаимную диффузию и истирание. Таким образом, установлено, что покрытие толщиной около 2-10 мкм увеличивает срок его службы более чем на несколько сотен процентов.

Сегодня обнаружены пленки карбида титана, выращенные как химическим, так и физическим методами осаждения из газовой фазы. Методы CVD широко используются в промышленности благодаря единообразию, приверженности и возможности массового производства. Кинетика осаждения CVD изучалась для различных параметров осаждения во многих более ранних исследованиях. [10]

Известно, что пленки из TiC являются одними из наиболее перспективных твердых защитных покрытий. Термическое или плазмохимическое осаждение из газовой фазы широко используется для нанесения твердых покрытий из TiC. В процессах CVD пленки наносятся на подложки в диапазоне температур 500-1050 °C [11].

### **1.2.1 Химическое осаждение**

Метод CVD, схема которого показана на рисунке 1.1, основан на протекании гетерогенных химических реакций в парогазовой среде, в результате которых образуется износостойкое покрытие.

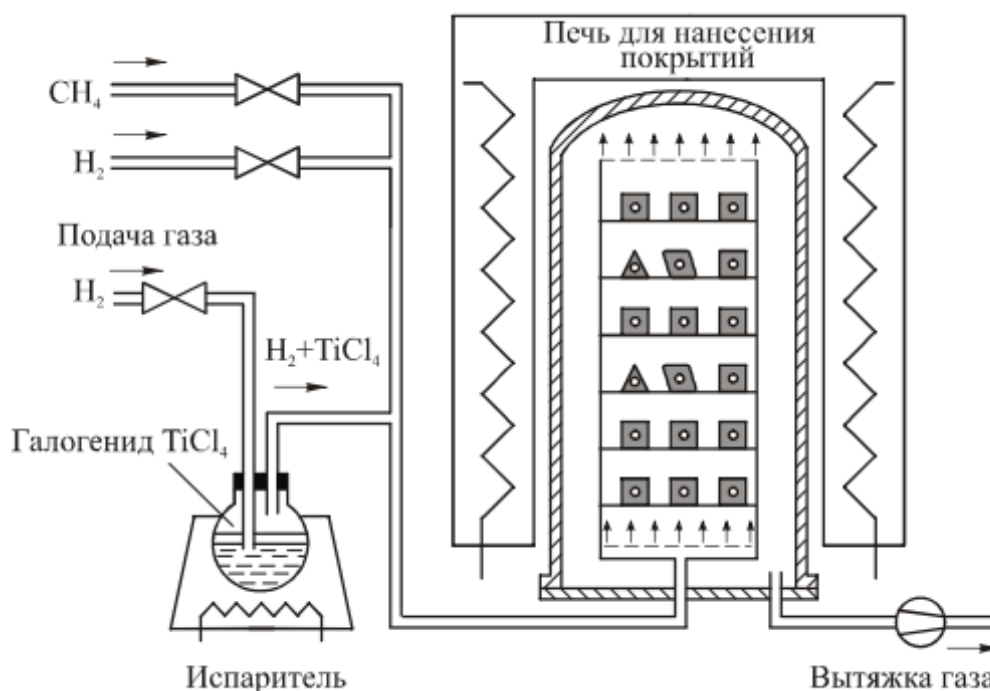


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема процесса химического осаждения покрытий из газовой фазы на твердосплавные сменные многогранные пластины (СМП)

Получение пленок на поверхности подложки производят при атмосферном давлении, пониженном и в глубоком вакууме при давлении ниже  $10^{-6}$  Па ( $\sim 10^{-8}$  мм рт. ст.) в зависимости от требуемых свойств покрытий. Осаждение покрытий происходит в специальной печи в присутствии водорода в результате взаимодействия газообразных галогенидов ( $\text{TiCl}_4$ ,  $\text{AlCl}_3$ ) с составляющими смесей: а) азотом – при осаждении нитридов тугоплавких металлов; б) метаном – при осаждении карбонитридов; в) углекислым газом – при осаждении оксидов. Температуры, при которых формируются покрытия НТ-CVD (высокотемпературный) и МТ-CVD (среднетемпературный) – методами, превышают  $750\text{ }^\circ\text{C}$ , а РА-CVD–методом (с плазменным сопровождением) –  $550\text{ }^\circ\text{C}$  до  $650\text{ }^\circ\text{C}$ . При этом обеспечивается высокая скорость (5-8 мкм/ч) нанесения покрытий, в том числе и многослойных, общая толщина которых может достигать 6-15 мкм и более. CVD–покрытия требуют применения дорогостоящих высокочистых химических реагентов ( $\text{TiCl}_4$ ,  $\text{NH}_3$ , др.), прецизионных дозаторов

химических прекурсоров, точного контроля продуктов химических реакций в рабочей камере и т. д. Также он не выгоден в связи с высокой температурой процесса 600-1100 К и высоким давлением 1130 Па, которые не удовлетворяют условиям для нанесения износостойких покрытий. [12].

В данной статье представлено влияние температуры осаждения и состава газов-реагентов на свойства пленки TiC, осажденной на быстрорежущей стали (AISI M2) и композитном керамическом режущем инструменте Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC, с целью обеспечения оптимального условия нанесения защитного покрытия TiC.

Быстрорежущая сталь AISI M2 с составом 0,90 C, 4,10 Cr, 5,00 Mo, 1,85 V, 6,35 W, остальное Fe и композитная подложка Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC были изготовлены методом горячего прессования (HP 3560 Astro Co.) с 62 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Herman C. Storck Berlin Co), 30 TiC (Herman C. Storck Berlin Co), 6 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Sumitomo Co.) и 2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Sumitomo Co.). Обе подложки были механически отполированы и очищены ультразвуком перед загрузкой в камеру для получения максимальной шероховатости поверхности менее 0,5 мкм.

Реакционная камера представляла собой 2-дюймовую трубку из оксида алюминия с открытым концом, в которой помещен графитовый токоприемник размером 100·30 мм. Общее давление в системе составляло 53 кПа для наплавки на сталь M2 и 1 атм для композита Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC. Нагревательная печь сопротивления (Lindberg 54233) использовалась для повышения температуры реакционной камеры для осаждения до 1020 - 1100°C .

Были проведены испытания на износ по задней поверхности и кратеру, чтобы увидеть влияние пленки TiC, нанесенной на композитный режущий инструмент Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC. Согласно полученным результатам, режущий инструмент с покрытием TiC имеет в 12 раз большую износостойкость по задней поверхности и в 8 раз большую стойкость к кратерному износу, чем Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> без покрытия – TiC. Поскольку износ по задней поверхности соответствует абразивному процессу, а кратерный износ является результатом диффузионного процесса, увеличение срока службы вызвано высокой микротвердостью (2700 кг/мм<sup>2</sup>) и эффектами диффузионного барьера пленки.

Мелкозернистая структура обеспечивает высокую микротвердость, а столбчатая структура ухудшает ее прочность. Осаждения при 1323 К и 1373 К для стали М2 и композита  $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{TiC}$  соответственно дают мелкозернистую структуру.

Хотя пленки CVD показали хорошие механические свойства, одним из недостатков является то, что материал с низкой температурой плавления не может использоваться в качестве подложки [13].

### 1.2.2 Реактивное распыление

Реактивное распыление – это еще один метод нанесения пленок TiC, который позволяет наносить покрытие TiC на подложку при низкой температуре [14].

На рисунке 1.2 схематически изображен процесс распыления. К мишени прикладывается высокий отрицательный потенциал (от 1 до 4 кВ), и если инертный рабочий газ вводится в вакуумную камеру, тлеющий разряд может быть инициирован и поддерживаться. Ионы, образующиеся в этом тлеющем разряде, ускоряются по направлению к мишени, и при столкновении с ней атомы выбрасываются. Используемое давление газа находится в диапазоне от нескольких Па до примерно 13 Па, а наиболее часто используемым газом для распыления является аргон. Напряжение, подаваемое на мишень, может быть постоянным или высокочастотным. Если используются изолирующие мишени, должен быть приложен радиочастотный потенциал (обычно 13,56 МГц), затем на поверхности мишени индуцируется постоянное напряжение смещения, и, таким образом, становится возможным распыление. Из-за более эффективной ионизации рабочего газа ВЧ распыление обычно работает при более низких давлениях. Скорость осаждения обычно намного ниже ( $<1 \text{ мкм} \cdot \text{мин}^{-1}$ ), чем, например, при испарении.

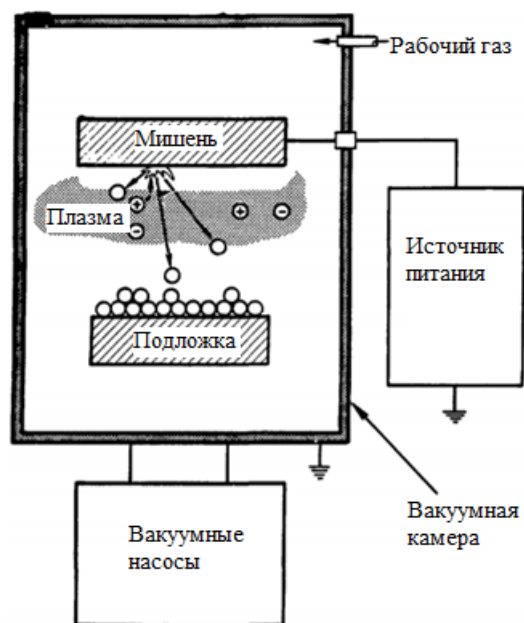


Рисунок 1.2 – Основной процесс распыления

Для нанесения пленок Ti-C реактивным распылением металлическая мишень Ti обычно распылялась смесью аргона и углеводородного газа. В этом случае скорость осаждения не должна быть такой высокой, поскольку на поверхности мишени образуются карбиды с низким выходом при распылении. Управление составом пленки также затруднено из-за так называемой проблемы гистерезиса, связанного с отравлением мишени. Кроме того, внедренные атомы водорода будут влиять на механические и химические свойства осажденных пленок. Если твердую углеродную мишень можно использовать в качестве источника углерода для нанесения пленок TiC, эти недостатки можно преодолеть. Также интересно с научной точки зрения получить представление о возможности осаждения кристаллических пленок TiC с использованием твердого источника углерода. Также для увеличения степени ионизации в плазме и количества ионов, падающих на мишень (и, следовательно, скорости осаждения), магнитное поле может быть приложено параллельно поверхности мишени. Такое магнитное поле сдерживает как электроны в плазме, так и первичные электроны, испускаемые мишенью в окрестности мишени, и тем самым увеличивает ионизацию. Эти конфигурации катод-мишень называются магнетронами [15].

### 1.2.3 Вакуумно-дуговое испарение

Вакуумно-дуговое испарение, также называемое катодно-дуговое напыление (CAD), было разработано как конкурентоспособный метод ионного осаждения несколько десятилетий назад. С тех пор этот подход исследовался многими группами по всему миру, которых заинтриговало обещание эффективного источника высокоионизированного материала для плотных, прилипающих покрытий, имеющих широкий диапазон составов. С помощью этих методов качество нанесенных покрытий было значительно улучшено, и в настоящее время появляются сообщения о применении метода катодной дуги в более требовательных технологических областях в оптике и электронике.

Привлекательность процесса катодно-дугового напыления возникает из-за высокой энергии осаждения конденсирующихся атомов, которая необходима при росте пленки для обеспечения адгезии, а также для нарушения столбчатого роста. Эти энергии зависят от материала и составляют от 25 до 55 эВ для углерода и железа соответственно. Кроме того, оценки энергий, необходимых для высококачественного роста пленки, основанные на теории взаимодействия ионов с поверхностью, показывают, что энергии порядка 25–100 эВ также желательны для активации поверхностных смещений атомов при сохранении хорошей кристалличности нижележащих объемных слоев.

Как анодное, так и катодно-дуговое испарение широко используется для нанесения твердых и износостойких покрытий как для декоративного, так и для функционального применения. Как правило, эти покрытия имеют толщину в несколько микрон. Многие процессы дугового осаждения используются в режиме ионного осаждения, то есть с одновременной энергетической бомбардировкой частиц при осаждении пленки, что влияет на свойства пленки. Катодно-дуговое осаждение является наиболее широко используемым дуговым методом при испарении легированных электродов, таких как Ti-Al.

Типовые условия осаждения:

- Рабочая среда: вакуум  $10^{-3}$ ... $10^{-2}$  Па. Реактив. газы N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>;

-  $P = 0,01...1 \text{ Па}$ ,

-  $T = 300...600^\circ\text{C}$ ;

- Испарение металлов в катодном пятне дугового разряда. Осаждение покрытий с высокой степенью ионного воздействия.

В камере создается вакуум. Между анодом, поджигающим электродом и катодом, выполненным из наносимого материала, подается напряжение. Процесс испарения начинается с зажигания вакуумной дуги (характеризующейся высоким током и низким напряжением), это действие производится кратковременным касанием поджигающего электрода поверхности катода, которая формирует на поверхности катода (мишени) одну или несколько точечных (размерами от единиц микрон до десятков микрон) эмиссионных зон (так называемые «катодные пятна»), в которых концентрируется вся мощность разряда.

Локальная температура катодного пятна чрезвычайно высока (около  $15000^\circ\text{C}$ ), что вызывает интенсивное испарение и ионизацию в них материала катода и образование высокоскоростных (до  $10 \text{ км/с}$ ) потоков плазмы, распространяющихся из катодного пятна в окружающее пространство. Отдельное катодное пятно существует только в течение очень короткого промежутка времени (микросекунды), оставляя на поверхности катода характерный микрократер, затем происходит его самопогасание и самоинициация нового катодного пятна в новой области на катоде, близкой к предыдущему кратеру. Визуально это воспринимается как перемещение дуги по поверхности катода.

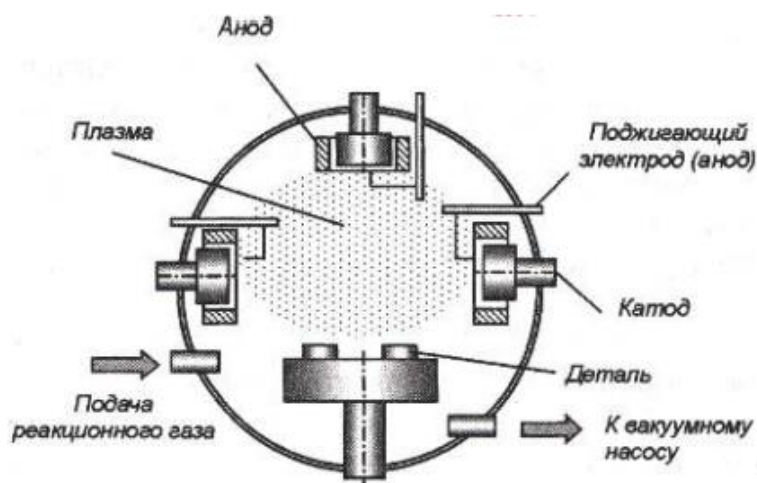


Рисунок 1.3 – Вакуумно-дуговая установка

Для управления дугой по поверхности катода на неё можно воздействовать наложением электромагнитного поля. Сама дуга является проводником с током.

В вакуумной дуге в катодных пятнах концентрируется крайне высокая плотность мощности, результатом чего является высокий уровень ионизации (30—100 %) образующихся плазменных потоков, состоящих из многократно заряженных ионов, нейтральных частиц, кластеров (макрочастиц, капель). Если в процессе испарения в вакуумную камеру вводится химически активный газ, при взаимодействии с потоком плазмы может происходить его диссоциация, ионизация и возбуждение с последующим протеканием плазмохимических реакций с образованием новых химических соединений и осаждением их в виде плёнки (покрытия).

Существенная трудность и недостаток процесса является при испарении в вакуумной дуге состоит в том, что если катодное пятно остается в точке испарения слишком долго, оно эмитирует большое количество микрочастиц или капельной фазы, размер которых в растущих пленках находится в диапазоне 0,1–20 мкм. В большинстве случаев загрязнение микрочастиц считается вредным, поскольку микрочастицы увеличивают шероховатость поверхности, добавляют микропоры в покрытие и вызывают резкие изменения микроструктуры и текстуры, также макровключения снижают свойства покрытия из-за их плохой адгезии к подложке и могут быть больше, чем толщина покрытия (проступать через покрытие). Хуже того, если материал катода мишени имеет низкую температуру плавления (например, алюминий): в этом случае мишень под катодным пятном может плавиться, вызывая испарение материала катодного держателя, или вода, охлаждающая катод начнет поступать в вакуумную камеру, что может привести к аварийной ситуации.

Для решения данной проблемы производят тем или иным способом непрерывное перемещение катодного пятна по большому и массивному катоду, имеющему достаточно большие линейные размеры. В основном, как уже упоминалось выше, для управляемого перемещения катодных пятен по поверхности катода используются магнитные поля. С этой же целью, при применении



цилиндрических катодов, во время работы (испарения) им можно сообщать вращательное движение. Не позволяя катодному пятну оставаться на одном месте слишком долго, можно использовать катоды из легкоплавких металлов, и при этом уменьшить количество нежелательной капельной фазы (рисунок 1.4) [16].

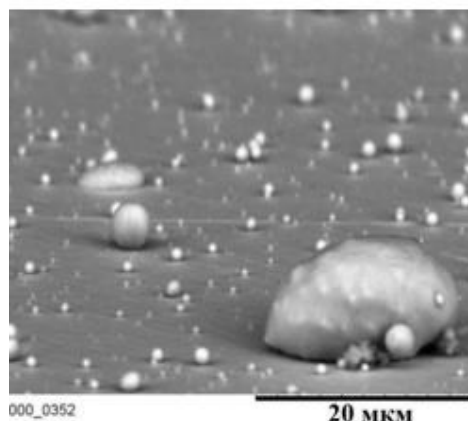


Рисунок 1.4 – Микрокапельная фракция

Для борьбы с микрокапельной фракцией используют системы экранов, магнитные сепараторы, системы модуляции тока дуги и др [17].

Несмотря то, что покрытия получают хорошего качества, получаемые при использовании вакуумно-дугового метода, недостатком является затруднение создания однородного нанесения на подложки большой площади, также явным недостатком является образование микрокапельной фракции [18, 19].

В статье микротвёрдость пленок TiC сильно зависит от температуры подложки. Измеренная микротвёрдость пленок TiC находилась в диапазоне 2900-3300 кгс·мм<sup>-2</sup> для пленок, осажденных в диапазоне температур 350-550 °С.

Однако пленки, осажденные при температурах 600 °С и выше, показали заметное увеличение твердости, которая обычно находилась в диапазоне 3700-4000 кгс·мм<sup>-2</sup>. Эти результаты суммированы в Таблице I. Аналогичные результаты были получены группой Бунша по осажденным пленкам ARE2v3.

Таблица 1 – Зависимость микротвёрдости от температуры подложки

Температура подложки (°С)	Микротвёрдость (50 сила нагрузки) (кгс·мм <sup>-2</sup> )
---------------------------	--

350	2950
500	3300
600	3700
700	4000

Было обнаружено, что при температуре выше 650-дюймовых пленок, полученные при температуре выше 650 °С, состоящие из однофазных кубических TiC. Ни одно заметное присутствие водорода или гидридной фазы в этих пленках не наблюдалось. Было обнаружено, что высокотемпературные пленки имеют параметр решетки 4,32 Å и имел предпочтительную ориентацию (200). Никакое отсутствие напряжения не было измерено в таких пленках. Пленки TiC не подходят для резки из-за включений водорода при низких температурах [20].

#### 1.2.4 Принцип работы магнетронного распыления

Магнетронное напыление – это высокоточный вакуумный метод нанесения покрытий на металлы, сплавы и соединения широкого спектра материалов толщиной до миллиметра. Он обладает рядом важных преимуществ по сравнению с другими методами вакуумного нанесения покрытий, что привело к развитию большого числа коммерческих применений-от микроэлектронного производства до простых декоративных покрытий.

К основным взаимосвязанным характеристикам, определяющим скорость распыления мишени, относят напряжение разряда, ток разряда, давление рабочего газа и индукцию магнитного поля вблизи поверхности катода. В качестве рабочего газа в магнетронных распылительных системах обычно используется аргон.

Типовые условия осаждения:

- Рабочая среда: чистые газы аргона, азота, кислорода;
- $P = 0,05 - 1 \text{ Па}$ ;
- $T = 60 \dots 6000 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

- Ионное распыление металлов в магнетронном разряде.

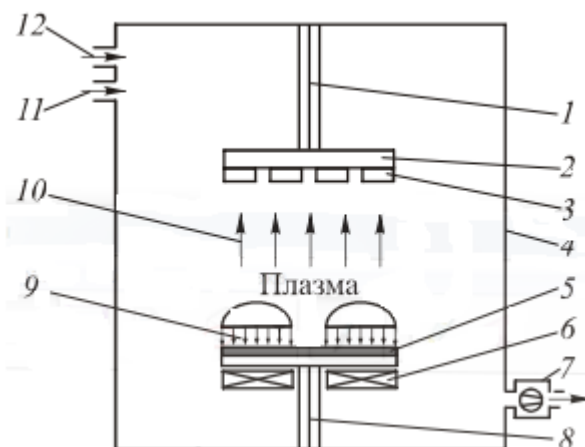


Рисунок 1.5 – Магнетронное распыление

1 – подача напряжения смещения; 2 – держатель инструментов; 3 – инструмент; 4 – вакуумная камера; 5 – осаждаемый материал; 6 – магнитная система для магнетронного распыления; 7 – вакуумный насос; 8 – подача разрядного напряжения; 9 – ионный пучок; 10 – распыленный материал; 11 – реакционный газ; 12 – инертный газ;

Достоинства метода магнетронного распыления:

- 1) Плотная микро- (нано-) кристаллическая структура металлических и керамических покрытий при полном отсутствии капельной фазы
- 2) Возможность нанесения покрытий на термочувствительные материалы при низких температурах;
- 3) Наиболее широкий спектр покрытий различного назначения;
- 4) Высокие свойства металлических и керамических покрытий [21].

В отличие от тлеющего разряда, где электрон, не испытывающий столкновений, будет свободно ускоряться электрическим полем, пока не покинет область катодного падения потенциала (тёмное катодное пространство), наличие поперечного магнитного поля заставляет электрон искривлять свою траекторию под действием силы Лоренца. Хорошо известно, что при столкновении положительного иона с атомами на поверхности твердого тела происходит перенос энергии. Если энергия, передаваемая узлу решетки, больше энергии связи, то могут

быть созданы первичные атомы отдачи, которые могут далее сталкиваться с другими атомами и распределять свою энергию через каскады столкновений. Распыление происходит, если энергия, передаваемая по нормали к поверхности, больше примерно в три раза энергии поверхностной связи (примерно равной теплоте сублимации).

При достаточной величине магнитного поля электрон вернётся на катод с почти нулевой энергией и вновь начнёт ускоренное движение под действием электрического поля. Траекторией его движения будет циклоида, электрон дрейфует вдоль поверхности катода в направлении, перпендикулярном как электрическому, так и магнитному полю. Электрон находится в «ловушке», покинуть которую он может, только совершив столкновение с другой частицей. Тогда он перейдёт на новую траекторию, расположенную чуть дальше от катода и так до тех пор, пока не ослабнут поля, магнитное — за счёт удаления от полюсов магнитной системы, электрическое — за счёт плазменной экранировки. За счёт наличия ловушки многократно возрастает эффективность ионизации эмитированными электронами, что позволяет, в отличие от обычного диодного разряда, получать высокую плотность ионного тока, а значит, и высокие скорости распыления при относительно низких давлениях порядка 0,1 Па и ниже.

Распыление атома-мишени-лишь один из возможных результатов ионной бомбардировки поверхности. Помимо распыления, вторым важным процессом является эмиссия вторичных электронов с поверхности мишени. Эти вторичные электроны позволяют поддерживать тлеющий разряд. Процесс распыления практически не имеет ограничений по типу материалов мишени, начиная от чистых металлов, где может быть использована мощность постоянного тока, до полупроводников и изоляторов, которые требуют либо ВЧ-мощности, либо импульсного постоянного тока. Осаждение может осуществляться как в неактивных (только инертный газ), так и в реактивных (инертный и реактивный газ) разрядах с одиночными или многоэлементными мишенями.

В этом исследовании мы осаждали пленки Ti-C с различным соотношением состава C / Ti с помощью магнетронного распыления с двумя источниками и

исследовали влияние отношения приложенной мощности к мишеням из С и Ti на структуру, состав и морфологию нанесённых покрытий.

### 1.2.5 Высокочастотное магнетронное распыление

ВЧ-плазма проводится посредством электронной ионизации, которая демонстрирует колебательное движение на частоте ВЧ-магнетрона 13,56 МГц. На этой частоте ионы не могли следовать этим колебаниям из-за своей механической инерции. Это возбуждение намного более эффективно, чем ионизация колеблющимися вторичными электронами, что приводит к уменьшению напряжения Ч-разряда. Во время положительного полупериода мишень действует не как катод, а как анод. Следовательно, плотность плазмы перед подложкой для высокочастотного распыления значительно выше. На рисунке 1 показано распределение потенциала, в котором положительные ионы ( $Ar^+$ ,  $O^+$  и  $Ca^+$ ) ускоряются в катодном падении  $V_p - V_{dc}$ , и происходит распыление мишени. В то же время электроны и отрицательные ионы ( $O^-$ ) перемещались от мишени к подложке, которые вместе с отраженными нейтральными атомами аргона прибывали к подложке и производили рост покрытия. Влияние энергитических частиц на твердую поверхность во время роста с помощью ионов во время высокочастотного разряда: вторичные и обратно рассеянные электроны, а также отраженные ионы и нейтралы вызывают более высокую плотность плазмы перед подложкой для ВЧ-возбуждения и, следовательно, более высокий ток насыщения ионов для растущей пленки.

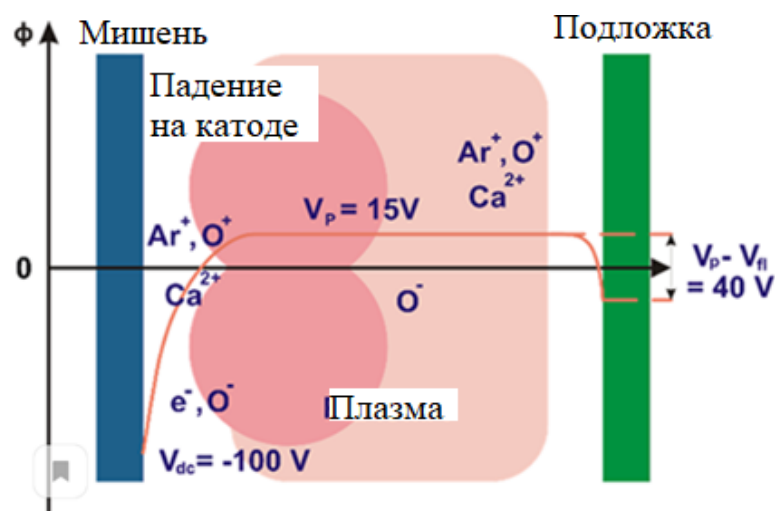


Рисунок 1.6 - Распределение потенциала в распыляющем магнетронном разряде, возбуждаемом ВЧ

Можно видеть, что электроны удерживаются вне подложки, и только те, которые имеют достаточно высокую энергию, смогут пройти через потенциальный барьер и прибыть к подложке, даже если у них низкий ток. И нейтральные частицы, и отрицательные ионы высокой энергии (например,  $O^-$ ) способны поражать субстрат.

На свойства пленок, осажденных распылением с помощью ВЧ-магнетрона, сильно влияет бомбардировка растущей пленки частицами из мишени для распыления и из плазмы. Последнее определяется параметрами осаждения, такими как давление и состав рабочего газа, расстояние от мишени до подложки и напряжение смещения подложки. Контроль этих параметров необходим для изменения структурных свойств покрытия, его состава и механических характеристик.

На рисунке 1.7 представлена схематическое изображение импульсного питания.

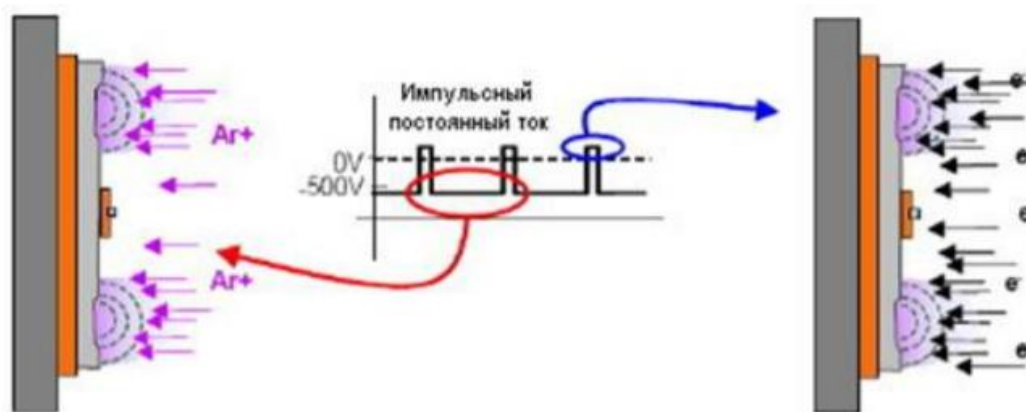


Рисунок 1.7 – Схематическое изображение импульсного питания

В статье тонкие пленки TiC осаждались в установке для нанесения покрытий с использованием высокочастотного магнетронного распыления, которая была специально разработана для этого процесса, использовалась подложка (CrTi) Используемая мишень TiC составляет 99,99% чистоты. Расстояние мишень – подложка сохранялось на протяжении всего эксперимента. Вакуумирование камеры напыления до базового давления  $1,13 \cdot 10^{-3}$  Па выполнялось в течение всего процесса нанесения покрытия до того, как началось напыление. Причина низкого давления состоит в том, чтобы обеспечить большую длину свободного пробега для столкновения между мишенью и подложкой и позволяет контролировать и минимизировать загрязнение.

После вакуумирования система повторно заполняется аргоном до парциального давления  $2,5 \cdot 10^{-1}$  Па. Использовали расход аргона  $12 \text{ см}^3/\text{см}^3$  и поддерживали постоянное рабочее давление. Поддержание постоянного давления помогает разместить множество атомов аргона на пути ионов и выбрасываемых покрытий. После образования плазмы запускается распыление мишени, и заслонка снимается. Предварительное напыление проводилось для всех образцов за 5 мин до основного напыления. Подложка располагалась непосредственно над мишенью на вращающемся диске для обеспечения равномерного распределения и конденсации мишени на поверхности подложки. Материал мишени очищался после каждого цикла, чтобы предотвратить накопление заряда, тем самым уменьшая эффект искрения.

Эксперименты по распылению проводились путем изменения трех основных параметров магнетронного распыления, а именно ВЧ мощности, времени распыления и температуры. Оптимизация экспериментальной матрицы была проведена с использованием метода Тагучи. Метод Тагучи - это простой, эффективный и мощный инструмент проектирования для статистического анализа и оптимизации. Это уменьшает количество проводимых экспериментов и ограничивает влияние внешних факторов, которые нельзя контролировать на систему. Полный ортогональный массив Taguchi L9 с тремя факторами на трех уровнях: низкий, средний и высокий и всего девять циклов осаждения. Диапазон времени от 2 до 3 часов, мощность от 150 до 250 Вт и температура от 80 до 1000 °С.

Средние значения твёрдости и модуля упругости составили 4,54 ГПа и 121,32 ГПа, соответственно. Коэффициент трения лежит в диапазоне от 0,031 и 0,075, испытания на износ показали значения от 0,447 до 0,496.

Из анализа результатов Тагучи с использованием анализа отношения сигнал-шум и дисперсионного анализа можно сделать вывод, что ВЧ-мощность является наиболее эффективным контролирующим фактором как для твердости, так и для модуля Юнга. Коэффициенты трения как для микроцарапин, так и для износа значительно улучшаются, а параметры процесса оказываются основными определяющими факторами в результате реакции [22].

### **1.2.6 Принцип работы дуальной магнетронной системы**

При использовании биполярной импульсной техники, дуальной магнетронной распылительной системы (система ДМС, рис. I) два магнетрона поочередно работают как анод и катод соответственно. С помощью этого метода всегда будет доступен электропроводящий анод, потому что он становится катодом во время следующей полуволны. Таким образом можно освободить его от нанесенных изолирующих слоев.



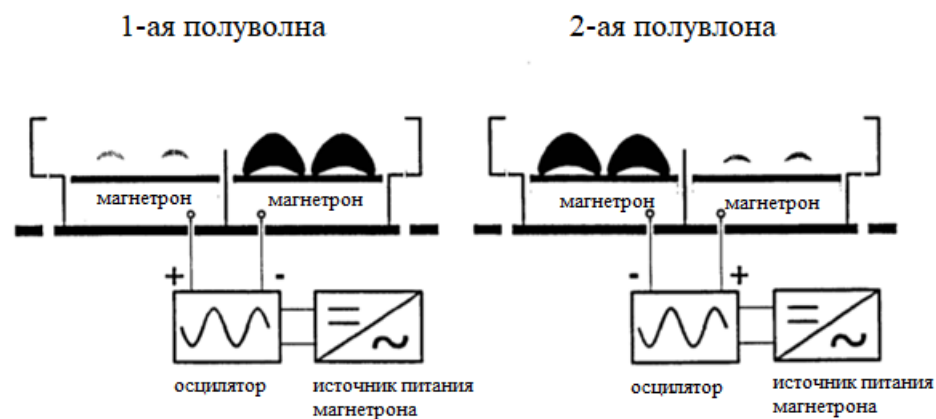


Рисунок 1.8 – Биполярная технология с дуальной магнетронной распылительной системой [23]

Давайте более подробно рассмотрим однополярные и биполярные режимы работы ДМС и их основные различия. На рисунке 1 показаны диаграммы и участки напряжения, объясняющие принцип работы дуальной магнетронной распылительной системы (ДМРС) в обоих режимах. В биполярном режиме источник напряжения выделяют из заземленной вакуумной камеры и они присоединены только к мишеням ДМРС, как показано на рисунке 1а. Весь разгрузочный ток протекает через мишень. В течение первого полупериода мишень М1 действует как катод, а мишень М2 действует как анод.

В течение этого времени мишень М1 начинает притягивать положительно заряженные ионы из плазмы и ускоренные ионы бомбардируют данную мишень и передают ей положительный заряд. В течение второго периода полярность изменений напряжения и мишени меняют роли. Положительно заряженные ионы влияют на отрицательное поле катода и мишень М1 в дальнейшем не может распыляться. Поэтому полярность двух магнетронов меняется и положительный заряд подаётся на мишень М1 и отрицательный на мишень М2. В это время мишень М1 притягивает к себе электроны и под действием отрицательного заряда электронов нейтрализует положительный заряд ионов, превращая их в атомы. Таким образом мишень М1 очищается. В это время мишень М2, которая имеет отрицательный заряд, притягивает к себе отрицательно заряженные ионы.

Результатом является альтернативное распыление мишеней. В биполярном режиме анод имеет меньшую область, по сравнению с обычными магнетронными системами, в которых стенки вакуумной камеры обычно являются анодом. В случае анода небольшого пространства, для того, чтобы электронный ток оставался равным разрядам, требуется повышенное падение напряжения анода. Увеличение падения напряжения анода приводит к увеличению потенциала на мишени относительно земли. В результате небольшое положительное (по отношению к началу) напряжение появляется на мишени, выступающей в качестве анода во время паузы между отрицательными импульсами.

В однополярном режиме источник напряжения подключается к вакуумной камере через диоды D1 и D2, как показано на рисунке 1В. Когда положительное (относительно земли) напряжение на мишени M2, открывается диод D2, и ток разряда распределяется между мишеней M2 и стенками камеры. Поскольку отрицательное напряжение применяется к M1, диод D1 остается закрытым. Во второй половине периода, ситуация изменяется, и диод D1 открывается и соединяет мишень M1 с вакуумной камерой. Поскольку в этом режиме анод имеет большую площадь, падение напряжения анода не увеличивается. Амплитуда импульсов положительного напряжения составляет всего несколько вольт, что соответствует падению напряжения по диоду. Поэтому мы назвали этот режим UniPolar.

Для ДМРС использовался источник питания, схема которого показана на рисунке 1.9. Его основные параметры перечислены в таблице 1.

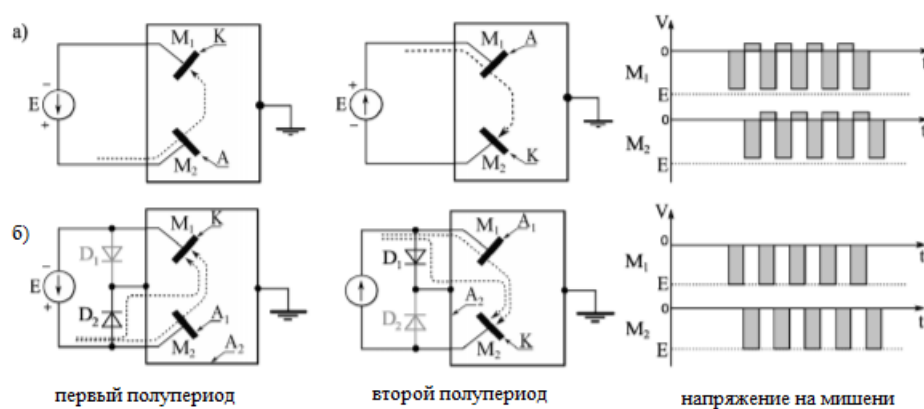


Рисунок 1.9 – Схема биполярной (а) и униполярной (б) моделей

Использование биполярных импульсов позволяет предотвратить образование дуги, загрязнение оксидными плёнками и двойную конфигурацию магнетронной распылительной системы для решения проблемы «исчезновения анода» в реакционноспособной магнетронной распылении. Кроме того, использование двойной системы повышает энергетическое воздействие ионов на нанесенное покрытие, что значительно влияет на его свойства [24].

## 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

### 2.1 Схема вакуумной установки

Для получения покрытия TiC использовалась установка ПВР-1, схема которой представлена на рисунке 2.1.

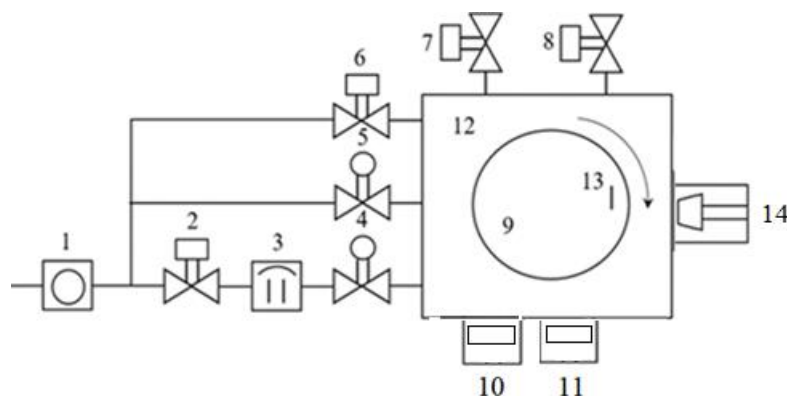


Рисунок 2.1 – Схема установки ПВР-1

1- Механический насос; 2,6 - электромагнитный клапан; 3- диффузионный насос; 4,5- клапан с электромеханическим приводом; 7,8 – электромагнитные клапаны для подачи газов; 9-карусель; 10 – катод из титана; 11 – катод из графита;

12- рабочая камера; 13-подложка; 14 – дуговой испаритель

В комплект данной установки входят:

1. Дуговой испаритель;
2. Катод титана;
3. Катод углерода;
4. Подложкодержатель планетарного типа;
5. Система регулировки нагрева и напряжения смещения подложек;
6. Система водяного охлаждения
7. Система подвода газов.

Также во время использования установки использовались 3 блока питания:

1. Смещения;
2. Зажигания дугового разряда;

### 3. Магнетрона;

## 2.2 Полировально-шлифовальные машины

Используются для обработки образцов из сталей, сплавов и других материалов. Они необходимы для пробоподготовки поверхности изделий с целью последующей их плазменной обработки. В настоящей работе для пробоподготовки образцов из стали 12Х18Н10Т использовалась полировально-шлифовальная машина МР-1В. Её внешний вид показан на рис. 2.3.



Рисунок 2.2 – Полировально-шлифовальная машина МР-1В

Для удаления органических соединений, мелкой фракции с поверхности изделий необходимо их обезжирить. С этой целью можно использовать химическое травление или пробоподготовку в реактивах. В первом случае – может быть нарушен профиль поверхности изделия, что недопустимо для большинства применений, поэтому чаще используется второй приём. Для металлических изделий требуется удалить загрязнения с поверхности, не допустив её окисления.

### **Шлифовка поверхности:**

1. Включение центрального крана для подачи воды.

Вода необходима во время полировки образцов для смывания образующейся фракции.

2. Подача электрического питания на прибор.
3. Размещение на поверхности вращающегося столика шлифовального листа Р600.

При первичной обработке образца необходимо снять с него окисел, выровнять плоскости. С этой целью необходимо использовать листовой материал с максимально допустимой зернистостью, размер зерна которого наибольший.

4. Размещение образца на шлифовальном листе

При полировке лицевых граней образец закреплялся на держателе.

5. Установка скорости вращения предметного стола

Скорость была установлена в пределах 150 оборотов в минуту.

6. Включение вращения столика

При шлифовании образец периодически поворачивался на 90°. Это необходимо делать для того, чтобы можно было получить поверхность с минимальной шероховатостью при использовании листового материала с заданной зернистостью.

Когда при новой попытке отшлифовать образец, т.е. поворот образца на 90° направление царапин менялось, данный лист заменялся на лист с меньшим зерном. Полировка образцов проходила с использованием трех шлифовальных листов с разной зернистостью в следующем порядке: Р600 – Р1200 – Р2500 – Р4000, после использовался тканевый круг с использованием алмазной суспензии.

7. Остановка вращения столика

8. Помещение образцов в изопропиловый спирт

Так как металлические образцы подвержены коррозии, то сразу после полировки образцы были помещены в изопропиловый спирт, чтобы удалить остатки воды с их поверхности.

По данному алгоритму были подготовлены 5 образцов.

### **2.3 Измерение толщины покрытий**

Для определения толщины покрытий использовался прибор Calotest CAT-S0000 (CSEM, Швейцария), изображенный на рис. 2.7. Он позволяет измерять толщины различных покрытий в диапазоне от 0,1 до 50 мкм с точностью  $\pm 3\%$  [29]. Время анализа не превышает нескольких минут.



Рисунок 2.3 – Внешний вид прибора CalotestCat-S-0000

Измерение осуществляется следующим образом (рис. 2.8). Образец закрепляется на столике, на него устанавливается калиброванный шар радиусом 1,5 сантиметра.

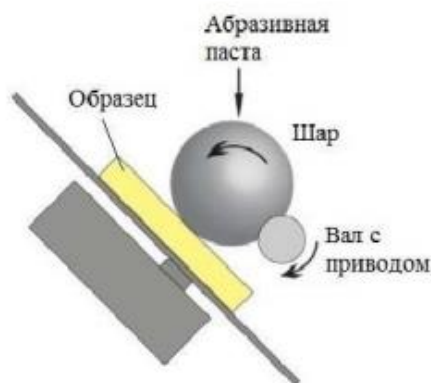


Рисунок 2.4 – Схема устройства измерения толщины плёнок

При вращении вала вокруг своей оси, шар, с добавленным на его поверхность абразивом вращаясь по неподвижной поверхности образца оставляет сферический шлиф, который затем анализируется при помощи оптического микроскопа. Типичная схема показана на рисунке 2.9.

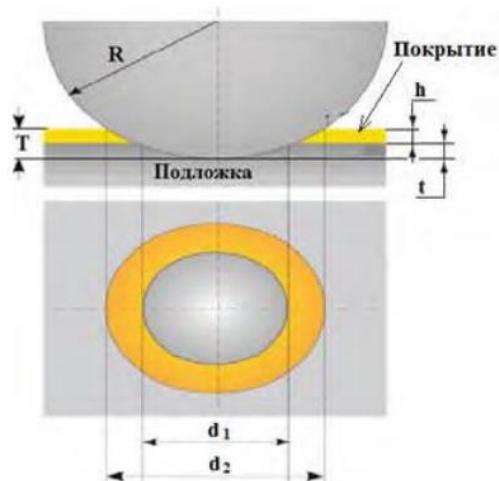


Рисунок 2.5 – Изображение сферического шлифа: R – радиус шара, T – глубина сферического кратера, t – глубина кратера в материале подложке, h – толщина покрытия

Расчёт толщины покрытия ведется следующим образом:

$$h = T - t, \quad (2.1)$$

где T – глубина сферического кратера, t – глубина кратера в материале подложки, которые рассчитываются как:

$$t = R - \left( \frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - d_2^2} \right) \quad (2.2)$$

$$t = R - \left( \frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - d_1^2} \right) \quad (2.3)$$

Тогда уравнение (5) примет вид:

$$h = \frac{1}{2} \left( \sqrt{4R^2 - d_2^2} - \sqrt{4R^2 - d_1^2} \right) \quad (2.4)$$

## 2.4 Рентгеноструктурный анализ (X-Ray Diffraction)

Для определения фазового состава покрытий методом рентгеноструктурного анализа использовалась установка Shimadzu XRD-7000S.

Параметры данной установки:

- Напряжение – 40 кВ;
- Ток – 30 мА.

На рисунке 5.1 показан дифрактометр.



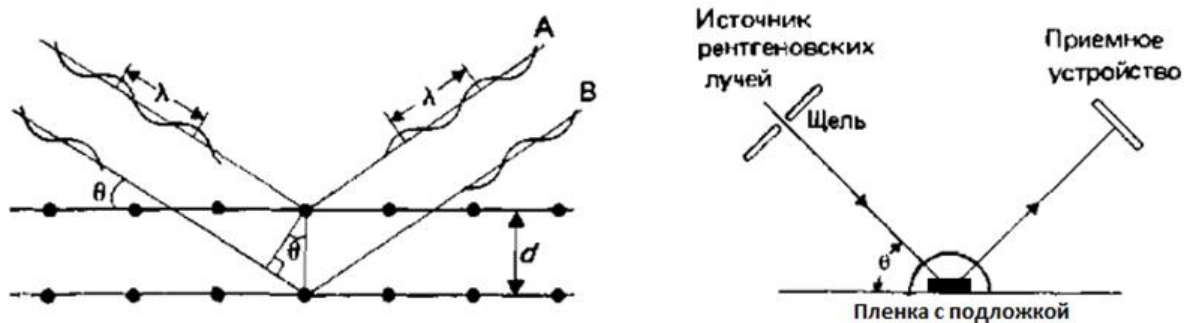


Рисунок 2.6 – Установка для наблюдения дифракции рентгеновских лучей (дифрактометр)

Главные компоненты дифрактометра - рентгеновская трубка и приемное устройство (детектор)

Они размещаются на гониометре (система точной установки и отслеживания угла излучения по отношению к поверхности образца). Одно плечо гониометра задает угол облучения образца рентгеновской трубкой, другое определяет угол брэгговского отражения излучения от образца (т.е. детектируемый сигнал). Детектор во время движения (при изменении угла  $\theta$ ) непрерывно регистрирует интенсивность рентгеновского излучения.

Это явление описывается законом Брэгга:

$$2d \sin \theta = n\lambda,$$

где  $d$  - межплоскостное расстояние,  $\theta$  - угол рассеяния,  $n$  - дифракционный порядок,  $\lambda$  - длина волны падающей волны.

## 2.5 Измерение физико-механических характеристик

Для исследования физико-механических свойств покрытия использовался сканирующий зондовый микроскоп NanoScan-3D. Микроскоп используется для измерения твердости покрытия при нагрузках до 100 мН (твердость до 80 ГПа) и для определения абсолютного модуля упругости до 1000 ГПа. Нано-твердомер оснащен оптическим и зондовым микроскопом для определения рельефа и

шероховатости поверхности. Устройство способно измерять адгезию при нагрузке до 50 мН.

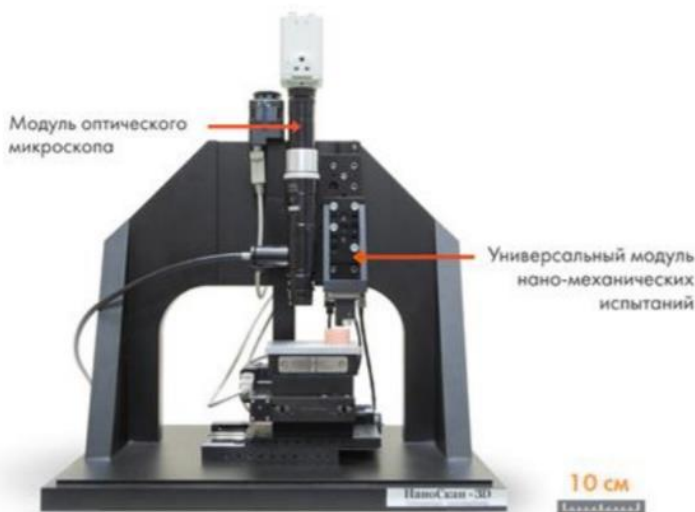


Рисунок 2.7 – Внешний вид NanoScan-3D

В качестве индентора используется алмазная пирамида типа Берковича (рисунок 2.8).

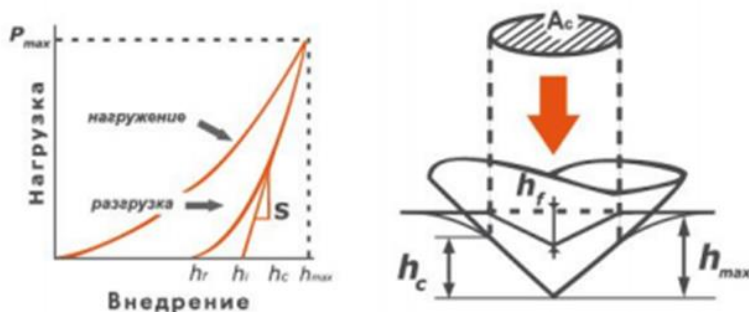


Рисунок 2.8 – Общий вид кривой нагружения и схема контакта с обозначениями величин, используемых в методике расчета модуля упругости и твердости

Измерение твердости ( $H$ ) рассчитывается по зависимости площади проекции отпечатка ( $A_c$ ) от приложенной нагрузки ( $P$ ). Измерение модуля упругости ( $E$ ) и параметра упругого восстановления ( $We$ ) проводится по кривой нагрузки-разгрузки (рисунок 4).

В результате сканирования алмазным индентором в полуконтактном режиме, закрепленном на пьезоэлектрическом керамическом зонде образовались мелкие вогнутости и выпуклости поверхности (микрорельеф). В процессе сканирования зонд резонансно колеблется на частоте  $F \sim 10$  кГц и с амплитудой  $< 50$  нм (в зависимости от исследуемого материала частота или амплитуда являются фиксированными).

## 2.6 Измерение трибологических характеристик

Исследование коэффициента трения и износостойкости проводились высокотемпературном трибометре ТНТ-S-AX0000. Прибор основан на трении индентора об исследуемую поверхность образца - «pin on disk».

Исследуемый образец устанавливается на вращающемся диске, который может нагреваться до больших температур (рисунок 5.3). Измерение свойств в реальном времени осуществляется благодаря тому, что индентор упирается в тензодатчик, устройство которое преобразует прикладываемую к нему нагрузку в электрический ток, который обрабатывается на компьютере во входные данные. Приложенная нагрузка, в виде грузов разной массы, лежит в диапазоне от 1 до 60 Н.



Рисунок 2.9 – Изображение процесса износа образца

Для исследования интенсивности износа покрытий использовался бесконтактный профилометр. Принцип действия оптического профилометра

(интерфеометра) заключается в том, что свет, излучаемый с источника, отражаясь от исследуемой и опорной поверхностей, образует интерференционную картину, которая затем регистрируется видеокамерой. Затем данные обрабатываются и набор интерференционных изображений преобразуется в карту уровней поверхности высокого разрешения.

Профилометр использовался для построения поперечных сечений треков, полученных на покрытиях в результате трибологических испытаний. Износ покрытий оценивается путем вычисления площади материала, удаленного в результате износа.

во влиянии мощности на структурные и функциональные свойства покрытия карбида титана.

Карбид титана представляет собой тонкоплёночную структуру, которая используется в качестве износостойкого покрытия, полученную с помощью дуальной магнетронной распылительной системы.

Конструкция дуальной магнетронной распылительной системы содержит два планарных магнетрона, расположенных рядом друг с другом в одной плоскости. Каждый из магнетронов содержит корпус, магнитную систему и катод-мишень. Между магнетронами расположен магнитный шунт, выполненный из магнитной стали, который перераспределяет магнитные поля, связывая магнетроны между собой. Магнетроны подключены к системе питания с изменяемой полярностью. Когда на магнетроны подается отрицательный потенциал, происходит распыление мишени ионами рабочего газа, а когда положительный - плазменные электроны высаживаются на поверхность и разряжают диэлектрическую пленку, очищая катод. Так же поочередная работа катодов предотвращает появление дуги из тлеющего разряда на магнетроне.

Конструкции магнетронных распылительных систем должны обеспечивать высокую скорость распыления, минимальное отрицательное воздействие на обрабатываемые изделия, равномерность нанесения покрытий по толщине, высокую надежность работы и т.д.

Целевой рынок – производство, работающее с технологиями тонких плёнок.

#### **4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Анализ конкурентных решений целесообразно проводить при помощи оценочной карты, для этого был определен конкурент на рынке: технология дугового испарения (В<sub>1</sub>).

Расчет показателя конкурентоспособности производился по следующей формуле:

$$K = \sum_i B_i \cdot V_i, \quad (1)$$

где  $B_i$  – бал  $i$ -го показателя,  $V_i$  – вес показателя (в долях единицы).

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

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		$B_{\phi}$	$B_{kl}$	$K_{\phi}$	$K_{kl}$
1	2	3	4	6	7
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>					
1. Производительность	0,25	4	5	1,0	1,25
2. Надёжность	0,1	4	3	0,4	0,3
3. Простота методики получения покрытий	0,1	4	5	0,3	0,5
4. Качество покрытий	0,2	5	3	1,0	0,6
5. Возможность автоматизации	0,1	3,25	4,5	0,3	0,5
<b>Экономические критерии оценки ресурсоэффективности</b>					
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	5	4	0,25	0,2
2. Уровень проникновения на рынок	0,04	4,5	3,5	0,2	0,15
3. Стоимость технологии	0,06	4	3,5	0,3	0,2
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	5	0,25	0,25
5. Послепродажное обслуживание	0,05	5	5	0,25	0,25
<b>Итого</b>	1	43,75	41,5	4,25	4,1

Согласно вышеприведенному расчету видно, что предлагаемая нами технология осаждения покрытий имеет более высокий показатель конкурентоспособности (4,25). Это обусловлено следующим рядом факторов: технология компактна и безопасна, проста в эксплуатации и надёжна, а так же имеет высокую производительность, которая обуславливает экономическую целесообразность использования. Что связано с принципом построения технологической линии, используемыми физическими принципами и наличием большого опыта по разработке технологий осаждения тонкоплёночных структур.

Суммарно это позволяет существенно снизить количество недостатков технологии и повысить число ее конкурентных преимуществ.

## **4.2 SWOT-анализ**

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Результаты исследования приведены в SWOT-анализ (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – SWOT-анализ.

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: <b>С1.</b> Заявленная высокая производительность технологии;</p> <p><b>С2.</b> Высокое качество покрытий;</p> <p><b>С3.</b> Простая методика получения покрытий;</p> <p><b>С4.</b> Квалифицированный персонал</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p><b>Сл1.</b> Отсутствие достаточного финансирования проекта;</p> <p><b>Сл2.</b> Недостаточная инструментальная база для проведения измерений;</p> <p><b>Сл3.</b> Использование устаревшего оборудования для исследования;</p> <p><b>Сл4.</b> Сложность управления некоторыми параметрами осаждения.</p>
<p>Возможности:</p> <p><b>В1.</b> Использование инновационной структуры ТПУ;</p> <p><b>В2.</b> Повышение стоимости конкурентных разработок</p>	<p>1. Получение результатов НТИ</p> <p>2. Продвижение НТИ на рынок</p>	<p>1. Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др.</p> <p>2. Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей</p> <p>3. Приобретения необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>4. Сокращение поставок или смена поставщика</p>
<p>Угрозы:</p> <p><b>У1.</b> Отсутствие спроса на НТИ;</p> <p><b>У2.</b> Уменьшение финансирования исследования;</p> <p><b>У3.</b> Введение дополнительных государственных требований к сертификации технологии.</p>	<p>1. Продвижение НТИ с целью создания спроса</p> <p>2. Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др.</p> <p>3. Сертификация и стандартизация технологии</p>	<p>1. Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др.</p> <p>2. Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей</p> <p>3. Приобретение необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>4. Сокращение поставок или смена поставщика</p> <p>5. Продвижение НТИ с целью создания спроса</p>



## 4.2 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определены изначальные цели и содержание проекта. Определены внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые взаимодействуют и влияют на общий результат научного проекта.

- 1) Цели и результат проекта.

Таблица 4.4 – Заинтересованные стороны проекта.

<b>Заинтересованные стороны проекта</b>	<b>Ожидания заинтересованных сторон</b>
НИ ТПУ, НОЦ Б.П. Вейнберга	Публикации; защита магистерской диссертации.
Российский научный фонд (грантовое финансирование)	Получение конкретных удовлетворяющих результатов исследований; публикации; разработка технологии осаждения покрытий.

Таблица 4.5 – Цель и результат проекта.

<b>Цель:</b>	Получение данных о влиянии мощности на структурные и функциональные свойства покрытия карбида титана.
<b>Ожидаемые результаты:</b>	Получение зависимостей свойств покрытий от режимов мощности на катоде из титана; формирование тонких плёнок TiC высокого качества при использовании различных режимов осаждения.
<b>Критерии приемки результата:</b>	Получение качественных покрытий с перспективой функционального применения; Отработка режимов осаждения; Изучение свойств полученных плёнок и выявление закономерностей.
<b>Требования к результату:</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Высокое качество покрытий;</li> <li>2. Выявление закономерностей в толщине покрытий;</li> <li>3. Изучение свойств полученных покрытий;</li> <li>4. Хорошая адгезия покрытий;</li> </ol>

## 2) Организационная структура проекта.

Таблица 4.6 – Рабочая группа проекта.

№	ФИО, место работы, должность.	Роль в проекте	Функции	Трудо- затраты, час
1	Юрьев Ю.Н., к.т.н., зав. лаб. НОЦ Б.П.Вейнберга	Руководитель	Координация деятельности исполнителя проекта.	396
2	Гусс Л.Е.. студентка магистр ТПУ	Инженер	Подготовка образцов, выявление оптимальных режимов, получение образцов, исследование образцов и описание результатов.	954

## 3) Ограничения и допущения проекта.

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта.

Таблица 4.7 - Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/допущения
3.1. Бюджет проекта	300 тыс. рублей
3.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
3.2. Сроки проекта:	1.09.2020-31.05.2021
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	1.09.2020
3.2.2. Дата завершения проекта	31.05.2021

### 4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей. В

таблицах 4.8 и 4.9 приведены контрольные события и план-график проекта соответственно.

Таблица 4.8 – Контрольные события проекта.

<b>№</b>	<b>Контрольное событие</b>	<b>Дата</b>	<b>Подтверждающий документ</b>
1	Получение покрытия TiC с помощью дуальной MPC	октябрь 2020	Дневник эксперимента
2	Исследование экспериментальных образцов на твёрдость и упругость	Ноябрь-декабрь 2020	Отчет по выполненной работе в виде доклада
3	Исследование трибологических свойств образцов	февраль 2021	Данные о трении и износе
4	Исследование профиля плёнок и морфологии поверхности	март – апрель 2021	Данные о морфологии поверхности и профиля плёнок
5	Отчет о проделанной работе	май 2021	Отчет

Таблица 4.9 – Календарный план-график проекта по теме

№	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																	
				сен		окт		ноя б		дек		янв		фев р		мар т		апр		май	
				1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Составление технического задания	Руководитель	7	■																	
2	Изучение литературы	Инженер	60	■	■	■	■														
3	Подготовка к установке работы	Руководитель	30	■	■																
4	Подбор режимов нанесения покрытий	Руководитель, инженер	7			■	■														
5	Получение покрытий	Руководитель, инженер	30			■	■	■	■												
6	Исследование свойств покрытий	Инженер	26					■	■	■	■										
7	Изучение трибологических свойств	Инженер	30									■	■	■	■						
8	Изучение морфологии и профиля плёнок	Инженер	45												■	■	■	■	■		
13	Подготовка отчета о проделанной работе	Инженер	14																■		
15	Написание ВКР	Инженер	157												■	■	■	■	■		

■ - научный руководитель, ■ - инженер

#### 4.4 Бюджет научного исследования

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

1. Материальные затраты НТИ;
2. Амортизационные расходы;
3. Основная заработная плата исполнителей темы;

4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы;
5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
6. Накладные расходы.

#### 4.4.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты.

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 транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены).

Таблица 4.10 – Сырье, материалы и комплектующие изделия.

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Графитовый катод		1	9000	9000
Титановый катод		1	19000	19000
Баллон Аргон	Ar, 99,9%	1	6000	6000
Всего за материалы				34000
Транспортно-заготовительные расходы (3–5%)				1900
<b>Итого по статье</b>				<b>35900</b>

#### 4.4.2 Контрагентные расходы

В ходе исследования к работе привлекались исследовательские лаборатории. Ниже представлен перечень проведенных работ и их стоимость.

Таблица 4.11 – Перечень проведенных работ и их стоимость.

№	Тип работ	Стоимость, руб.
1	Рентгеноструктурный анализ	5000
2	Испытания на износ	5000
3	Испытания на трение	5000

4	Морфология поверхности	5000
5	Испытания на твёрдость	5000
6	Испытания на упругость	5000
<b>Итого</b>		<b>30000</b>

#### **4.4.3 Расчет амортизационных расходов**

В ходе выполнения НТИ никакое дополнительное оборудование для проведения исследований не было приобретено. Все использованное оборудование являлось собственностью кафедры. Источник питания Applied Electronics APEL-M-5HIPIMS-1k стоимостью 265000 рублей был приобретён менее 5 лет назад, поэтому необходимо рассчитать амортизационные расходы оборудования на период проведения исследований. Срок полезного использования данного объекта, согласно классификации основных средств 5 лет. В данном случае годовая норма амортизации будет 20% (100% / 5 лет). Годовая сумма амортизационных отчислений составит 53000 рублей (265 000 рублей x 20%). Ежемесячные отчисления составляют 4417 рублей.

Длительность работ по осаждению покрытий составила 1 месяц. Следовательно, в стоимость проекта входят амортизационные отчисления на сумму 4417 рублей.

#### **4.5 Основная заработная плата**

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме и дополнительная заработная плата научно-производственного персонала. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы. Баланс рабочего

времени, и расчет основной заработной платы представлены в таблице 4.12 и 4.13, соответственно.

Таблица 4.12 – Баланс рабочего времени.

Показатели рабочего времени	Руководитель	Дипломник
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
-выходные дни	52	52
-праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
-отпуск	48	48
-невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251



Таблица 4.13 – Расчет основной заработной платы

п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоёмкость, чел.-дн.	Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), руб.
		Руководитель (инженер)	1	9893	9893
		Магистрант (инженер)	1	9893	9893
Итого:				19786	19786

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (5)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата  $Z_{осн}$  руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб} \quad (6)$$

где  $T_{раб}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн. (таблица 14);  $Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Значит, для руководителя:

$$Z_{осн} = 9893 \cdot 1,3 = 12860,9 \text{ рублей}$$

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (7)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб. (в качестве месячного оклада магистранта выступает оклад инженера, который составляет 9893 руб.);  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 45 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6 - дневная неделя;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (в рабочих днях) (табл.14). Тогда, для руководителя:

$$Z_{дн} = \frac{12860,9 \cdot 10,4}{251} = 532,9 \text{ рублей}$$

Для магистранта:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{12860,9 \cdot 10,4}{251} = 532,9 \text{ рублей}$$

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot k_{\text{р}} \quad (8)$$

где  $Z_{\text{б}}$  – базовый оклад, руб.;  $k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3.

Результаты расчета основной заработной платы представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Результаты расчета основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{б}}$ ,руб.	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$ ,руб.	$Z_{\text{дн}}$ ,руб.	$T_{\text{раб. раб. дн.}}$	$Z_{\text{осн}}$ ,руб.
Руководитель	9893	1,3	12860,9	532,9	66	35171,4
Инженер	9893	1,3	12860,9	532,9	159	84731,1
Итого $Z_{\text{осн}}$						119902,5

#### 4.6 Отчисления на социальные нужды

Величина отчисленной во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (11)$$

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

Отчисления на социальные нужды (30,2 % от статьи заработной платы) составили 36210,56 руб.

#### 4.7 Накладные расходы

Накладные расходы – это затраты на управление и хозяйственное обслуживание и расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Накладные расходы состоят из затрат на электроэнергию и водоснабжение во время работы установки.

$$C_{\text{накл}}(\text{электроэнергия}) = 5,8 \cdot 6 \cdot 8 \cdot 20 = 5568 \text{ рублей}$$

Где 5,8 – цена в рублях за кВт·ч энергии, 6 – мощность установки в кВт, 8 – рабочее время в день, 20 – количество дней работы установки.

$$C_{\text{накл}}(\text{водоснабжение}) = 63,29 \cdot 1,8 \cdot 20 \cdot 8 = 18227,52 \text{ рублей}$$

где 63,29 – цена в рублях за м<sup>3</sup> воды с учетом водоотведения, 1,8 – потребление воды м<sup>3</sup> в час, 8 – рабочее время в день, 20 – количество дней работы установки.

$$C_{\text{накл}} = 5568 + 18227,52 = 23795,52 \text{ рублей.}$$

Таблица 1 – Группировка затрат по статьям

Вид работ	Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты	Амортизационные расходы	Осн. зар. плата	Доп. зар. плата	Отчисления на соц. нужды	Оплата работ, выполняемых сторонними организациями	Прочие прямые расходы	Накладные расходы	Итоговая себестоимость
Осаждение плёнок карбида титана в плазме с использованием дуальной магнетронной распылительной системы	35900	4417	119902,5	-	36210,56	-	-	23795,52	220225,58

Установлено, что бюджет затрат НТИ составил 220225,58 руб.

## 4.8 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта (табл. 4.15) включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты.

Таблица 4.15 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Выход из строя магнетрона	Задержки в выполнении плана	2	3	Средний	Регулярный осмотр и проверка всех систем, чистка камеры и подложек	Ошибки работы установки, загрязнение трубопровода в охлаждения, человеческий фактор
2	Соблюдение всех шагов подготовки образцов	Не корректные результаты	3	5	Высокий	Проверить каждый шаг	Человеческий фактор

## 4.9 Оценка сравнительной эффективности исследования

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

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как

знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как: этот показатель нужно рассчитать, сравнив стоимость своего проекта с аналогичным проектом

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}},$$

где – интегральный финансовый показатель разработки;

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

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

$$I_{\Phi}^p = \frac{220225,58}{300000} = 0,734$$

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 разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

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

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p,$$

где  $I_m$  – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;  $a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;

$b_i^a$ ,  $b_i^p$  – балльная оценка  $i$ -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже.

Таблица 4.16 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта.

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект		Аналог	
		$b_i^p$	$I_m^p$	$b_i^a$	$I_m^a$
1. Твёрдость покрытия	0,25	5	0,8	4	0,6
2. Модуль упругости	0,15	5	0,8	4	0,6
3. Адгезия покрытия	0,15	4	0,65	3	0,60
4. Износ покрытия	0,2	5	0,6	4	0,5
5. Трение покрытия	0,13	4	0,6	4	0,5
6. Морфология поверхности	0,12	4	0,5	4	0,45
<b>ИТОГО</b>	<b>1</b>	<b>27</b>	<b>3,95</b>	<b>23</b>	<b>3,3</b>

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

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p}, \quad I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a}$$

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p} = \frac{3,95}{0,734} = 5,38;$$

$$I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a} = \frac{3,3}{1} = 3,3$$

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

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a} = \frac{5,38}{3,3} = 1,63$$

где  $\mathcal{E}_{ср}$  – сравнительная эффективность проекта;  $I_{мэ}^p$  – интегральный показатель разработки;  $I_{мэ}^a$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Таблица 4.17 – Сравнительная эффективность разработки.

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,728	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,95	3,3
3	Интегральный показатель эффективности	5,38	3,3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,63	



## **Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность»**

Была проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности научного исследования в данной области. Также данное исследование было рассмотрено с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения относительно существующих на рынке конкурентов. С помощью SWOT-анализа были определены сильные и слабые стороны проекта, а также изучены и учтены рыночные возможности и угрозы. На основе этого плана был разработан график работы и спланирован бюджет проекта, который составил 220225,58 рублей.

## **5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

### **Введение**

В данной магистерской работе проводилось исследование влияния мощности магнетрона на структурные и функциональные свойства износостойкого покрытия - карбида титана.

Процесс осаждения покрытия проводился в вакуумно-плазменной установке. Данное исследование предполагает работу с высоким напряжением и газом- аргонном. Объектом исследования являются образцы из карбида титана, а предметом являются структурные и функциональные свойства данных покрытий.

Оценка структурных и функциональных свойств анализировалась с помощью ПК.

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**

Знание и строгое соблюдение правил техники безопасности являются обязательными для всего персонала. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа, и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом (ГОСТ 12.0.004-2015 ССБТ. Организация обучения безопасности труда. Общие положения).

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

Сотрудник, допущенный к работе на лабораторной вакуумно-плазменной

установке должен быть не моложе 18 лет, не иметь медицинских противопоказаний, пройти вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте. К самостоятельной работе может быть допущен работник 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 необходимо проводить с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца [26].

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

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 (ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты).

## **5.2 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, в качестве примера рисунок 5.2.1 иллюстрирует зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости.

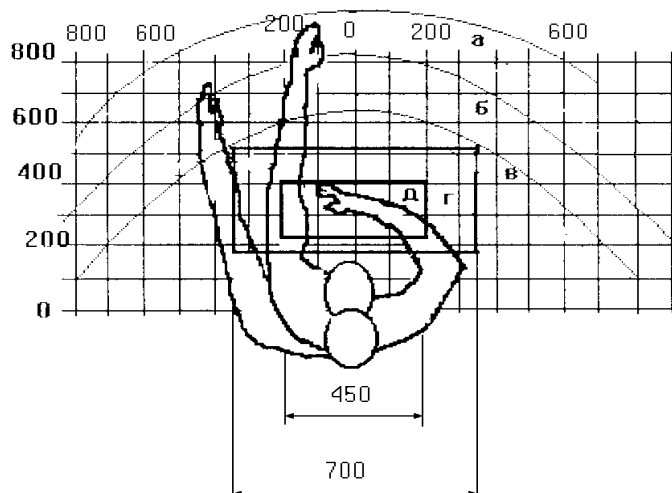


Рисунок 5.2.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

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

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680–800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. 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 так же 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. [27]

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100–300 мм от края.

### 5.3 ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Выпускная работа выполнялась вакуумной установке по дуальному магнетронному осаждению. Согласно приведённой выше классификации, были выделены опасные и вредные производственные факторы при работе, представленные в таблице 5.3.1.

Таблица 5.3.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003–2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
2. Отсутствие естественного света	+	+	+	СанПин 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение»
3. Повышенный уровень электромагнитного излучения	+	+	+	Электрические поля промышленной частоты. ГОСТ 12.1.002-84. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96.

4. Повышенный уровень шума	-	+	+	ГОСТ 12.1.029-80 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация» ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности
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
6. Фактор, обладающий свойствами химического воздействия на организм.	-	+	-	ПНД Ф 12.13.1-03 «Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения)», ПОТ Р М-004-97 «Межотраслевые правила по охране труда при использовании химических веществ»

## **5.4 АНАЛИЗ ОПАСНЫХ И ВРЕДНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ**

### **5.4.1 Отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении**

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха.

Длительное воздействие на человека неблагоприятных метеорологических условий резко уменьшает его самочувствие, снижает производительность труда и часто приводит к заболеваниям [28].

Выполняемые работы относятся к 6 категории работ. К данной категории относятся работы с интенсивностью энергозатрат 121–150 ккал/ч (140–174 Вт), производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением.

Температура наружных поверхностей технологического оборудования, ограждающих устройств, с которыми соприкасается в процессе труда человек, не превышает 45 °С.

Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с СанПиН 2.2.4.548-96 и приведены в таблице 5.4.1.

Таблица 5.4.1 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23–25	40–60	0,1
Тёплый	23–25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека — не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность — 40%, скорость движения воздуха — 0,1 м/с, температура

летом — 20–25 °С, зимой — 13–15 °С. В лаборатории осуществляется вынужденная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

#### **5.4.2 Отсутствие естественного света**

Согласно СП 52.13330.2016 [29] 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 150 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.

#### **5.4.3 Расчёт светильников и их размещение**

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина помещения  $A = 5,7$  м, ширина  $B = 4,3$  м, высота = 3,7 м. Высота рабочей поверхности над полом  $h_p = 1,0$  м. Согласно СНиП 23-05-95 необходимо создать освещенность не ниже  $E = 150$  лк, в соответствии с разрядом зрительной работы.



Площадь помещения:

$$S = A \times B, \quad (5.1)$$

где  $A$  – длина, м;  $B$  – ширина, м.

$$S = 5,7 \times 4,3 = 24,51 \text{ м}^2 \quad (5.2)$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор  $\rho_c=50\%$ , свежепобеленного потолка  $\rho_{\text{п}}=70\%$ . Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен  $K_3=1,5$ . Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп  $Z=1,1$ .

Выбираем лампу дневного света OSRAM DULUX L 32W/840 2G11, световой поток которой равен  $\Phi_{\text{лд}} = 2900$  Лм.

Выбираем светильники ССП-158 32Вт 4000К IP65 LLT 4690612008950 Этот светильник имеет одну лампу мощностью 32 Вт, длина светильника равна 1150 мм, ширина – 60 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda$ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем  $\lambda=1,1$ , расстояние светильников от перекрытия (свес)  $h_c = 0,3$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p, \quad (5.3)$$

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

Высота светильника над полом, высота подвеса:

$$h_n = H - h_c = 3700 - 300 = 3400 \quad (5.4)$$

Высота рабочей поверхности над полом:  $h_{\text{рп}} = 800$ .

Расчетная высота, высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_{\text{рп}} = 3400 - 800 = 2600 = 2,6 \text{ м} \quad (5.5)$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,6 = 2,86 \text{ м} \quad (5.6)$$

Уточните формулу в методичке Число рядов светильников в помещении:

$$Nb = \frac{B - \frac{2}{3}L}{L} + 1 = \frac{4,3 - \frac{2}{3} \cdot 2,88}{2,88} + 1 = 1,82 \approx 2 \quad (5.7)$$

Число светильников в ряду:

$$a = \frac{A - \frac{2}{3}L}{L_{CB} + 0,5} = \frac{5,7 - \frac{2}{3} \cdot 2,88}{1,195 + 0,5} = 2,23 \approx 3 \quad (5.8)$$

Общее число светильников:

$$N = Na \cdot Nb = 2 \cdot 3 = 6 \quad (5.9)$$

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

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2,88}{3} = 0,953 \text{ м} \quad (5.10)$$

Размещаем светильники в два ряда. На рисунке изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

Однако необходимо провести дополнительные расчеты:

$$4300 = L_2 + \frac{2}{3}L_3 + 2 \cdot 1150 \quad (5.11)$$

$$L_2 = \frac{(4300 - 2300) \cdot 3}{5} = 1200 \quad (5.12)$$

$$l = \frac{L_2}{3} = \frac{1200}{3} = 400 \quad (5.13)$$

Аналогичные расчеты проводим для длины комнаты:

$$5700 = L_1 + \frac{2}{3}L_1 + 2 \cdot 60 \quad (5.14)$$

$$L = \frac{(5700 - 120) \cdot 3}{5} = 3348 \text{ мм} \quad (5.15)$$

$$l = \frac{L_1}{3} = \frac{3348}{3} = 1116 \text{ мм} \quad (5.16)$$

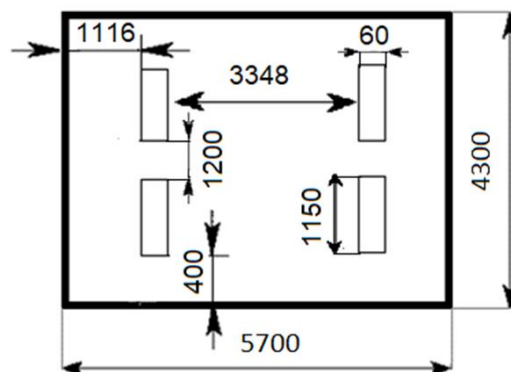


Рисунок 5.4.1 – Схема размещения светильников в помещении

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A+B)} = \frac{5,7 \cdot 4,3}{2,6 \cdot (5,7+4,3)} = 0,94 \quad (5.17)$$

Для коэффициентов отражения берутся приблизительные значения:

= 50% и потолка = 30%. Значения коэффициента использования светового потока светильников с люминесцентными лампами примем равным 53 %.

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\Pi} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_{з} \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 5,7 \cdot 4,3 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{4 \cdot 0,53} = 2861,42 \text{ лм} \quad (5.18)$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{ЛД} - \Phi_{\Pi}}{\Phi_{ЛД}} \cdot 100\% \leq 20\%; \quad (5.19)$$

$$\frac{\Phi_{ЛД} - \Phi_{\Pi}}{\Phi_{ЛД}} \cdot 100\% = \frac{2900 - 2861,42}{2900} \cdot 100\% = 1,3\%. \quad (5.20)$$

Таким образом:  $-10\% \leq 1,3\% \leq 20\%$  , необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Таким образом, в производственном помещении площадью 24,51 м<sup>2</sup>, где ведутся работы с установкой, в соответствии с характеристикой зрительной работы (грубая, очень малой точности), для создания освещенности данного помещения не ниже  $E_H = 200$  лк, необходимо четыре светильника ССП-158 (две лампы мощностью 32 Вт каждая).

Определяем электрическую мощность осветительной установки:

$$P = 4 \cdot 32 = 128 \text{ Вт}$$

#### 5.4.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Экран и системные блоки ПЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно СанПиН 2.2.4.548-96 [30], напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот от 5Гц до 2кГц — 25В/м;
- в диапазоне частот от 2 до 400 кГц — 2,5В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

– в диапазоне частот от 5Гц до 2кГц — 250нТл;

– в диапазоне частот от 2 до 400 кГц — 25нТл;

В остальное рабочее время интенсивность облучения не должна превышать 10 мкВт/см<sup>2</sup>. Для лиц, профессионально не связанных с облучением, и для населения в целом ППМ не должен превышать 1 мкВт/см<sup>2</sup>.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

1. Увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
2. Применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам СанПиН 2.2.4.548-96 конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

#### **5.4.5 Повышенный уровень шума**

Повышенный уровень шума ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, вызывает психические и физиологические нарушения, снижающие работоспособность и создает предпосылки для общих и профессиональных заболеваний (тугоухость, неврит слухового нерва и др.), а также для производственного травматизма [31]. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим

оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

При работе механических и электромеханических изделий часто возникают шумы. Основными источниками шума являются механический и криогенный насосы. Форвакуумный насос работает только во время создания вакуума в камере, шум от которого не более 60 дБ, что соответствует допустимому уровню шума в лабораториях для проведения научных экспериментов, который не должен превышать 60 дБ [32]. Механический насос нужен для создания первоначального вакуума, после этого он отключается. Криогенный насос отделён от оператора, и располагается в подвальном помещении.

Снижение шума, воздействующего на человека на рабочих местах до значений, не превышающих допустимые, достигается применением средств и методов коллективной защиты, применением средств индивидуальной защиты. Работающих в шумоопасных зонах, администрация снабжает средствами индивидуальной защиты, которыми являются специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противошумовые каски, защитное действие которых основано на изоляции и поглощения звука.

В качестве материалов для шумозащитных экранов применяют минеральную вату, композитные материалы, пластмассы, поликарбонаты, древесина, металлы, кирпичную кладку, бетон.

#### **5.4.6 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека**

Неисправность проводки установки может стать причиной поражения электрическим током. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. Пороговый не отпускающий ток составляет 50 Гц (6–16мА). Защита от воздействия электрического тока осуществляется путем проведения организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий [33].

Источником опасности в помещении лаборатории 101 является вакуумная установка. Так как поражение электрическим током может произойти при прикосновении к токоведущим частям, находящимся под напряжением, на которых остался заряд или появилось напряжение.

Электробезопасность должна обеспечиваться конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты. Электроустановки и их части выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности.

Согласно ГОСТ 12.2.003-91 Используемое помещение относится к 3 классу с повышенной опасностью, так как в данном помещении возможно одновременное прикосновения человека к имеющей соединение с землей металлоконструкцией здания с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования, с другой стороны. Также присутствует ядовитый взрывоопасный газ. Граничные значения напряжений, при повышении которых требуется выполнение защиты от косвенного прикосновения для помещений с повышенной опасностью составляет  $>25$  В переменного тока и  $>60$  В постоянного тока [34].

Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия:

1. Содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами;
2. Своевременно проводить техническое обслуживание;
3. Соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием;
4. Проводить инструктаж для работников.

В качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием могут быть использованы:

1. Изоляция токоведущих частей;
2. Малое напряжение в электрических цепях;
3. Защитное заземление, зануление, защитное отключение;
4. Применение разделяющих трансформаторов;

5. Использование оболочек и блокировок для предотвращения возможности случайного прикосновения к токоведущим частям и ошибочных действий или операций;

6. Защитные средства и предохранительные приспособления.

Безопасным для организма человека можно считать переменный ток силой не выше 0,05 А ток силой более 0,05 - 0,1 А опасен и может вызвать смертельный исход.

Безопасным напряжением для человека считается напряжение 42 В в нормальных условиях и 12 В в условиях повышенной опасностью (сырость, высокая температура, металлические полы и др.).

## **5.5 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 [30].

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 плазмы аргона с углеродными покрытиями.

Утилизация продуктов реакций состоит из:

1. Демонтаж металлических конструкций и сбор углеродных осадений;
2. Сбор и регенерация газа (метана), полученного в ходе процесса травления.

### **Воздействие на атмосферу**

Выбросы газообразных веществ в атмосферу происходят только через вытяжную систему при наличии фильтров. Все газы безопасны для окружающей

среды. Для перехода к безотходным производствам в лаборатории необходимо осуществлять сбор водорода в специальные емкости (в настоящее время он выпускается в воздух).

### **Воздействие на гидросферу**

Воздействие на гидросферу не оказывается, поскольку вода используется только для охлаждения паромасляного насоса ускорителя без контакта с загрязняющими веществами. Радиоактивные отходы в производственном процессе не образуются.

### **Воздействие на литосферу**

Накапливаемые производственные отходы складываются в стальной бак на входе в производственное помещение и далее утилизируются. Организация сбора, вывоза, утилизации и переработки бытовых и промышленных отходов является полномочиями органов местного самоуправления в области обращения с отходами и регулируется Федеральным законом Российской Федерации от 24 июня 1998 года № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», Федеральным законом от 10 января 2002 года № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», Федеральным законом от 30 марта 1999 года № 52-ФЗ «О санитарно – эпидемиологическом благополучии населения», а также санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами [35].

По мере отработки, в источнике питания и в насосах меняется масло. Согласно п.6. ГОСТ Р 56828.42-2018 [36], обращение с отходами отработанных масел включает следующие основные этапы:

1. Сбор отработанных масел;
2. Накопление или хранение отработанных масел отдельно или в смеси;
3. Транспортирование отработанных масел;
4. Подготовка отработанных масел к утилизации;
5. Утилизация отработанных масел;
6. Обращение с вторичными отходами.



Отработанное масло с насосов установки сливается в емкости, не хранится в помещении, а сдается в Отдел главного инженера ТПУ, в основные задачи которого входит осуществление производственного экологического контроля в области охраны окружающей среды и экологической безопасности в целях обеспечения выполнения в процессе хозяйственной и иной деятельности мероприятий по охране окружающей среды, рациональному использованию природных ресурсов, а также в целях соблюдения требований в области охраны окружающей среды, установленных законодательством в области охраны окружающей среды [36], и утилизируется в соответствии с правилами утилизации [35].

Подложки, которые имеют дефекты, то есть не пригодные для дальнейшей работы, отправляются на переплавку.

## **5.6 БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

В данном помещении используются (обращаются) негорючие вещества и горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива. Также в данном помещении расположены баллоны с инертными газами (азот, аргон, водород, аммиак).

Работники допускаются к работе только после прохождения инструктажа о мерах пожарной безопасности, во всех помещениях вывешены таблички с указанием номера телефона вызова пожарной охраны и таблички с направлением пути эвакуации и план эвакуации.

В лаборатории расположены огнетушители порошковые ОП-4(з)- АВСЕ-02 (предназначен для тушения твердых, жидких и газообразных веществ и электроустановок до 1000 вольт).

Причинами возникновения пожара могут быть:

1. Нарушение правил эксплуатации электрического оборудования;
2. Курение в неустановленных местах;
3. Перегрузка электрических сетей;
4. Нарушение правил пожарной безопасности;

## 5. Неправильное хранение возгорающихся веществ.

При работе на установке используются баллоны с аргоном и аммиаком, водородом. Эксплуатация баллонов связана с рядом опасных факторов. Наполненный сжатым газом баллон обладает большой энергией, и если в нем образуется отверстие, то газ истекает из него с критической скоростью.

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, находящихся под высоким давлением описаны. В целях безопасности, выполнены общие правила эксплуатации баллонов:

1. Баллоны установлены вертикально и надежно закреплены в таком положении металлическим хомутом, а также защищены от падения на них сверху каких-либо предметов.

2. Баллоны с газом, устанавливаемые в помещении, находятся от радиаторов отопления и других отопительных приборов на расстоянии не менее 1 метра и от печей и других источников тепла с открытым огнем не менее 5 метров. При невозможности выдержать необходимое расстояние, необходимо применять защитные экраны, предохраняющие баллоны от местного разогрева, располагая баллон не ближе 0.1 м от экрана. Установленные баллоны также необходимо предохранять от действия солнечных лучей [37].

3. Выпуск газов из баллона производится через редуктор, предназначенный исключительно для данного газа и окрашенный в соответствующий цвет [38].

В процессе работ на ионно-плазменной установке могут возникнуть аварийные чрезвычайные ситуации:

1. Короткое замыкание в силовых цепях питания оборудования;
2. Разгерметизация газовых баллонов (возникает опасность взрыва);
3. Отключение подачи холодной воды;
4. Возникновение пожара.

При коротком замыкании в силовых цепях питания оборудования необходимо:

1. Отключить пульт управления ускорителя от сети;

2. Обесточить ионно-плазменную установку, установив в нижнее положение ручку рубильника.

При разгерметизации баллона с аммиаком необходимо покинуть помещение, оставив включенной вентиляцию до полного исчезновения запаха.

При отключении холодной воды при работе паромасляного насоса необходимо закрыть затвор высоковакуумной откачки.

При несчастном случае с наличием пострадавших необходимо:

1. Принять меры по освобождению пострадавшего от действия травмирующего объекта;
2. Оказать пострадавшему первую помощь в зависимости от вида травм;
3. Составить в известность о случившемся руководство и принять меры к эвакуации пострадавшего в лечебное учреждение или вызвать скорую (тел. 03, моб. 103).

Возможными причинами пожара на установке могут стать:

1. Неисправность электропроводки;
2. Перегрузка;
3. Плохие контакты;
4. Отсутствие воды в трубопроводе;
5. Плитка промасленного насоса;
6. Пробой конденсаторов и воспламенение масла в них.

Для предотвращения возникновения пожара применяются следующие шаги: проверка персонала на предмет знаний пожарной безопасности, выполнение работ в соответствии с правилами, плановый осмотр установок. В случае возникновения пожара, алгоритм действий персонала следующий:

7. вызвать пожарный расчет (тел. 01, моб. 101);
8. отключить электропитание, выключить вентиляцию;
9. закрыть двери, чтобы убрать сквозняк и доступ кислорода для горения;
10. воспользоваться первичными средствами пожаротушения (огнетушитель ВП, УК или П) или песком. При невозможности - начать эвакуацию людей из помещения [14];

11. сообщить о пожаре администрации лаборатории и института.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАЗДЕЛУ «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Данная работа предполагает взаимодействие с вакуумной установкой, источниками высокого напряжения и взрывоопасными газами. Результаты данного раздела содержат в себе основные рекомендации и указания, которые следует выполнять при исследовании процесса осаждения углеродных покрытий в среде газа – аргона, выделены опасные и вредные производственные факторы, а также существующие средства и методы защиты, описаны организационные и технические мероприятия, проводимые перед началом работы. Данные указания возможно в дальнейшем использовать не только при получении покрытий в рабочем газе – аргоне, но также и в других газах, либо в их смесях.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Д.Локтев, Е.Ямашкин. Основные виды износостойких покрытий, – Наноиндустрия, 5/2007
- 2 В. Титов. Виды покрытий и твердых сплавов для режущего инструмента, – Н М – Оборудование, 2004
- 3 N. Saoula, N. Madaoui, A. Z. Ait Djafer, K. Annou, R. Tadjine, S. Shrivastava, R. M. Erasmus, J. D. Comins, Mechanical Properties of TiN, TiC and TiCN Coatings Deposited by Magnetron Sputtering Deposition Technique, pages: 521, 2015, VALARDOCS
- 4 Yas'kiv, O.I.; Pohrelyuk, I.M.; Fedirko, M.V.; Proskurnyak, R.V.; Mater. Sci., 2008, vol. 44, (3), p. 352.
- 5 Knotek, O.; Loffler, F.; Kramer, G.; Surf. Coat. Technol., 1993, vol. 61, p. 320.
- 6 Guu, Y.Y.; Lin J.F; Wear, 1997, vol. 210, p. 245.
- 7 Hsieh, J.H.; Tan, A.L.K.; Zeng, X.T.; Surf. Coat. Technol., 2006, vol. 201, p. 4094.
- 8 Zheng, J.; Hao, J.; Liu, X.; Gong, Q.; Liu, W.; Appl. Surf. Sci., 2013, vol. 268, p. 195.
- 9 Yasuoka, M.; Wang, P.; Murakami, R.; Surf. Coat. Technol., 2012, vol. 206, p. 2168
- 10 C.J. Kang , D.W. Kim , CO. Park & John S. Chun, Chemical Vapor Deposition of Titanium Carbide on AISI M2 Tool Steels and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC Ceramic Composite
- 11 Дрималовский Е.И., Памфилов Е.А., Особенности Нанесения Твердых Покрытий на режущий инструмент, – 2019. – 33-36 с.
- 12 Кнуняц И.Л., Химическое осаждение из газовой фазы, Научное издание: Москва, – 1998.
- 13 C.J. Kang , D.W. Kim , CO. Park & John S. Chun, Chemical Vapor Deposition of Titanium Carbide on AISI M2 Tool Steels and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC Ceramic Composite, - Materials & Manufacturing processes, – №5(1), – 63-78, – 1990.

- 14 S. Inoue, Y. Wada, K. Koterazawa, Deposition of TiC films by dual source dc magnetron sputtering, – Vacuum 59., – 2000.
- 15 Jan-Eric Sundgren, Formation and Characterization of Titanium Nitride and Titanium Carbide Films Prepared by Reactive Sputtering, Linkoping Studies in Science and Technology. Dissertations. – № 79., – P. 18-21.
- 16 Райзер, Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов // М.: Наука, – 1980. – 158 с.
- 17 Носырев А.Н., Исследование многослойных наноструктур и теплофизических процессов синтеза интерметаллидов на их основе, – диссертация, – 2004.
- 18 AjitBehera, P.Mallick, S.S.Mohapatra, Nanocoatings for anticorrosion: An introduction, – 2020. – P. 227-243.
- 19 Харлан Ю.А., Мартинкевич Я.Ю., Особенности вакуумно-дугового нанесения покрытий, – 2017. – с. 215-217.
- 20 H. Randhawa, Cathodic Arc Plasma Deposition of TiC and TiC<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub> films, – Thin Solid Films, №153. – 1987. – 209-218.
- 21 Хокинг, М. Металлические и керамические покрытия / В. Васантасри, П. Сидки. // М.: Мир, 2000. – 516 с.
- 22 Olayinka Oluwatosin Abegunde, Esther Titilayo Akinlabi, and Oluseyi Philip Oladijo, Evaluation of Process Parameters Influence on the Mechanical Properties of RF Magnetron Sputtered TiC Thin-Film Coating, – 2006. – P.145-157.
- 23 V. Kirchhoff, T. Kopte, T. Winkler, M. Schulze, P. Wiedemuth, Dual magnetron sputtering (DMS) system with sine-wave power supply for large-area coating, – Surface and Coatings Technology, –№98. – 1998. – P.828-833.
- 24 V. O. Oskirko, A. N. Zakharov, A. P. Pavlov, A. S. Grenadyorov, V. A. Semenov, Unipolar and bipolar mode of deep oscillation magnetron sputtering, – Journal of Physics: Conference Series, –1393, –2019.
- 25 Коршунова Л. А., Кузьмина Н. Г. Техничко-экономическое обоснование инновационного проекта. Методические указания по выполнению

- экономического раздела ВКР для студентов энергетических специальностей всех форм обучения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012.
- 26 СП 2.4.3648-20 "Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи.
- 27 СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. Санитарные правила и нормы.
- 28 СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений;
- 29 СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение;
- 30 СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений;
- 31 ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
- 32 Суворов, Г.А. Шум и здоровье (эколого-гигиенические проблемы) / Г.А. Суворов, Л.В. Прокопенко, Л. Д. Якимова - М: Союз, 1996. - 150 с.
- 33 ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
- 34 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.7.1322-03 «Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления».
- 35 ГОСТ Р 56828.42-2018 Наилучшие доступные технологии. Утилизация отработанных масел. Показатели для идентификации.
- 36 Положение об Отделе главного инженера Управления эксплуатации объектов Томского политехнического университета. ТПУ, 2020.
- 37 Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Инструкция по охране труда при хранении и эксплуатации



газовых баллонов [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://docs.cntd.ru/document/1200039245>, свободный.

38 Инструкция №15326-006-11 по охране труда при эксплуатации баллонов со сжатым и сжиженным газом.

39 ГОСТ 22.0.01-94. Безопасность в ЧС. Основные положения.

# Приложение А

(справочное)

## Sputtering of titanium carbide films using a dual magnetron sputtering system

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ91	Гусс Л.Е.		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент НОЦ Б. П. Вейнберга	Сиделёв Д. В.	к.т.н		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков школы ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения иностраннных языков ШБИП	Зеремская Юлия Александровна	к. филол. н		

## Content

1 Wear-resistant TiC coating.....	105
1.1 Properties and applications of TiC-based films	106
1.2 Methods of producing TiC films	107
1.2.1 Arc evaporation .....	107
1.2.2 Principle of operation of magnetron sputtering .....	110
1.2.3 High-frequency magnetron sputtering .....	112
1.2.4 Principle of operation of the dual magnetron system .....	115
References .....	118

# 1 WEAR-RESISTANT TiC COATING

## 1.1 Properties and applications of TiC-based films

Wear-resistant coatings (metallic and non-metallic coatings), characterized by wear resistance under contact friction conditions. The coating applied to the tool must provide good hardness and toughness in order to maintain the cutting properties of the tool for a long time. Protective coatings based on various refractory materials increase the service life, thermal stability and oxidation resistance of the tool base. The variety of currently used methods of physical deposition of wear-resistant coatings is reduced to evaporation or ion sputtering of titanium or its alloys.

The structure and adhesion of the coating of the tool, as well as its cutting properties, are determined by many parameters: the degree of ionization, the rate and density of the flux of the sprayed particles, the optimization of the coating deposition temperature, various modes of application, the configuration of the technological equipment, preliminary ion etching or alloying, and many other features that determine the structure the coatings themselves and the structure of the "coating - substrate" interface [1].

Transition metal nitrides, carbides and carbonitrides are of great interest to the thin film community because of their superior properties, including hardness, chemical stability, electrical conductivity, and ultra-high melting points, which make transition metal carbides and nitrides potential candidates for several applications [2-7]. Among these compounds are titanium carbide (TiC), titanium nitride (TiN) and titanium carbonitride Ti (C, N) used as hard ceramic materials that can be applied to titanium alloys, steels, carbides and aluminum alloys to change their mechanical properties of surfaces, for example: hardness and wear resistance [8]. In addition, these compounds are considered high-tech materials commonly used in microelectronics, space technology, aircraft and semiconductor technology due to their unique characteristics such as high hardness and high Young's modulus, low friction, good corrosion resistance, good thermal conductivity, higher electrical conductivity, and higher melting points. These coatings have been prepared in a variety of ways and spraying is one of the most successful methods. Sputter deposition of these thin films has special advantages such as low impurity levels and easy control of the deposition rate. This method also allows

producing thin films of various morphologies and crystallographic structures. When a sputtering method is used to apply thin films, the properties of the thin films vary greatly depending on the sputtering conditions, such as the reactive gas pressure, the total pressure, and the bias voltage of the substrate. Therefore, it is of interest to study the effect of deposition parameters on TiN, TiC, TiCN coatings. In this work, we investigate the effect of the substrate bias voltage on the properties of thin films of titanium compounds obtained by the method of high-frequency reactive magnetron sputtering.

## **1.2 Methods of producing TiC films**

At present, all methods for producing coatings are conventionally divided into two large groups - physical (PVD - physical vapor deposition) and chemical (CVD - chemical vapor deposition).

Titanium carbide (TiC) is a hard, wear-resistant and chemically inert material. Thus, TiC coating on cutting tools, metalworking tools, ball bearings, carbide and ceramic tools is widely used in practice. The thin TiC layer reduces friction and prevents interdiffusion and abrasion. Thus, it was found that a coating with a thickness of about 2-10 microns increases its service life by more than several hundred percent.

Today, titanium carbide films that have been grown by both chemical and physical vapor deposition methods have been discovered. CVD techniques are widely used in industry due to their uniformity, commitment, and mass production capability. CVD deposition kinetics have been studied for various deposition parameters in many earlier studies. [9]

It is known that TiC films are one of the most promising hard protective coatings. Thermal or plasma chemical vapor deposition is widely used for the deposition of hard TiC coatings. In CVD processes, films are deposited on substrates in the temperature range of 500-1050 °C[10].

### **1.2.1 Arc evaporation**

Typical deposition conditions:

- Working environment: vacuum  $10^{-3}$  ...  $10^{-2}$  Pa. Reactive gases N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>;
- P = 0,01 ... 1 Pa,
- T = 300 ... 600 ° C;

- Evaporation of metals in the cathode spot of the arc discharge. Deposition of highly ionic coatings.

A vacuum is created in the chamber. A voltage is applied between the anode, the ignition electrode and the cathode made of the applied material. The evaporation process begins with the ignition of a vacuum arc (characterized by high current and low voltage). This action is performed by briefly touching the igniting electrode on the cathode surface, which forms one or several point (ranging from a few microns to tens of microns) emission zones ( the so-called "cathode spots") on the cathode (target) surface where the entire discharge power is concentrated.

The local temperature of the cathode spot is extremely high (about 15000 ° C), which causes intense evaporation and ionization of the cathode material in them and the formation of high-speed (up to 10 km / s) plasma flows propagating from the cathode spot into the surrounding space. A separate cathode spot exists only for a very short period of time (microseconds), leaving a characteristic microcrater on the cathode surface, then the self-extinguishing and self-initiation of a new cathode spot occurs in a new region on the cathode, close to the previous crater. Visually, this is perceived as moving the arc along the cathode surface.

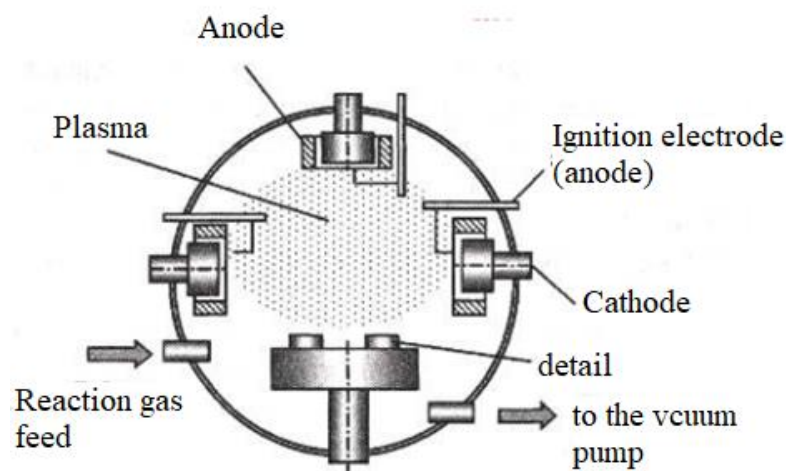


Figure 1.1 - Vacuum-arc plant

To control the arc along the cathode surface, it can be influenced by the imposition of an electromagnetic field. The arc itself is a current-carrying conductor.

In a vacuum arc, an extremely high power density is concentrated in the cathode spots, which results in a high level of ionization (30–100%) of the resulting plasma flows, consisting of multiply charged ions, neutral particles, clusters (macroparticles, drops). If

a chemically active gas is introduced into the vacuum chamber during evaporation, its dissociation, ionization and excitation can occur when interacting with the plasma flow, followed by plasma chemical reactions with the formation of new chemical compounds and their deposition in the form of a film (coating).

A significant difficulty in vacuum arc evaporation is that if the cathode spot remains at the evaporation point for too long, it emits a large amount of microparticles or a droplet phase. These macroinclusions reduce the properties of the coating due to their poor adhesion to the substrate and can be greater than the thickness of the coating (see through the coating). It is worse, if the material of the target cathode has a low melting point (for example, aluminum): in this case, the target under the cathode spot can melt, causing the cathode holder material to evaporate, or water cooling the cathode begins to flow into the vacuum chamber, which can lead to an emergency.

To solve this problem, the cathode spot is continuously displaced in one way or another over a large and massive cathode having sufficiently large linear dimensions. As mentioned above, magnetic fields are used to control the movement of the cathode spots over the cathode surface. For the same purpose, when using cylindrical cathodes, during operation (evaporation), they can be imparted with a rotational movement. By preventing the cathode spot from staying in one place for too long, low-melting metal cathodes can be used while reducing the amount of unwanted droplet phase (Figure 1.2) [11].

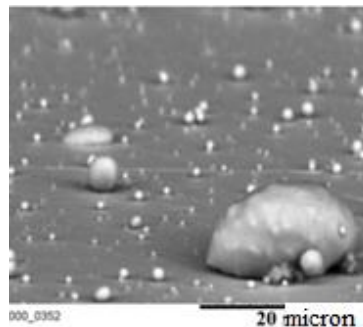


Figure 1.2 - Micro-droplet fraction

To combat the micro-droplet fraction, screen systems, magnetic separators, arc current modulation systems, etc. are used [12].

Despite the fact that the coatings are of good quality, obtained by using the vacuum arc method, the disadvantage is the difficulty in creating a uniform deposition on

a large area of substrates, and the formation of a micro-droplet fraction is also an obvious disadvantage [13, 14].

In the article microhardness of TiC films strongly depends on the substrate temperature. The measured microhardness of TiC films was in the range of 2900-3300 kgf mm<sup>-2</sup> for films deposited in the temperature range of 350-550 ° C.

However, films deposited at temperatures of 600 ° C and higher showed a noticeable increase in hardness, which was usually in the range of 3700-4000 (kgf mm<sup>-2</sup>). These results are summarized in Table 1. Similar results were obtained by the Bunch group on ARE2v3 deposited films.

Table 1 - Dependence of microhardness on substrate temperature

Substrate temperature (°C)	Microhardness (50 gf load) (kgf · mm <sup>-2</sup> )
350	2950
500	3300
600	3700
700	4000

It was found that at temperatures above 650 ° C films obtained at temperatures above 650 ° C, consisting of single-phase cubic TiC. No noticeable presence of hydrogen or a hydride phase was observed in these films. The high-temperature films were found to have a lattice parameter of 4.32 Å and had a preferred orientation (200). No stress was measured in such films. TiC films are not suitable for cutting due to hydrogen inclusions at low temperatures [15].

### 1.2.2 Principle of operation of magnetron sputtering

The main interrelated characteristics that determine the target sputtering rate include the discharge voltage, discharge current, working gas pressure, and magnetic field induction near the cathode surface. Argon is commonly used as the working gas in magnetron sputtering systems.

Typical deposition conditions:

- Working environment: pure gases of argon, nitrogen, oxygen;



- $P = 0,05\text{--}1 \text{ Pa}$ ;
- $T = 60 \dots 6000 \text{ }^\circ \text{C}$ ;
- Ion sputtering of metals in a magnetron discharge.

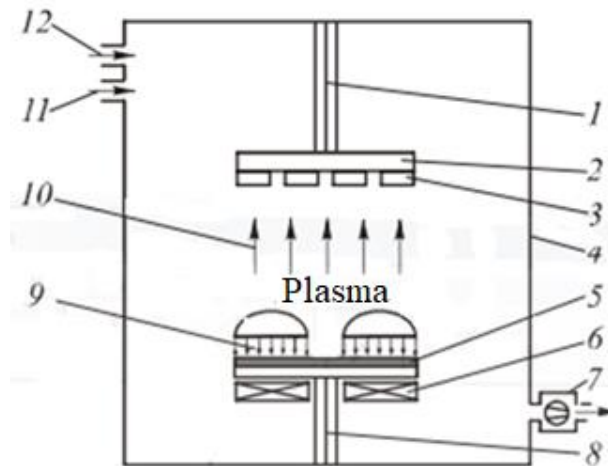


Figure 1.3 - Magnetron sputtering

- 1 - supply of bias voltage; 2 - tool holder; 3 - tool; 4 - vacuum chamber; 5 - deposited material; 6 - magnetic system for magnetron sputtering; 7 – vacuum pump; 8 - supply of discharge voltage; 9 - ion beam; 10 - sprayed material; 11 - reaction gas; 12 - inert gas;

Advantages of the magnetron sputtering method:

- 1) Dense micro- (nano-) crystalline structure of metal and ceramic coatings in the complete absence of a droplet phase
- 2) Possibility of coating heat-sensitive materials at low temperatures;
- 3) The widest range of coatings for various purposes;
- 4) High properties of metal and ceramic coatings [16].

Unlike a glow discharge, where an electron that does not experience collisions will be freely accelerated by an electric field until it leaves the region of the cathode potential drop (dark cathode space), the presence of a transverse magnetic field forces the electron to bend its trajectory under the action of the Lorentz force. With a sufficient magnetic field, the electron will return to the cathode with almost zero energy and will again begin accelerated motion under the action of the electric field. The trajectory of its movement will be a cycloid, the electron drifts along the cathode surface in a direction perpendicular to both the electric and magnetic fields. The electron is in a "trap", which it can leave only by making a collision with another particle. Then it will switch to a new trajectory, located

a little further from the cathode, and so on until the fields weaken, magnetic one due to moving away from the poles of the magnetic system, electric one due to plasma screening. Due to the presence of a trap, the efficiency of ionization by emitted electrons increases many times over, which makes it possible, in contrast to a conventional diode discharge, to obtain a high ion current density, and hence high sputtering rates at relatively low pressures of the order of 0,1 Pa and below.

In this study, we deposited Ti-C films with different Ti-C composition ratios using magnetron sputtering with two sources and investigated the effect of the applied power ratio to C and Ti targets on the structure, composition, and morphology of the deposited coatings.

### **1.2.3 Radio frequency magnetron sputtering**

HF plasma is conducted by means of electron ionization, which oscillates at a frequency of the RF magnetron of 13,56 MHz. At this frequency, the ions could not follow these vibrations due to their mechanical inertia. This excitation is much more efficient than ionization by non-oscillating secondary electrons, which leads to a decrease in the RF discharge voltage. During the positive half cycle, the target does not act as a cathode, but as an anode. Consequently, the plasma density in front of the RF substrate is much higher. Figure 1 shows the potential distribution in which positive ions ( $\text{Ar}^+$ ,  $\text{O}^+$  and  $\text{Ca}^+$ ) are accelerated in the cathode fall of  $V_p - V_{dc}$  and the target is sputtered. At the same time, electrons and negative ions ( $\text{O}^-$ ) moved from the target to the substrate, which, together with the reflected neutral argon atoms, arrived at the substrate and produced the growth of the coating. Influence of energetic particles on a solid surface during ion-assisted growth during an RF discharge: secondary and backscattered electrons, as well as reflected ions and neutrals cause a higher plasma density in front of the substrate for RF excitation and therefore a higher saturation current of ions for growing film.

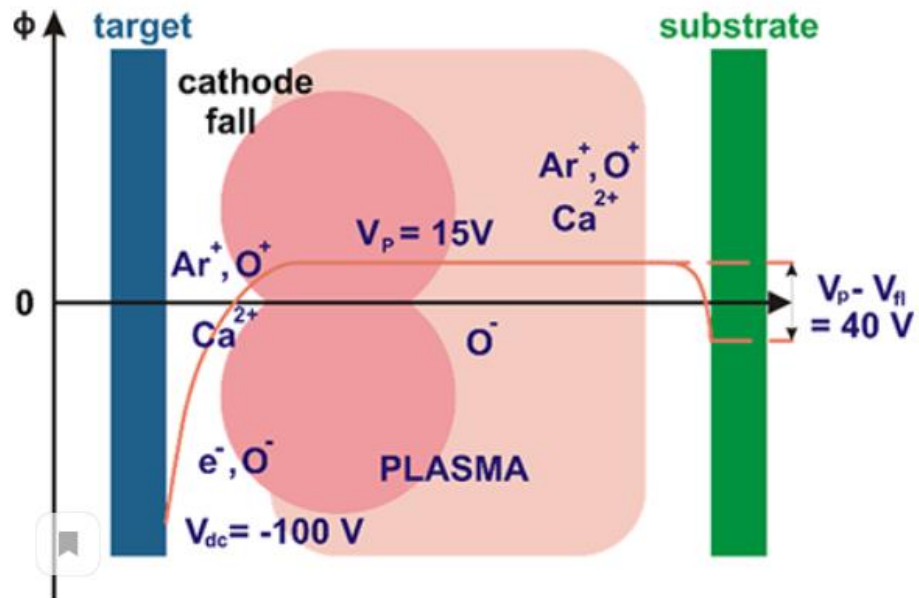


Figure 1.4 - Potential distribution in a sputtering magnetron discharge excited by RF

It can be seen that electrons are trapped outside the substrate, and only those with a sufficiently high energy will be able to pass through the potential barrier and arrive at the substrate, even if they have a low current. Both neutral particles and high-energy negative ions (such as  $O^-$ ) are capable of damaging the substrate.

The properties of films deposited by sputtering with an RF magnetron are strongly influenced by the bombardment of the growing film with particles from the sputtering target and from the plasma. The latter is determined by the deposition parameters, such as the pressure and composition of the working gas, the distance from the target to the substrate, and the bias voltage of the substrate. Control of these parameters is necessary to change the structural properties of the hydroxyapatite (HA) coating, its composition and mechanical characteristics.

Figure 1.5 shows a schematic diagram of a switching power supply.

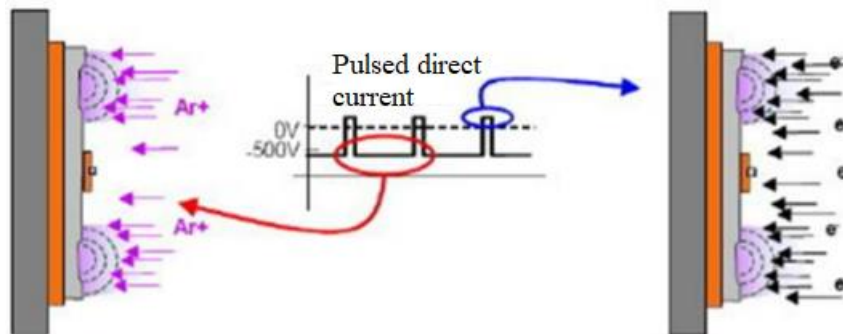


Figure 1.5 - Schematic representation of a pulsed supply

In the article, TiC thin films were deposited in an RF magnetron sputtering coater that was specially designed for this process using a substrate (CpTi) The TiC target used is 99.99% pure. The target-substrate distance was maintained throughout the experiment. The evacuation of the spraying chamber to a base pressure of  $1,13 \cdot 10^{-3}$  Pa was carried out during the entire coating process before spraying began. The reason for the low pressure is to provide a long free path for the collision between the target and the substrate and allows contamination can be controlled and minimized.

After evacuation, the system is refilled with argon to a partial pressure of  $2,5 \cdot 10^{-1}$  Pa. An argon flow rate of  $12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  was used and a constant operating pressure was maintained. Maintaining a constant pressure helps to place many argon atoms in the path of ions and ejected coatings. After the formation of the plasma, sputtering of the target is started and the shutter is removed. Preliminary spraying was carried out for all samples 5 min. before the main spraying. The substrate was placed directly above the target on a rotating disk to ensure uniform distribution and condensation of the target on the substrate surface. The target material was cleaned after each cycle to prevent charge storage, thereby reducing the sparking effect.

Sputtering experiments were carried out by varying three main parameters of magnetron sputtering, namely RF power, sputtering time and temperature. Optimization of the experimental matrix was carried out using the Taguchi method. The Taguchi Method is a simple, effective and powerful design tool for statistical analysis and optimization. This reduces the number of experiments and limits the influence of external factors that cannot be controlled on the system. Full orthogonal Taguchi L9 array with three factors at three levels: low, medium and high and only nine deposition cycles. Time range is from 2 to 3 hours, power range is from 150 to 250 W and temperature range is from 80 to 1000 °C.

The average values of hardness and elastic modulus were 4,54 GPa and 121,32 GPa, respectively. The coefficient of friction is in the range of 0.031 and 0.075, wear tests showed values from 0.447 to 0.496.

From analysis of Taguchi's results using SNR analysis and ANOVA, it can be concluded that RF power is the most effective control factor for both hardness and Young's modulus. The friction coefficients for both microscratches and wear are

significantly improved, and the process parameters are the main determining factors as a result of the reaction [17].

### 1.2.4 Principle of operation of the dual magnetron system

When using bipolar pulsed technology (DMS system, Fig. 1.7), two magnetrons alternately operate as an anode and a cathode, respectively. With this method, an electrically conductive anode will always be available because it becomes the cathode during the next half-wave. In this way, it can be freed from the applied insulating layers.

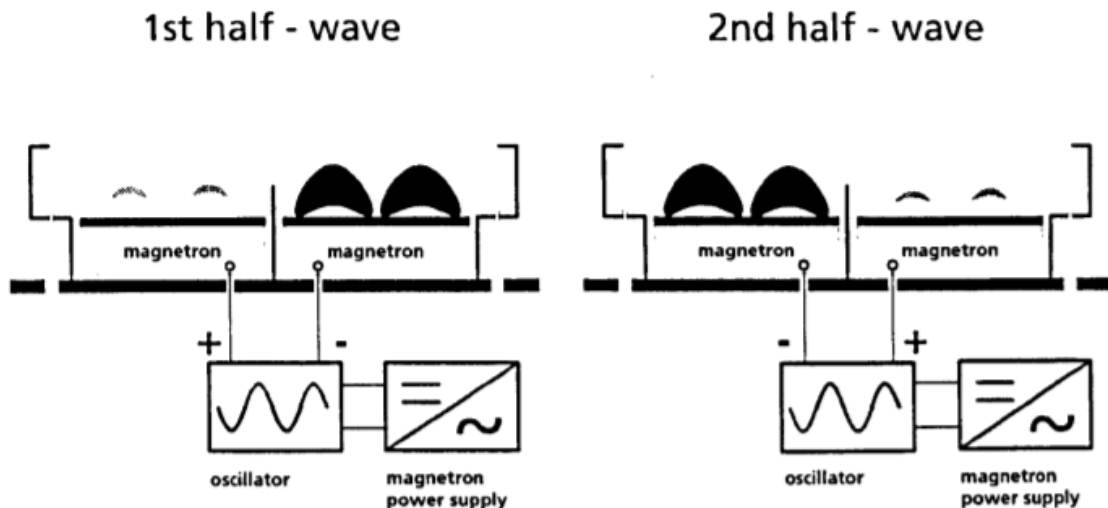


Figure 1.6 - Bipolar technology with a dual magnetron sputtering system [18]

Let's take a closer look at the unipolar and bipolar DMS modes of operation and their main differences. Figure 1 shows diagrams and voltage sections to explain how the DMMS works in both modes. In a bipolar mode, the voltage source is isolated from the grounded vacuum chamber and they are connected only to the DMMS targets, as shown in Figure 1a. All unloading current flows through the target. During the first half cycle, target M1 acts as a cathode and target M2 acts as an anode.

During this time, the M1 target begins to attract positively charged ions from the plasma and the accelerated ions bombard this target and transfer a positive charge to it. During the second period, the polarity of the voltage changes and the targets change roles. Positively charged ions affect the negative field of the cathode and the M1 target cannot be sputtered in the future. Therefore, the polarity of the two magnetrons changes and a positive charge is applied to the M1 target and a negative charge to the M2 target. At this time, the M1 target attracts electrons to itself and, under the influence of the negative charge of the electrons, neutralizes the positive charge of the ions, turning them into

atoms. This clears M1 target. At this time, target M2, which has a negative charge, attracts negatively charged ions.

The result is alternative target sputtering. In a bipolar mode, the anode has a smaller area than conventional magnetron systems, in which the walls of the vacuum chamber are usually the anode. In the case of a small space anode, an increased anode voltage drop is required to keep electron current equal to the discharges. An increase in the voltage drop of the anode leads to an increase in the potential at the target relative to the ground. As a result, a small positive (with respect to the beginning) voltage appears on the target, which acts as an anode during the pause between negative pulses.

In a unipolar mode, the voltage source is connected to the vacuum chamber through diodes D1 and D2, as shown in Figure 1B. When the voltage on target M2 is positive (with respect to ground), diode D2 turns on, and the discharge current is distributed between targets M2 and the walls of the chamber. Since negative voltage is applied to M1, diode D1 remains off. In the second half of the period, the situation changes and diode D1 turns on and connects target M1 to the vacuum chamber. Since the anode has a large area in this mode, the voltage drop of the anode does not increase. The amplitude of the positive voltage pulses is only a few volts, which corresponds to a voltage drop across the diode. Therefore, we named this mode UniPolar.

For DOMS, a power supply (PS) was used, the circuit of which is shown in Figure 1.7. Its main parameters are listed in Table 1.

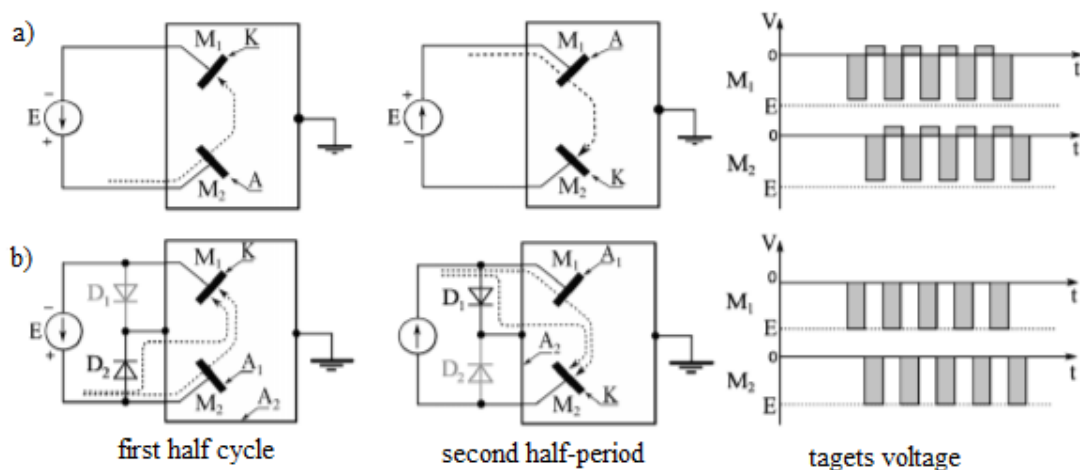


Figure 1.7 - Scheme of bipolar (a) and unipolar (b) models

The use of bipolar pulses can prevent arcing, oxide contamination and dual configuration of the magnetron sputtering system to solve the problem of “anode disappearance” in

reactive magnetron sputtering. In addition, the use of a double system increases the energetic effect of ions on the deposited coating, which significantly affects its properties [19].

## REFERENCES

- 1 В. Титов. Виды покрытий и твердых сплавов для режущего инструмента, – Н М – Оборудование, 2004
- 2 N. Saoula, N. Madaoui, A. Z. Ait Djafer, K. Annou, R. Tadjine, S. Shrivastava, R. M. Erasmus, J. D. Comins, Mechanical Properties of TiN, TiC and TiCN Coatings Deposited by Magnetron Sputtering Deposition Technique, pages: 521, 2015, VALARDOCS
- 3 Yas'kiv, O.I.; Pohrelyuk, I.M.; Fedirko, M.V.; Proskurnyak, R.V.; Mater. Sci., 2008, vol. 44, (3), p. 352.
- 4 Knotek, O.; Loffler, F.; Kramer, G.; Surf. Coat. Technol., 1993, vol. 61, p. 320.
- 5 Guu, Y.Y.; Lin J.F; Wear, 1997, vol. 210, p. 245.
- 6 Hsieh, J.H.; Tan, A.L.K.; Zeng, X.T.; Surf. Coat. Technol., 2006, vol. 201, p. 4094.
- 7 Zheng, J.; Hao, J.; Liu, X.; Gong, Q.; Liu, W.; Appl. Surf. Sci., 2013, vol. 268, p. 195.
- 8 Yasuoka, M.; Wang, P.; Murakami, R.; Surf. Coat. Technol., 2012, vol. 206, p. 2168
- 9 C.J. Kang , D.W. Kim , CO. Park & John S. Chun, Chemical Vapor Deposition of Titanium Carbide on AISI M2 Tool Steels and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC Ceramic Composite
- 10 Дрималовский Е.И., Памфилов Е.А., Особенности Нанесения Твердых Покрытий на режущий инструмент, – 2019. – 33-36 с.
- 11 Райзер, Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов // М.: Наука, – 1980. – 158 с.
- 12 Носырев А.Н., Исследование многослойных наноструктур и теплофизических процессов синтеза интерметаллидов на их основе, – диссертация, – 2004.
- 13 AjitBehera, P.Mallick, S.S.Mohapatra, Nanocoatings for anticorrosion: An introduction, – 2020. – P. 227-243.
- 14 Харлан Ю.А., Мартинкевич Я.Ю., Особенности вакуумно-дугового нанесения покрытий, – 2017. – с. 215-217.



- 15 H. Randhawa, Cathodic Arc Plasma Deposition of TiC and TiC<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub> films, – Thin Solid Films, №153. – 1987. – 209-218.
- 16 Хокинг, М. Металлические и керамические покрытия / В. Васантасри, П. Сидки. // М.: Мир, 2000. – 516 с.
- 17 Olayinka Oluwatosin Abegunde, Esther Titilayo Akinlabi, and Oluseyi Philip Oladijo, Evaluation of Process Parameters Influence on the Mechanical Properties of RF Magnetron Sputtered TiC Thin-Film Coating, – 2006. – P.145-157.
- 18 V. Kirchhoff, T. Kopte, T. Winkler, M. Schulze, P. Wiedemuth, Dual magnetron sputtering (DMS) system with sine-wave power supply for large-area coating, – Surface and Coatings Technology, –№98. – 1998. – P.828-833.
- 19 V. O. Oskirko, A. N. Zakharov, A. P. Pavlov, A. S. Grenadyorov, V. A. Semenov, Unipolar and bipolar mode of deep oscillation magnetron sputtering, – Journal of Physics: Conference Series, –1393, –2019.