

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 16.04.01 Техническая физика

Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

МАГИСТЕРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Влияние индукции магнитного поля в области подложки и расстояния до плазмогенератора на структуру и механические свойства плёнок $\alpha\text{-C:H:SiO}_x$

УДК 539.216.2:537.811

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Ярославцева О. А.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник ИСЭ СО РАН	Гренадёр А.С.	К.Т.Н		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Кащук И. В.	К.Т.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	Сечин А. А.	К.Т.Н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦВ	Кривобоков В.П.	д.ф-м.н		

Томск – 2020 г.

**Результаты обучения магистров
направления 16.04.01 «Техническая физика»
(профиль «Пучковые и плазменные технологии»)**

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
P1	Демонстрировать и использовать теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, составляющих основу современной технической физики, вскрывать физическую сущность проблем, возникающих при проектировании и реализации радиационных и плазменных технологий.	Требования ФГОС (ОПК-2, ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 1). <i>CDIO Syllabus</i> (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012
P2	Профессионально эксплуатировать современное научное и технологическое оборудование и приборы в процессе создания и реализации радиационных и плазменных технологий	Требования ФГОС (ОПК-1). СУОС ТПУ (УК 2, УК 3). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035, 29.008
P3	Заниматься научно-исследовательской деятельностью в различных отраслях технической физики, связанных с современными радиационными и пучково-плазменными технологиями, критически анализировать современные проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследований, выбирать адекватные методы решения задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты	Требования ФГОС (ОПК-5, ОПК-7, ПК-5, ПК- 8). СУОС ТПУ (УК 1). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035, 29.008
P4	Самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для прогнозирования результатов воздействия различных радиационных и плазменных потоков на вещество, а также оптимизации параметров радиационных и пучково-плазменных технологий, с использованием современных физико-математических методов, стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ОПК-6, ПК-6, 7). СУОС ТПУ (УК 6). <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035
P5	Разрабатывать и оптимизировать современные пучковые и плазменные технологии с учётом экономических и экологических требований, проводить наладку и испытания технологических установок и аналитического оборудования, решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ.	Требования ФГОС (ПК-12,13,14). СУОС ТПУ (УК 6). <i>CDIO Syllabus</i> (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035, 29.008
P6	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, формулировать технические задания, составлять техническую документацию, разрабатывать и использовать средства автоматизации, анализировать варианты проектных, конструкторских и технологических решений, разрабатывать проекты и проектную документацию для создания оборудования, реализующего пучковые и плазменные технологии.	Требования ФГОС (ПК-15, 16). СУОС ТПУ (УК 2, УК3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011
P7	Заниматься научно-педагогической деятельностью в области технической физики, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую и научно-	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11). СУОС ТПУ (УК 1, УК3, УК5). <i>CDIO Syllabus</i> (4.7). Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
	исследовательскую работу обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии	и FEANI . Профессиональный стандарт 40.011, 01.004
P8	Владеть приёмами и методами работы с персоналом, находить оптимальные решения при реализации технологий и создании продукции, управлять программами освоения новой продукции и технологий.	Требования ФГОС (ОПК-3). СУОС ТПУ (УК 1, УК3). <i>CDIO Syllabus</i> (4.7). Критерий 5 (п. 2.4) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 01.004
P9	Анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области радиационных и пучково-плазменных технологий, внедрять новые наукоёмкие технологии, готовить документы по защите интеллектуальной собственности, разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов.	Требования ФГОС (ПК-5). СУОС ТПУ (УК 1, УК2). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035
P10	Развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять своё научное мировоззрение.	СУОС ТПУ (УК 6). Критерий 5 (п. 2.6) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Активно общаться в научной, производственной и социально-общественной сферах деятельности, свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового общения	Требования ФГОС (ОПК - 7). СУОС ТПУ (УК4, УК5). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4, 3.3). Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P12	Участвовать в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, проявлять инициативу, брать на себя всю полноту ответственности, уметь находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач.	Требования ФГОС (ОПК,3 ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 3). <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**



федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

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

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
В.П. Кривобоков

(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации (выпускной квалификационной работы бакалавра (специалиста), магистерской диссертации)
--

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ81	Ярославцевой О. А.

Тема работы:

Влияние индукции магнитного поля в области подложки и расстояния до плазмогенератора на структуру и механические свойства плёнок а-С:H:SiO _x	
Утверждена приказом директора	52-46/с от 21.02.2020 г.
Срок сдачи студентом выполненной работы:	8.06.2020 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе (публикации в периодической печати, отчетность организации, самостоятельно собранный материал и т.д.).	Объектом исследования являются кремний-углеродные а-С:H:SiO _x плёнки, получаемые плазмохимическим методом с использованием биполярного напряжения смещения.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Анализ литературных источников по существующим защитным покрытиям и методам получения алмазоподобных покрытий; осаждение кремний-углеродных покрытий; исследование влияния магнитного поля и расстояния

<i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	плазмогенератор/подложка на структуру и механические свойства плёнок; раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»; раздел «Социальная ответственность»
--	---

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Актуальность и применение 2. Цель работы 3. Схема рабочей камеры 4. Аналитическое оборудование 5. Твёрдость и модуль упругости 6. Рамановские спектры а-C:H:SiO _x плёнок 7. Зависимости от величины магнитной индукции 8. Структура полученных покрытий 9. Структура полученных покрытий 10. Механические и трибологические свойства поверхности стали марки 12X18H10T 11. Заключение
---	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент отделения социально-гуманитарных наук Кащук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Ассистент отделения общетехнических дисциплин Сечин Андрей Александрович
Приложение А	Старший преподаватель отделения иностранных языков Утятина Янина Викторовна

Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:

Объект исследований и методы его получения, экспериментальное и аналитическое оборудование	
Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы	21.02.2020 г.

Задание выдал руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник ИСЭ СО РАН	Гренадёр А.С.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Ярославцева О. А.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ81	Ярославцевой Ольге Анатольевне

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

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально–технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ конкурентных технических решений (НИ)	Анализ и оценка конкурентоспособности НИ. SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования.
3. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	Расчет бюджетной стоимости НИ
4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИП)	Определение интегрального финансового показателя, интегрального показателя ресурсоэффективности, интегрального показателя эффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности НИП
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИП
5. Основные показатели эффективности НИП

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Ярославцева Ольга Анатольевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ81	Ярославцевой Ольге Анатольевне

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика/Пучковые и плазменные технологии

Тема ВКР:

Влияние индукции магнитного поля в области подложки и расстояния до плазмогенератора на структуру и механические свойства плёнок $a\text{-C:H:SiO}_x$	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: кремний-углеродные покрытия $a\text{-C:H:SiO}_x$. Область применения: промышленные режущие и трущиеся изделия. Рабочее место: институт сильноточной электроники СО РАН.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	Нормативные документы по правовым нормам трудового законодательства: - Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. от 16.12.2019). Нормативные документы по организационным мероприятиям при компоновке рабочей зоны: - ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. - ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: - микроклимат производственных помещений; - шум на рабочем месте; - освещенность рабочей зоны; - электромагнитное излучение.
3. Экологическая безопасность:	– Область воздействия на атмосферу: газообразные отходы, загрязняющие атмосферу помещения – естественные выделения – пары спирта, с помощью которых происходит очистка подложек, бытовая пыль, электрическая и тепловая энергия; – на гидросферу: отходы, образующиеся в процессе отмывки образцов, в процессе влажной уборки помещения лаборатории, при пользовании водопроводом; – на литосферу: отходы бумаги, офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства.

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> – Возможные ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения: землетрясение, пожар, отключение света, удар током, проникновение посторонних, сильные морозы. – Наиболее типичные ЧС: заморозки и проникновение посторонних.
--	---

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения контроля и диагностики	Сечин Андрей Александрович	К.Т.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Ярославцева Ольга Анатольевна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. В работе 84 с., включая 12 рисунков, 19 таблиц, 30 источников литературы и 1 приложение.

Ключевые слова: кремний–углеродные ($a\text{-C:H:SiO}_x$) покрытия, плазмохимическое осаждение, биполярное напряжение смещения, полифенилметилсилоксан, индукция магнитного поля, расстояние плазмогенератор/подложка.

Объектом исследования являются $a\text{-C:H:SiO}_x$ пленки, полученные плазмохимическим методом при использовании импульсного биполярного напряжения смещения.

Целью работы было изучение влияния индукции магнитного поля в области подложки и расстояния плазмогенератор/подложка на механические свойства $a\text{-C:H:SiO}_x$ плёнок, наносимых плазмохимическим методом с использованием импульсного биполярного напряжения смещения в парах полифенилметилсилоксана (ПФМС).

В процессе работы проводилась оптимизация условий осаждения и исследование механических свойств полученных плёнок.

В результате исследований были получены $a\text{-C:H:SiO}_x$ плёнки с коэффициентом трения $\sim 0,1$ и скоростью износа $8 \cdot 10^{-7}$ мм³/Н·м. Повышение амплитуды отрицательного напряжения смещения приводит к снижению твёрдости и модуля упругости. Также эти параметры снижаются при повышении величины магнитной индукции. Уменьшение расстояния между плазмогенератором и подложкой приводит к увеличению плотности ионного тока на подложку, тем самым повышая механические свойства покрытий.

Содержание

Введение.....	12
1. Объект исследований и методы его получения	14
1.1. Углерод и плёнки на его основе	14
1.2. Свойства и структура углеродных плёнок	15
1.3. Способы получения алмазоподобных углеродных покрытий	17
1.3.1. Способы получения а–С:Н:SiO _x покрытий	18
2. Экспериментальное и аналитическое оборудование	23
2.1. Экспериментальная вакуумная установка для нанесения а–С:Н:SiO _x покрытий	23
2.2. Аналитическое оборудования исследования структуры и свойств а–С:Н:SiO _x плёнок.....	24
3. Результаты исследования структуры и свойств а–С:Н:SiO _x плёнок	26
3.1. Влияние условий осаждения на механические свойства а–С:Н:SiO _x плёнок	26
3.2. Влияние условий осаждения на структуру полученных плёнок	29
3.3. Повышение механических и трибологических свойств стали марки 12X18H10T.....	31
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	33
4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	33
4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования	33
4.1.2. Анализ конкурентных технических решений	33
4.1.3. SWOT–анализ	35
4.2. Планирование научно-исследовательских работ	37
4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования	37
4.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ	38
4.2.3. Разработка графика проведения научного исследования	39
4.3. Бюджет научно–технического исследования (НТИ).....	42
4.3.1. Расчет материальных затрат НТИ	42
4.3.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	43
4.3.3. Основная заработная плата исполнителей темы	44
4.3.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	46

4.3.5. Накладные расходы	47
4.3.6. Формирование бюджета затрат НИП.....	47
4.4.Определение финансовой, бюджетной и экономической эффективности исследования	47
5. Социальная ответственность	51
5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ..	51
5.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	51
5.1.2. Эргономические требования к рабочей зоне	52
5.2. Производственная безопасность	54
5.3. Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	55
5.3.1. Микроклимат производственных помещений	55
5.3.2. Шум на рабочем месте	56
5.3.3. Освещенность рабочей зоны.....	57
5.3.4. Электромагнитное излучение	58
5.3.6. Электробезопасность	59
5.3.7. Пожарная и взрывная безопасность	61
5.4. Организационные мероприятия по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов.....	63
5.5. Экологическая безопасность.....	64
5.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	66
Заключение	69
Список литературы	70
Приложение А (справочное)	74

Введение

Непрерывный прогресс практически во всех областях техники вызывает резкое увеличение рабочих параметров многих механических и биомедицинских систем, которые включают в себя более высокие скорости обработки, повышенную нагрузку и работу в различных средах. Поэтому изучение свойств трения и износа имеет огромное практическое значение при разработке и оптимизации медицинских имплантатов, а также различных компонентов двигателя и механизмов.

В качестве защитных износостойких покрытий используются, например, нитридные покрытия хрома (CrN) или титана (TiN) из-за высоких показателей твёрдости (~ 2000 HV) и термостойкости ($\sim 650^\circ\text{C}$). Но в сравнении с алмазоподобными покрытиями (АПП), нитридные обладают более высоким коэффициентом трения ($\sim 0,5$) наряду с меньшей износостойкостью (в 1,5 раза).

Алмазоподобные углеродные покрытия (a-C) характеризуются низким коэффициентом трения ($\sim 0,2$), твёрдостью (~ 1000 HV) химической инертностью и низкой скоростью износа (менее $10^{-8}\text{мм}^3\text{Н}^{-1}\text{м}^{-1}$).

Несмотря на это, серьёзным недостатком алмазоподобных покрытий являются высокие внутренние напряжения. Максимальная толщина покрытий ограничивается возникновением остаточных напряжений и увеличением их с толщиной покрытия. Внутренние напряжения снижают адгезионную прочность с подложкой. Наличие высоких сжимающих напряжений затрудняет обеспечение хорошей адгезии к поверхности подложки. Так, в алмазоподобных плёнках остаточные напряжения изменяются от 1,5 до 10 ГПа, поэтому нанесение покрытий толщиной более 1 мкм проблематично.

Разновидностью алмазоподобных покрытий являются кремний-углеродные a-C:H:SiO_x плёнки. Толщина кремний-углеродных плёнок, то есть АПП легированных оксидом кремния, может достигать 100 мкм за счет низких внутренних напряжений (< 1 ГПа). Кроме этого, a-C:H:SiO_x плёнки

обладают высокими механическими свойствами (твёрдость $H \approx 25$ ГПа и модуль Юнга $E \approx 200$ ГПа).

Наиболее распространенным методом для осаждения $a\text{-C:H:SiO}_x$ плёнок является метод высокочастотного плазмохимического осаждения (RF PACVD). Применение данного метода в промышленных масштабах усложняется соблюдением условия пропорциональности размеров камеры и подложки. Поэтому использование плазмохимического метода совместно с биполярным напряжением смещения оказывается более перспективным и не менее эффективным при осаждении диэлектрических покрытий на подложки большой площади.

Целью работы являлось изучение влияния индукции магнитного поля и расстояния плазмогенератор/подложка на свойства $a\text{-C:H:SiO}_x$ плёнок, наносимых плазмохимическим методом с использованием импульсного биполярного напряжения смещения в парах полифенилметилсилоксана.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести серию экспериментов по нанесению $a\text{-C:H:SiO}_x$ плёнок при различных условиях осаждения, в частности индукции магнитного поля в области подложки и расстояния плазмогенератор/подложка;
2. Установить зависимости структуры и свойств $a\text{-C:H:SiO}_x$ плёнок от условий осаждения;
3. Выявить оптимальные условия осаждения $a\text{-C:H:SiO}_x$ плёнок, обеспечивающие получение высоких физико-механических свойств;
4. Обеспечить повышение механических и трибологических свойств поверхности стали марки 12Х18Н10Т.

1. Объект исследований и методы его получения

1.1. Углерод и плёнки на его основе

В периодической системе элементов углерод располагается во втором периоде и главной подгруппе четвертой группы. В его атоме содержится шесть электронов – два на внутреннем энергетическом уровне и четыре на внешнем $1s^2 2s^2 2p^2$. Последние два электрона располагаются на отдельных p -орбиталях и являются неспаренными. При переходе атома в возбужденное состояние, возникает валентное состояние с конфигурацией $1s^2 2s^1 2p_x^1 2p_y^1 2p_z^1$. Именно оно характерно для решетки алмаза – тетраэдрическое пространственное расположение гибридных орбиталей, одинаковая длина и энергия связей. Это явление называют sp^3 -гибридизацией. Помимо неё у атома углерода наблюдается также sp^2 - (взаимное наложение s - и двух p -орбиталей) и sp -гибридизация (наложение орбиталей s и p) [1]. Схематичное изображение каждой представлено на рисунке 1.

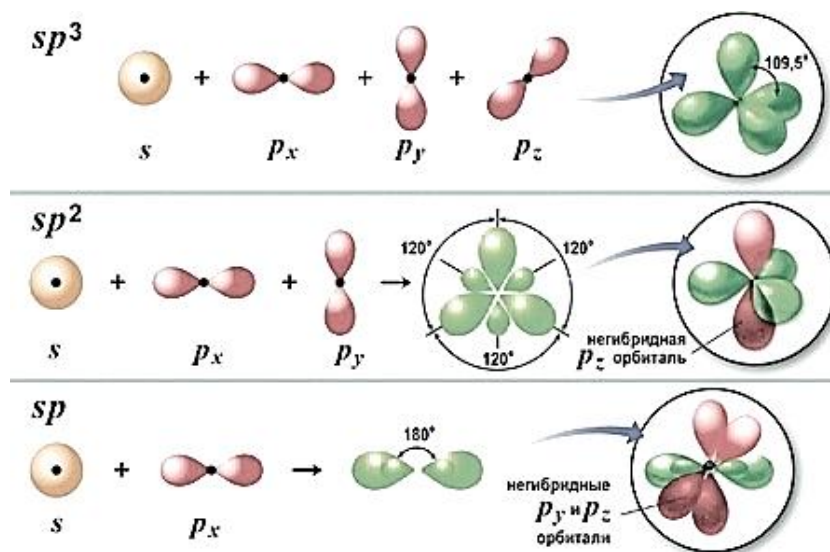


Рисунок 1. Гибридизация атомных орбиталей углерода

В форме простого вещества углерод бывает в виде нескольких аллотропных модификаций – алмаза, графита, карбина (рис. 2). Наиболее интересны с точки зрения технического применения две формы: алмаз и графит.

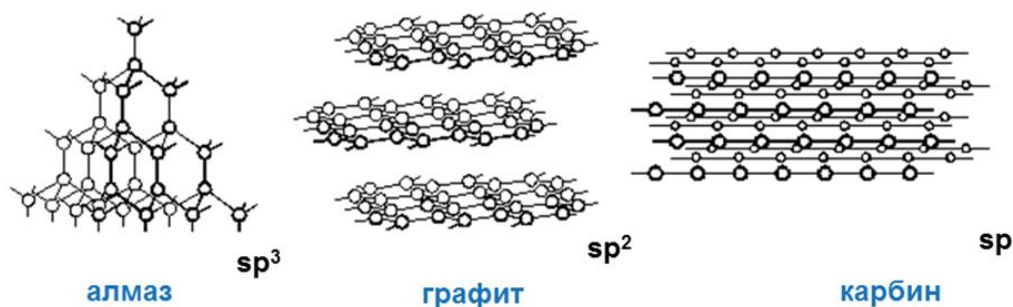


Рисунок 2. Формы существования углерода

Алмаз – один из самых твёрдых материалов. Является диэлектриком, плохо проводящим тепло. Кристаллическая решетка представляет собой основу из атомов углерода. Все атомы углерода имеют сильные связи (sp^3) во всех направлениях. Поэтому алмаз – материал с наивысшей твёрдостью, электроизоляционный, прозрачный [2]. С помощью алмазных наконечников бурят горные породы, сверлят и режут металлы и камни. Графит, в противоположность алмазу мягкий, имеет металлический блеск, проводит тепло и электричество. Всё это объясняется слоистой структурой графита. В ней атомы имеют сильную связь в плоскости и слабую связь между плоскостями (sp^2). В результате получается мягкий, электропроводящий материал с низким коэффициентом трения [3].

Свойства углеродных покрытий зависят от метода, условий их осаждения и определяются процентным соотношением фаз с различной гибридизацией валентных электронов: sp^2 , sp^3 . В зависимости от содержания sp^3 –гибридизированных атомов в структуре углеродной плёнки, концентрации водорода и наличия легирующих примесей, различают несколько модификаций алмазоподобных плёнок: аморфный (a-C, DLC), гидрогенизированный аморфный (a-C:H), тетраэдрический аморфный (ta-C), тетраэдрический аморфный гидрогенизированный углерод (ta-C:H).

1.2. Свойства и структура углеродных плёнок

Структуру алмазоподобных покрытий составляют алмазоподобные и графитоподобные связи, что значительно повышает потенциал износа изделий

с подобным напылением. Такие аморфные углеродные покрытия, обладающие твёрдостью алмаза и коэффициентом трения графита можно наносить в широкой области температур и на различные материалы [3].

Алмазоподобный аморфный углерод

Существует в различных формах. DLC покрытия могут быть аморфными и иметь sp^3 гибридизацию (алмазоподобную). Включения, такие, как водород, sp^2 углерод, необходимы чтобы уменьшить экономические затраты или придать желаемые свойства. Применение DLC увеличивает абразивную износостойкость материала. Износ, трение и электрические свойства делают DLC покрытия привлекательным материалом для применения в медицине. Такие покрытия являются биологически инертными, не вызывают ни токсичных, ни воспалительных реакций. Предполагается хорошая биологическая совместимость DLC покрытий с белками плазмы крови и живыми клетками организма человека.

Гидрогенизированный аморфный углерод

Покрyтия аморфными углерода с содержанием связанного водорода называют гидрогенизированными плёнками ($a-C:H$). Твёрдость покрытий составляет величины от 10 до 30 ГПа [4]. В зависимости от метода осаждения энергетический зазор плёнок составляет от 0,5 до 3,0 эВ, а показатель преломления может варьироваться от 1,5 до 2,5 [5]. Сфера применения достаточно велика – в качестве противоизносных и противоотражающих защитных оптических покрытий, в высокотемпературной электронике, в солнечной энергетике.

Тетраэдрический аморфный углерод

Самым твёрдым является тетраэдрический аморфный углерод ($ta-C$). Твёрдость лежит в пределах значений от 50 до 100 ГПа. Например, покрытие $ta-C$ толщиной всего 2 мкм увеличивает сопротивление обычной нержавеющей стали от абразивного износа, изменяя срок её службы в таком режиме работы от одной недели до 85 лет [6]. Такой $ta-C$ можно рассматривать

как «чистую» форму DLC, поскольку он состоит только из атомов углерода, связанных с sp^3 . Этот тип материала соответствует плотному аморфному материалу, состоящему из неупорядоченных sp^3 -связей, связанному сильными связями, аналогичными тем, которые существуют в неупорядоченном алмазе с предположительно подобной твёрдостью алмаза.

Тетраэдрический гидрогенизированный аморфный углерод

Плёнки с высокой долей атомов sp^3 – гибридного углерода (около 70 %) и содержанием водорода ≈ 30 % называют плёнками аморфного гидрогенизированного тетраэдрального углерода (ta-C:H). Такой материал обладает высокими значениями твёрдости (30–50 ГПа) [7] и модуля Юнга [8]. Используются в качестве защитных инертных покрытий от коррозии металлов и химического воздействия агрессивной среды, в качестве прочных, термостойких изолирующих покрытий в электронике и качестве твёрдых износостойких покрытий.

Особое внимание стоит уделить **аморфным гидрогенизированным кремний–углеродным покрытиям** (a-C:H:SiO_x). Как уже было сказано ранее, a-C:H:SiO_x покрытия имеют ряд преимуществ по сравнению с другими алмазоподобными и являются более перспективным материалом для изучения. Их применение возможно в широком диапазоне производства: от просветляющих оптических (в связи с содержанием sp^2 фазы) до прочных, защитных износостойких покрытий (вследствие содержания sp^3 фазы).

1.3. Способы получения алмазоподобных углеродных покрытий

Существует несколько методов нанесения АПП, отличающихся по своим эксплуатационным характеристикам, что в свою очередь обусловлено различным соотношением в них характерных для всех углеродных образований связей sp^3/sp^2 . Структурное состояние углеродных плёнок зависит от режима конденсации атомов углерода на подложку.

Наибольшее распространение имеет метод получения алмазоподобных покрытий путем химического осаждения на подложку из паровой фазы

(CVD – chemical vapor deposition) из углеводородов, подвергаемых термическому разложению. В этом случае твёрдость плёнок находится в диапазоне $9 \div 40$ ГПа. Такие значения можно объяснить наличием в структуре химической связи атомов водорода, образующихся при разрушении углеводородов и летящих на подложку вместе с атомами углерода. Так получают аморфные гидрогенизированные плёнки. Более сложным методом является получение АПП при помощи плазменного распыления графита в вакуумной камере и осаждению ионов углерода с большой энергией на подложку (PVD – physical vapor deposition). Ключевое отличие этой технологии состоит в том, что концентрация углерода с sp^3 -связями доходит в получаемых АПП до максимально возможного значения – 85%, а твёрдость лежит в промежутке от 50 до 100 ГПа и стремится по своим показателям к монокристаллическому алмазу. Таким методом получают алмазоподобные плёнки $ta-C$ и $a-C$ [9, 10].

Рассмотрим способы получения исследуемых в настоящей работе кремний-углеродных ($a-C:H:SiO_x$) плёнок.

1.3.1. Способы получения $a-C:H:SiO_x$ покрытий

Для получения $a-C:H:SiO_x$ покрытий используют метод плазмохимического осаждения на постоянном токе, высокочастотного плазмохимического осаждения, метод с использованием ионного источника Кауфмана и дугового разряда.

Плазмохимический метод осаждения на постоянном токе (DC PECVD)

В качестве прекурсоров используются соединения, имеющее высокое давление паров при невысоких температурах ($100\text{--}400$ °C; хлориды металлов, металлоорганические комплексные соединения) [11]. Большинство прекурсоров–реагентов для этого метода используются только в жидкой фазе при комнатной температуре. Их необходимо нагреть до собственной температуры испарения и подвести к реактору при помощи газа–носителя.

Если известно давление паров жидкого прекурсора, то его парциальное давление нетрудно посчитать и осуществлять контроль скоростью и объёмом потока газа–носителя. Ключевым фактором получения качественных покрытий данным методом является точность контроля скорости потока газа и интенсивности испарения прекурсоров [11]. В процессе осаждения подложка помещается в реактор, куда подаются пары прекурсора, которые, вступают в реакцию и расщепляются на поверхности или вблизи поверхности нагретой подложки, при этом формируя на поверхности подложки тонкую плёнку требуемого вещества. Вместо тепловой энергии пары реагента активируются быстрыми электронами. Химически активный газ вступает в реакцию, образуя летучее теплочувствительное соединение. При соприкосновении этого газа с поверхностью, нагретой до более высокой температуры, чем испаряемый материал ($T_2 > T_1$), происходит разложение этого соединения и осаждение чистого материала [12].

Преимущества такого метода – сочетание низкого давления в реакторе и низких температур, дающее более однородные по толщине плёнки; хорошие скорости осаждения и качественное покрытие ступенек.

Недостатки: нужно контролировать большее количество переменных процесса по сравнению с другими процессами; стоимость процесса больше из-за требования иметь большее количество элементов; загрязнение осаждаемых плёнок частичками реакций и химическое. Другой недостаток – сильное взаимодействие плазмы с растущей плёнкой. Высокая скорость осаждения требует тщательной отладки реакционной установки [13].

Данным методом осаждали плёнки в работе [14], где изучалось влияние включения кремния на механические свойства и биосовместимость углеродных плёнок. Результаты показали снижение твёрдости с 14 ГПа до 12 ГПа и внутренних напряжений с 1,5 ГПа до 1,0 ГПа для АПП и АПП легированных кремнием, соответственно. Испытания с использованием клеточной культуры показали хорошую адгезию клеток с кремний–

углеродными покрытиями, нанесенными данным методом. Авторы считают, что DC PECVD является многообещающей технологией для создания плёнок в контексте биомедицинских применений и может предоставить альтернативу традиционному процессу RF PECVD.

Метод высокочастотного плазмохимического осаждения (RF PECVD)

Основой высокочастотной (ВЧ) генерации разряда является частотно–модулированное постоянное напряжение в слое пространственного разряда у ВЧ электрода. Суть метода состоит в разложении кремний–углеродных прекурсоров в плазме тлеющего разряда до образования активных компонентов с дальнейшим их осаждением на подложке. В положительном полупериоде электроны плазмы достигают мишень быстрее, чем ионы в отрицательном полупериоде. Таким образом, в среднем по времени мишень получает отрицательный заряд, хотя подается переменное напряжение. В системе с ВЧ полым катодом подложки окружены слоем пространственного заряда, который инициирует ионную бомбардировку покрытия в процессе его напыления [15]. Достоинством этого метода является возможность нанесения АПП на диэлектрические подложки, т.к. заряд не скапливается на их поверхности. ВЧ разряд широко используется в промышленности, но стоимость ВЧ–мощности, низкие скорости осаждения и высокая тепловая нагрузка на подложку осложняют использование этого метода. Кроме того, высокочастотное распыление очень трудно масштабировать, избегая разнотолщинность [15].

В [16, 17] подробно описано влияние параметров осаждения на механические и трибологические свойства $a\text{-C:H:SiO}_x$ плёнок, синтезированных методом RF PACVD. Характеристики полученных плёнок объединены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики $a\text{-C:H:SiO}_x$ покрытий

Напряжение смещения, (В)	Твёрдость, H (ГПа)	Модуль Юнга, E (ГПа)	Остаточные напряжения, (ГПа)	sp^2 , (%)	sp^3 , (%)
200	13,84	95	1,86	64,1	17,4
400	18,34	131	2,33	69,8	18,9
600	16,47	137	1,55	65,2	26,0
800	13,94	93	0,92	67,10	22,70

С увеличением отрицательного потенциала смещения наблюдались более низкие концентрации Si/O. Также наблюдалась повышенная концентрация кремния и связей Si–C, повышаясь с увеличением доли прекурсора в рабочей камере. Кислородсодержащая плазма, особенно при высоких отрицательных напряжениях смещения, может участвовать в поверхностном травлении sp^2 гибридизированного углерода, что может отразиться на увеличении содержания sp^3 гибридизированного углерода и в то же время может быть причиной отсутствия осадков SiO_x , которые при высоких отрицательных потенциалах смещения могут быть просто вытравлены.

Метод с использованием ионного источника Кауфмана

Осаждение покрытий также возможно и нанесением на подложку продуктов плазмохимических реакций в углеводородной плазме, образуемой с помощью ионного пучка, генерируемого автономным ионным источником. Этот метод привлекает тем, что ионные пучки более энергетичны, а многие ионные источники позволяют независимо контролировать траекторию ионов, энергию и их плотность. Возможно нанесение покрытий с помощью протяженного ионного источника с замкнутым дрейфом электронов. Работа ионного источника состоит из подачи газа в зазор между электродами и положительного потенциала на анод. Магнитное поле заставляет электроны совершать замкнутое дрейфовое движение в ускоряющем канале, тем самым многократно ионизировать рабочий газ и формировать плазму. Ускоряющий канал представляет собой зазор, образованный внутренней и внешней частями катода. В плазме происходит разложение кремний–углеродного газа на ионы

и активные частицы, которые затем осаждаются и формируют покрытие на подложке.

В работе [18] исследовались зависимости свойств плёнок от подаваемого напряжения на анод ($800 \div 1800$ В) и напряжения смещения (от 0 до -200 В). В результате, самая высокая полученная твёрдость составила около 23 ГПа при напряжении на аноде 1400 В и около 22,5 ГПа при напряжении смещения -100 В. По мере увеличения напряжения кинетическая энергия ионов повышается. Ионы углерода с высокой кинетической энергией объединяются с оборванными связями и образуют трехмерные поперечные связи, улучшая механические свойства алмазоподобного покрытия.

Выводы к 1 главе:

1. Существует несколько видов углеродных покрытий, отличающихся по процентному соотношению фаз с различной гибридизацией электронов: $a-C$, $a-C:H$, $ta-C$, $ta-C:H$.
2. Основными достоинствами $a-C:H:SiO_x$ плёнок являются низкие внутренние напряжения, низкий коэффициент трения, оптимальное соотношение твёрдости и модуля Юнга.
3. Наиболее предпочтительным для осаждения является высокочастотный плазмохимический метод. Данный метод широко используется при создании $a-C:H:SiO_x$ покрытий из-за отсутствия заряжения подложки и хорошей скорости осаждения, но имеет такой существенный для промышленности недостаток как зависимость размера камеры от подложки, что затрудняет синтез масштабных покрытий.
4. Плазмохимический метод осаждения с использованием биполярного смещения позволяет избежать ограничений RF PECVD метода и, как следствие, позволяет наносить $a-C:H:SiO_x$ покрытия на подложки любой площади, из-за чего и представляет интерес к изучению.

2. Экспериментальное и аналитическое оборудование

2.1. Экспериментальная вакуумная установка для нанесения

а-С:Н:SiO_x покрытий

В данной работе, осаждение а-С:Н:SiO_x плёнок производилось из плазмы несамостоятельного дугового разряда с накалившимся катодом с прикладываемым к подложке импульсным биполярным напряжением смещения подложки. В качестве рабочего прекурсора использовалась кремнийорганическая жидкость – полифенилметилсилоксан (ПФМС). На рисунке 3 представлена блок-схема рабочей камеры, на которой производилось осаждение.

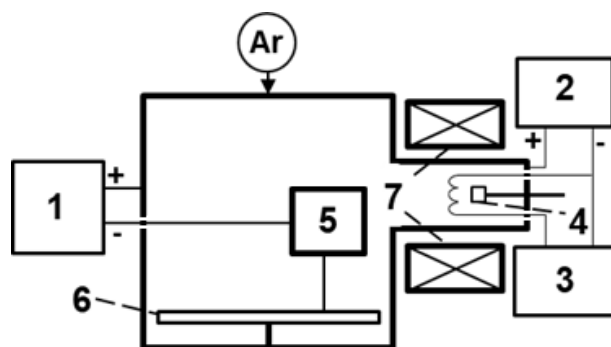


Рисунок 3. Схема рабочей камеры: 1 – источник питания смещения; 2 – источник питания разряда; 3 – источник питания накала; 4 – источник ПФМС; 5 – держатель образца; 6 – вращающийся столик; 7 – электромагнитная катушка

Формирование плазмы происходит за счёт ионизации рабочего газа посредством термоэлектронной эмиссии. Основным источником электронов является разогретый катод (нить накала). Источник паровой фазы нагревается катодом до температуры порядка 500 °С и затем в него непрерывно и равномерно подается ПФМС, где происходит его переход из жидкой в паровую фазу, а на выходе формируется направленный поток паров. Плазмогенератор (источник ПФМС) оснащен электромагнитной катушкой. Держатель образцов, к которому прикладывается биполярное напряжение смещения, находится на вращающемся столике. В получившейся разности потенциалов положительно заряженные молекулы ПФМС ускоряются в

направлении подложки, и, имея некоторую энергию, внедряются в саму поверхность подложки, формируя покрытие.

2.2. Аналитическое оборудования исследования структуры и свойств а-C:H:SiO_x плёнок

Структура полученных плёнок исследовалась методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (Рамановской) на комплексе *Centaur U HR*. Данный метод широко используется при исследовании АПП для оценки содержания в них sp^3 и sp^2 -гибридизированных атомов углерода. Рамановское рассеяние изменяет длину волны падающего света вследствие взаимодействия света с колебательными квантами рассеивающей молекулы (основан на изучении рассеянного света). По результатам Раман спектроскопии можно изучать внутримолекулярные взаимодействия по результатам наблюдения местоположения и интенсивности полос в рамановском спектре [19].

Для определения функциональных групп и структурных связей в плёнке использовалась ИК–Фурье спектроскопия, прибор *Nicolet 5700*. В основе метода лежит Фурье–преобразование интерферограммы двух пучков исследуемого излучения с переменной оптической разностью хода этих пучков, связанное с тем, что излучению каждой длины волны λ соответствует определенная кривая, получаемая с помощью интерферометра Майкельсона (рис. 4) при перемещении подвижного зеркала.

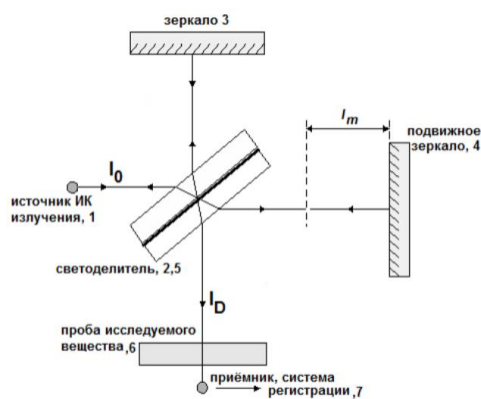


Рисунок 4. Оптическая схема интерферометра Майкельсона

Идущее от источника инфракрасное излучение разделяется полупрозрачным светоделителем на два когерентных пучка. Один из них направляется к неподвижному плоскому зеркалу и обратно отражается от него, другой идет к подвижному зеркалу и также возвращается, где на светоделителе пучки соединяются. Эти два когерентных пучка интерферируют между собой и могут либо усиливать, либо ослаблять друг друга. В результате получается интерферограмма – график зависимости интенсивности зарегистрированного излучения от разности хода пучков. Она содержит всю спектральную информацию о падающем на детектор пучке. Далее интерферограмма пересчитывается путём преобразований Фурье [20]. Измерения производились путем помещения образца в держатель и пропусканием через них пучка света. Полученные результаты были обработаны в программе спектрометра и выведены на экран.

Твёрдость и модуль упругости определялись по методу Оливера-Фарра с помощью наноиндентора *NanoTest 600* при нагрузке 10 мН. Согласно данной методике наконечник индентора Берковича располагался перпендикулярно к поверхности исследуемого образца, под действием прикладываемой силы он вдавливался в образец. Такое вдавливающее воздействие с максимальной нагрузкой выдерживалось строго определённое время (15 секунд), а затем постепенно нагрузка снижалась. В результате происходила упругопластическая деформация. Твёрдость определяется отношением силы вдавливания к площади отпечатка индентора [21].

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

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

4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определённый товар или услуга.

Осаждение кремний-углеродных $\alpha\text{-C:H:SiO}_x$ покрытий позволяет продлить срок службы промышленных и медицинских механизмов, а также повысить прочность готовых изделий.

Потенциальными потребителями готовой продукции являются различные промышленные предприятия, космическая и медицинская отрасль, машиностроение и др.

Цель – изучение влияния расстояния плазмогенератор/подложка на механические свойства $\alpha\text{-C:H:SiO}_x$ плёнок, наносимых плазмохимическим методом с использованием импульсного биполярного напряжения смещения в парах полифенилметилсилоксана (ПФМС). Из-за особенностей используемого метода, необходимо понять влияния параметров осаждения на свойства получаемых покрытий.

4.1.2. Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам.

В качестве объектов сравнения с $a\text{-C:H:SiO}_x$ покрытиями (B_{ϕ}) были выбраны покрытия аморфного ($a\text{-C}$) углерода (B_{k1}) и покрытия аморфного гидрогенизированного ($a\text{-C:H}$) углерода (B_{k2}).

Основные технические критерии следующие:

1. Механические свойства покрытий – высокая прочность и низкий коэффициент трения;
2. Простота метода осаждения;
3. Адгезионная прочность покрытий;
4. Устойчивость к износу;
5. Безопасность в осаждении покрытий.

Для проведения анализа конкурентоспособности разработки будет использоваться оценочная карта, приведенная в таблице 3.

Таблица 3. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес оценки	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	B_{k1}	B_{k2}	K_{ϕ}	K_{k1}	K_{k2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Механические свойства покрытий	0,27	5	2	2	1,35	0,54	0,54
2. Простота осаждения	0,14	5	5	5	0,7	0,7	0,7
3. Адгезионная прочность покрытий	0,11	5	4	3	0,55	0,44	0,33
4. Устойчивость к износу	0,12	5	4	4	0,6	0,48	0,48
5. Безопасность в осаждении покрытий	0,11	5	5	5	0,55	0,55	0,55
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Стоимость материалов	0,08	4	4	4	0,32	0,32	0,32
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,07	5	5	4	0,35	0,35	0,28
3. Область применения покрытий	0,04	5	5	5	0,2	0,2	0,2
4. Финансирование научной разработки	0,06	3	4	4	0,18	0,24	0,24
Итог	1				4,8	3,82	3,64

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$K = \sum B_i \cdot B_i$, где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл i -го показателя.

Итогом данного анализа является заметное преимущество а–С:SiO_x покрытий над продуктами конкурентов. Преимущества имеются как в технических критериях оценки, так и в экономических. Представленные а–С:H:SiO_x покрытия имеют большой интерес в области технических наук и поэтому данной разработке необходимо уделять больше внимания.

4.1.3. SWOT–анализ

SWOT – представляет собой комплексный анализ научно–исследовательского проекта. SWOT–анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта. После того как сформулированы четыре области SWOT переходят к реализации второго этапа. Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно–исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Интерактивная матрица (таб. 4) помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «–» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «–». В рамках третьего этапа должна быть составлена итоговая матрица SWOT–анализа, которая приводится в бакалаврской работе (табл. 5).

Таблица 4. Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	0	–	+	–
	B2	+	+	+	–	–
	B3	+	+	+	+	–
Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	Y1	+	+	+	0	–
	Y2	+	0	0	–	–
	Y3	–	+	–	–	+
Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	–	–	+	0	–
	B2	+	0	+	0	–
	B3	–	–	–	+	+
Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	+	+	+	+	+
	B2	+	0	–	–	+
	B3	–	–	+	–	–

Таблица 5. SWOT–анализ

	Сильные стороны научно–исследовательского проекта: 1. Эффективность технологии. 2. Высокие технические характеристики. 3. Более простой метод получения покрытий в сравнении с остальными. 4. Квалифицированный персонал. 5. Наличие бюджетного финансирования.	Слабые стороны научно–исследовательского проекта: 1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой. 2. Отсутствие компании, которая может наладить крупномасштабное производство. 3. Низкое финансирование; 4. Слабая маркетинговая политика. 5. Сильные конкуренты.
Возможности: 1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ и ИСЭ РАН. 2. Модернизация материалов хозяйственных товаров, повышение срока службы. 3. Технология может стать передовой из–за низкой стоимости и высокой эффективности.	1. Улучшение характеристик инструмента с использованием покрытия при малых финансовых затратах. 2. Придание материалам дополнительных свойств при низкой стоимости и эффективности технологии модернизации являются основополагающими для продвижения продукции и повышении его качества.	1. Увеличение характеристик материала 2. Низкая стоимость и высокая эффективность технологии позволит привлечь к себе большое внимание потенциальных потребителей и увести их от конкурентов

Угрозы: 1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. 2. Разработка конкурентами альтернативных технологий. 3. Несвоевременное финансовое обеспечение из бюджета государства.	1. Изготовленный продукт, имеет основополагающие сильные стороны, для предотвращения угроз. 2. Высокое качество готового продукта и квалифицированные сотрудники позволят поддерживать спрос на технологию. 3. Эффективность технологии и опытный персонал позволят вести разработки в целях улучшения продукта, что предотвратит развитие альтернативных технологий.	1. Устранение слабой маркетинговой политики поможет решить проблему с поиском потребителей. 2. Повышение технологического пакета позволит решить проблему с поиском потребителей и созданием альтернативных технологий. 3. Привлечение финансовых средств позволит модернизировать и усовершенствовать методику получения и контроля покрытий.
--	---	--

Данные покрытия находятся в стадии разработки и технических исследований. SWOT – анализ показал, что данные покрытия имеют ряд преимуществ и недостатков, которые на данный момент на практике не устранены, но в теории уже есть возможности устранения этих проблем. Так же имеются хорошие возможности и сильные стороны проекта, которые в дальнейшем могут быть реализованы и в процессии реализации все негативные стороны проекта будут сведены к минимуму.

4.2. Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

Для выполнения исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры,

техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей, таблица 6.

Таблица 6. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, инженер
	3	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер
	5	Выбор оптимальных параметров для расчёта	Руководитель, инженер
	6	Разработка методик для осаждения покрытий	Руководитель, инженер
Обобщение и оценка результатов	7	Оценка правильности полученных результатов	Инженер
	8	Обработка полученных результатов	Инженер
Оформление отчета по НИР	9	Составление пояснительной записки	Руководитель, инженер

4.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко–днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости t_{oji} используется следующая формула: $t_{oji} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}$, где t_{oji} – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.–дн.; $t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка), чел.–дн.; $t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка), чел.–дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая

параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %. $T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i}$, где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.; $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

4.2.3. Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой: $T_{ki} = T_{pi} k_{\text{кал}}$, где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях; $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности, T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:



$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{366}{248} = 1,47$, где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году; $T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году; $T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году. Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа. Все рассчитанные значения необходимо свести в таблицу 7.

Таблица 7. Временные показатели проведения научного исследования (*Р* – научный руководитель; *И* – инженер)

Название работы	Трудоёмкость работ			Исполнители			
	t_{\min} , чел–дни	t_{\max} , чел–дни	$t_{\text{ож}}i$, чел–дни	Длительность в раб. днях, T_{pi}		Длительность работ в календ. днях, T_{ki}	
				Р	И	Р	И
1. Составление и утверждение технического задания	1	3	2	2	–	3	–
2. Подбор и изучение материалов по теме	10	15	12	6	6	9	9
3. Календарное планирование работ по теме	2	6	4	4	–	6	–
4. Проведение теоретических расчетов и обоснований	3	6	4	–	4	–	6
5. Выбор оптимальных параметров для расчёта	1	3	2	1	1	1	1
6. Разработка методик для осаждения покрытий	6	12	8	4	4	6	6
7. Оценка правильности полученных результатов	3	7	5	–	5	–	7
8. Обработка полученных результатов	10	16	12	–	12	–	18
9. Составление пояснительной записки	10	15	12	6	6	9	9
Итого				23	38	34	56

На основе таблицы 7 строится календарный график–план. График строится для максимального по длительности выполнения работ в рамках научно–исследовательского проекта (таб. 8) с разбивкой по месяцам и декадам за период времени дипломирования. В таблице 9 представлены сведённые данные по рабочим дням исполнителей.

Таблица 8. Календарный план–график проведения НИОКР по теме

№	Вид работ	Т _{кi} · ка л. дн ·	Продолжительность выполнения работ									
			февраль		март		апрель		май		июнь	
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	3										
2	Подбор и изучение материалов по теме	9										
3	Календарное планирование работ по теме	6										
4	Проведение теоретических расчетов и обоснований	6										
5	Выбор оптимальных параметров для расчёта	1										
6	Разработка методик для осаждения углеродных покрытий	6										
7	Оценка правильности полученных результатов	7										
8	Обработка полученных результатов	18										
9	Составление пояснительной записки	9										




 – инженер,  – руководитель,  – совместно.

Таблица 9. Сводная таблица по календарным дням

	Количество дней
Общее количество календарных дней для выполнения работы	65
Общее количество календарных дней, в течение которых работал студент	56
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	34

В результате выполнения данного подраздела разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из участников проекта.

4.3. Бюджет научно–технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

4.3.1. Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi}$, где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования; $N_{расxi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.); C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг и т.д.); k_T – коэффициент, учитывающий транспортно–заготовительные расходы (в данной работе принимается равным 25%).

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями–изготовителями (либо организациями–поставщиками).

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 10.

Отсутствие в таблице разделения на источники финансирования говорит о том, что источник один. Источник финансов в данной работе – ИСЭ СО РАН.

Таблица 10. Материальные затраты

Наименование	Ед. изм.	Кол- во	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
Вольфрамовая нить	шт.	6	40,00	300,00
Полифенил-метилсилоксан	шт.	2	3000,00	7500,00
Фольга	м ²	4	32,00	160,00
Итого, руб.:				7960,00

Из затрат на материальные ресурсы, включаемых в себестоимость продукции, исключается стоимость возвратных отходов.

Под возвратными отходами производства понимаются остатки сырья, материалов и других видов материальных ресурсов, образовавшиеся в процессе производства научно-технической продукции, утратившие полностью или частично потребительские качества исходного ресурса и в силу этого используемые с повышенными затратами (понижением выхода продукции) или вовсе не используемые по прямому назначению.

4.3.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. Расчет затрат заносится в таб. 11.

Таблица 11. Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Нанотвердомер Nanotest 600	1	9	200	200
2	ИК-Фурье спектрометр Nicolet – 5700	1	18	2290	2290
3	Установка плазмохимического осаждения	1	14	1280	1280
Итого, руб.:			3770000		

Расчет амортизации проводился следующим образом:

Норма амортизации: $H_A = 1/n$, где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация: $A = \frac{H_A \cdot I}{12} m$, где I – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Общая сумма амортизационных отчислений:

Нанотвердометр: $H_A = 1/n = 1/9 = 0,11$, $A = \frac{H_A \cdot I}{12} m = \frac{0,11 \cdot 200000}{12} 2 = 3666$ руб.

ИК–Фурье спектрометр: $H_A = 1/18 = 0,05$, $A = \frac{0,05 \cdot 229000}{12} 2 = 19000$ руб.

Установка для осаждения: $H_A = 1/14 = 0,07$, $A = \frac{0,07 \cdot 128000}{12} 4 = 30000$ руб.

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A = 3666 + 19000 + 30000 = 52666 \text{ руб.}$$

4.3.3. Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно–технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату: $Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}$, где $Z_{осн}$ – основная заработная плата; $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12–20 % от $Z_{осн}$).

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле: $Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p$, где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно–техническим работником, раб. дн.; $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \text{ где } Z_{\text{м}} - \text{месячный должностной оклад работника, руб.}; M -$$

количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 28 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5–дневная неделя; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно–технического персонала, раб. дн. (таблица 12).

Месячный должностной оклад работника: $Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}}(1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}})k_{\text{р}}$, где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.; $k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{\text{тс}}$); $k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15–20 % от $Z_{\text{тс}}$); $k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Для руководителя: $Z_{\text{м}} = 26300(1 + 0,3 + 0,2)1,3 = 51285$ рублей.

Для инженера: $Z_{\text{м}} = 20000(1 + 0,3 + 0,2)1,3 = 39000$ рублей.

Тогда, для руководителя: $Z_{\text{дн}} = \frac{51285 \cdot 11,2}{247} = 2325$ рублей;

для инженера: $Z_{\text{дн}} = \frac{39000 \cdot 11,2}{214} = 2041$ рублей.

Для руководителя: $Z_{\text{осн}} = 2325 \cdot 23 = 53475$ рублей.

Для инженера: $Z_{\text{осн}} = 2041 \cdot 38 = 77558$ рублей.

Таблица 12. Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней – выходные и – праздничные дни	52/14	104/14
Потери рабочего времени – отпуск – невыходы по болезни	48/5	24/10
Действительный годовой фонд раб. времени	247	214

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

Для руководителя: $Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 53475 = 8021$

Для инженера: $Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 77558 = 11634$,

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15). Расчёт приведён в таблице 13.

Таблица 13. Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{дн}}$, руб.	$Z_{\text{м}}$, руб.	$T_{\text{р}}$, раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.	$Z_{\text{доп}}$, руб.	$Z_{\text{зп}}$, руб.
Руководитель	2325	51285	23	53475	8021	61496
Инженер	20410	39000	38	77558	11634	89192

4.3.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы: $Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = k_{\text{внеб}} \cdot Z_{\text{зп}}$, где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). Общая ставка взносов составляет в 2018 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ):

22 % – на пенсионное страхование;

5,1 % – на медицинское страхование;

2,9 % – на социальное страхование.

Ставка 30% будет действовать по 2020 год включительно (ст. 425, 426 НК РФ). Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таб. 14.

Таблица 14. Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Инженер
Основная заработная плата, руб.	61496	89192
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,3	
Сумма отчислений, руб	18450	26757
Итого, руб:	45207	

4.3.5. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергия, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов.

Накладные расходы в целом рассчитываются по формуле:

$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 - 4)k_{\text{нр}} = 4026521 \cdot 0,16 = 644244$, где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

4.3.6. Формирование бюджета затрат НИП

В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группировались по статьям, представленным в таблице 15.

Таблица 15. Расчет бюджета затрат НИП

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НИП, руб.	7960
5. Амортизация, руб.	52666
3. Затраты по основной заработной плате, руб.	131033
4. Затраты по дополнительной заработной плате, руб.	19655
5. Отчисления во внебюджетные фонды, руб.	45207
6. Накладные расходы, руб.	644244
Итого плановая себестоимость НИП, руб.:	900765

4.4. Определение финансовой, бюджетной и экономической эффективности исследования

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

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех вариантов

исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги:

- алмазоподобные а–С покрытия;
- гидрогенизированные алмазоподобные а–С:Н покрытия.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$I_{\text{финр}}^{\text{исп. } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$, где $I_{\text{финр}}^{\text{исп. } i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т. ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп. } 1} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{900765}{920365} = 0,97, \quad I_{\text{финр}}^{\text{исп. } 2} = \frac{\Phi_{p2}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{913365}{920365} = 0,99, \quad I_{\text{финр}}^{\text{исп. } 3} = \frac{\Phi_{p3}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{920365}{920365} = 1.$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

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

$I_{pi} = \sum a_i b_i$, где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки; a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки; b_i – балльная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания. Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 16.

Таблица 16. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	a-C:H:SiO _x (исп. 1)	a-C (исп. 2)	a-C:H (исп. 3)
1. Механические свойства	0,40	5	4	5
2. Области применения плёнок	0,19	4	3	5
3. Сложность получения покрытий	0,23	5	3	3
4. Безопасность	0,18	5	5	5
Итого:	1	4,81	3,76	4,54

$$I_{p-исп1} = 0,40 \cdot 5 + 0,19 \cdot 4 + 0,23 \cdot 5 + 0,18 \cdot 5 = 4,81$$

$$I_{p-исп2} = 0,40 \cdot 4 + 0,19 \cdot 3 + 0,23 \cdot 3 + 0,18 \cdot 5 = 3,73$$

$$I_{p-исп3} = 0,40 \cdot 5 + 0,19 \cdot 5 + 0,23 \cdot 3 + 0,18 \cdot 5 = 4,54$$

Текущий проект по интегральному показателю ресурсоэффективности вариантов является выгодным и превосходит аналоги. Это означает, что данный проект является перспективным с точки зрения ресурсопотребления.

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

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп.1}}{I_{финр.1}} = \frac{4,81}{0,97} = 4,96, I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп.2}}{I_{финр.2}} = \frac{3,76}{0,99} = 3,79, I_{исп.3} = \frac{I_{p-исп.3}}{I_{финр.3}} = \frac{4,54}{1} = 4,54.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить *сравнительную эффективность проекта* и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных (таб. 17). Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}): $\mathcal{E}_{cp2} = \frac{I_{исп.2}}{I_{исп.1}} = 0,76$.

Таблица 17. Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,97	0,99	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,81	3,76	4,54
3	Интегральный показатель эффективности	4,96	3,79	4,54
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,76	0,91

Выводы к 4 главе:

1. В результате проведенного анализа конкурентных технических решений оказалось, что разработка является более конкурентоспособной (в плане триболого-механических характеристик), чем её аналоги;
2. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены общее количество календарных дней для выполнения работы – 65, количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 38 и количество календарных дней, в течение которых работал руководитель – 23;
3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 900765 руб.;
4. По факту оценки эффективности научно-исследовательского проекта, можно сделать следующие заключения:
 - значение интегрального финансового показателя НИП составляет 0,97, что делает НИП хоть и немного, но финансово выгоднее, по сравнению с аналогами;
 - значение интегрального показателя ресурсоэффективности НИП составляет 4,96, по сравнению с 3,79 и 4,54. Разница обусловлена тем, что кремний-углеродные покрытия создаются более простым способом, чем рассматриваемые аналоги, а «аналог 1» к тому же имеет более ограниченную область применения из-за меньшей прочности;
 - из-за небольшой разницы в бюджете проектирования, значение интегрального показателя эффективности разработки (4,96) не сильно отличается от ближайшего конкурента «аналога 2» (4,54), но всё же остаётся наиболее высоким, то есть техническое решение, рассматриваемое в НИП, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

5. Социальная ответственность

Магистерская работа по изучению влияния индукции магнитного поля в области подложки и расстояния плазмогенератор/подложка на структуру и механические свойства α -C:H:SiO_x плёнок, предполагает проведение работ на вакуумной установке ННВ–6 по осаждению.

Работы по данной теме проводились в институте сильноточной электроники СО РАН.

Рассмотрение безопасности и гигиены труда при осуществлении работ по осаждению плёнок важно, так как необходимо исключить несчастные случаи и профессиональные заболевания в производстве, обеспечивающих снижение вредных воздействий на окружающую среду и безопасность в чрезвычайных ситуациях.

5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства

К специальным (относящимся к работе магистерской диссертации) правовым нормам трудового законодательства относятся режим рабочего времени и защита персональных данных. Так как вредные условия труда не наблюдались, то различные виды компенсаций не учитывались.

Рабочее время – время, в течение которого работник в соответствии с правилами внутреннего трудового распорядка и условиями трудового договора должен исполнять трудовые обязанности, а также иные периоды времени, которые в соответствии с трудовым кодексом и другими федеральными законами относятся к рабочему времени. В соответствии с Трудовым кодексом РФ нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю.

В целях обеспечения прав и свобод человека и гражданина работодатель и его представители при обработке персональных данных обязаны соблюдать определенные требования в соответствии с Конституцией и законами РФ. Обработка персональных данных может осуществляться исключительно в целях обеспечения соблюдения законов и иных нормативных правовых актов,

получении образования и продвижении по службе, обеспечения личной безопасности, контроля количества и качества выполняемой работы и обеспечения сохранности имущества.

5.1.2. Эргономические требования к рабочей зоне

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 12 [25]. Частоту выполнения операций принимают: очень часто – две и более операций в 1 мин; часто – менее двух операций в 1 мин, но более двух операций в 1 ч; редко – не более двух операций в 1 ч. Дисплей компьютера должен располагаться в зоне 3, а клавиатура – в зоне 1. Наждачная бумага и полировочные ткани для механической обработки образцов также должны располагаться в зоне 1.

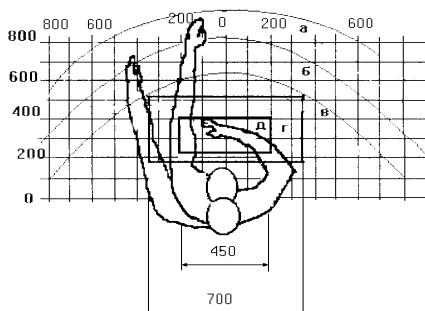


Рисунок 12. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация – в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

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 также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420–550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем. Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100–300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 градусов. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

5.2. Производственная безопасность

Объект анализа вредных производственных факторов (ВПФ) и мероприятий по защите от них – лаборатория ИСЭ СО РАН, где производятся кремний-углеродные покрытия по теме данной магистерской диссертации. Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием вредных и опасных факторы, которые могут возникать при проведении исследований. Согласно ГОСТ 12.0.003-2015 [26] составлен перечень опасных и вредных факторов, представленных в таблице 18.

Таблица 18. Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны ГОСТ 12.1.005 ССБТ. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений СанПиН 2.2.4.548-96.
Превышение уровня шума		+	+	Общие требования безопасности ГОСТ 12.1.003 – 83 ССБТ. Защита от шума СНиП П–12–77
Недостаточная освещенность рабочей зоны		+	+	Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.
Превышение нормативов по электромагнитному излучению		+	+	Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах ГОСТ 12.1.002-84. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96.

5.3. Анализ опасных и вредных производственных факторов

5.3.1. Микроклимат производственных помещений

Показатели микроклимата должны обеспечивать сохранение теплового баланса человека с окружающей средой и поддержание оптимального или допустимого теплового состояния организма. К показателям, характеризующим микроклимат в производственных помещениях, являются [27]:

- температура воздуха;
- температура поверхностей;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового облучения.

Согласно ГОСТ 12.1.005-88 [28] необходимо поддерживать оптимальные параметры климата (таблица 19), обеспечивающие наибольшую вероятность сохранения здоровья и наибольшую производительность труда. Оптимальные микроклиматические условия установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека. Они обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах. Выполняемые работы относятся к Iб категории работ с интенсивностью энергозатрат 121-150 ккал/ч (140-174 Вт), производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением.

Допустимые величины показателей микроклимата устанавливаются в случаях, когда по технологическим требованиям, техническим и экономически обоснованным причинам не могут быть обеспечены оптимальные величины.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 19.

Таблица 19. Оптимальные и допустимые нормы температуры, влажности, скорости движения воздуха в рабочей зоне

Период года	Температура, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
	оптимальная	допустима	оптимальная	допустима	оптимальна	допустимая
Холодный и переходный	21–23	20–24	45–30	60	0,15	0,20
Тёплый	23–25	20–28	60–30	65	0,20	0,30

В целях контроля соответствия гигиеническим требованиям необходимо обеспечить измерение показателей микроклимата и с помощью хозяйственных служб института поддерживать их нормативный уровень.

5.3.2. Шум на рабочем месте

Производственным шумом называется шум на рабочих местах, на участках или на территориях предприятий, который возникает во время производственного процесса. Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. 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 выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

В соответствии с ГОСТ 12.1.029–80 допустимый уровень шума при работе, требующей сосредоточенности, работе с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами на рабочих местах в помещениях лабораторий с шумным оборудованием, составляет 75 дБ. Следовательно, средства и методы защиты от шума должны обеспечивать уровень шума на рабочем месте не выше 75 дБ.

Зоны с уровнем звука 80 дБ должны быть обозначены знаками безопасности согласно ГОСТ 12.4.026–76.

Снижение шума, воздействующего на человека на рабочих местах до значений, не превышающих допустимые, достигается применением средств и методов коллективной защиты, применением средств индивидуальной защиты.

Методы и средства коллективной защиты в зависимости от способа реализации подразделяются на строительно–акустические, архитектурно–планировочные и организационно – технические и включают в себя:

- изменение направленности излучения шума;
- рациональную планировку предприятий и производственных помещений;
- применение звукоизоляции (плиты минераловатные).

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.

5.3.3. Освещенность рабочей зоны

Рациональное освещение обеспечивает высокую производительность трудового процесса и качество работ, исключает возникновение дефектов зрения (спазм аккомодации, ложные близорукость и дальнозоркость), травматизм, составляющий (из-за ненормативной освещенности) 30-50% всех несчастных случаев на производстве. Используются три вида освещения: естественное (от солнца), искусственное (от искусственных источников), совмещенное. При недостатке естественного света нарушаются обмен веществ и резистентность организма, поэтому используются газоразрядные источники, близкие по спектру к естественному свету.

Источники искусственного освещения: лампы накаливания, газоразрядные низкого (люминесцентные) и высокого (ДРЛ) давления. Существуют системы общего освещения (светильники распределяются

равномерно по площади освещения), локализованные (для освещения оборудования и рабочих мест), местные (освещение рабочей поверхности), комбинированные. В лаборатории ИСЭ применяется общая система освещения люминесцентными лампами ЛД.

5.3.4. Электромагнитное излучение

Дисплей ЭВМ является источником электромагнитного излучения.

Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

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

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 25 нТл.

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

Так же управление установкой характеризуется монотонностью работы и умственным перенапряжением. Нервно–психические перегрузки приводят к переутомляемости, снижению внимания и могут привести к ухудшению здоровья человека. При регулярной непрерывной работе с компьютером могут возникать заболевания органов зрения, сердечно–сосудистой системы и желудочно–кишечного тракта.

5.3.5. Промышленная санитария

В работе по осаждению а–С:Н:SiO_x покрытий используется прекурсор ПФМС. Это кремнийорганическая жидкость с химической формулой (CH₃)₃SiO(CH₃C₆H₅SiO)₃Si(CH₃)₃. По степени воздействия на организм человека вредные вещества подразделяются на четыре класса опасности: 1– вещества чрезвычайно опасные; 2 – вещества высокоопасные; 3 – вещества умеренно опасные; 4 – вещества малоопасные. Используемое в работе вещество ПФМС является безопасным, таким образом имеет класс опасности

4 и не требует специальных средств защиты. Предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны – более 10 мг/м³.

5.3.6. Электробезопасность

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Помещения по электробезопасности подразделяются на 3 группы:

1. Помещение без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18–20°, с влажностью 40–50%).

2. Помещение с повышенной опасностью (где имеется один из следующих признаков: повышенная температура, влажность 70–80%, токопроводящие полы, металлическая пыль, наличие заземления, большого количества оборудования).

3. Помещения особо опасные, в которых имеется наличие двух признаков из второй группы или имеются в помещении едкие или ядовитые взрывоопасные вещества.

Описываемое помещение имеет тип электробезопасности 1 – без повышенной опасности.

Работа на установке ННВ–6 предполагает использование высокого напряжения блока питания (до 15 кВ) и напряжения сети 380\220 В, которое может привести к поражению электрическим током. Источником поражения электрическим током могут быть незащищенные и неизолированные электропровода, поврежденные электродвигатели, открытые коммутаторы, не заземленное оборудование и др.

Проходя через живые ткани, электрический ток оказывает термическое, электролитическое и биологическое воздействия. Это приводит к различным

нарушениям в организме, вызывая как местное поражение тканей и органов, так и общее поражение организма. Самый опасный – переменный ток частотой 50 – 60 Гц.

Согласно ГОСТ 12.1.019. ССБТ, 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.

Электрозащитные средства – это переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих с электроустановками, от поражения электрическим током, от воздействия электрической дуги. Эти средства должны обеспечивать высокую степень защиты и удобство при эксплуатации. Их выбирают с учетом требований безопасности для данного вида работ. В первую очередь безопасность обеспечивается применением средств коллективной защиты, а затем, если она не может быть обеспечена, применяют средства индивидуальной защиты.

К средствам коллективной защиты от поражения электрическим током относятся: оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть заблокированы с устройствами, отключающими рабочее напряжение при снятии; изолирующие устройства и покрытия; устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения; устройства дистанционного управления; предохранительные устройства и др.

Также индивидуальные защитные средства подразделяются на основные и дополнительные. К основным защитным изолирующим средствам относятся изолирующие штанги, изолирующие клещи и электроизмерительные указатели напряжения, диэлектрические перчатки, слесарно–монтажный инструмент с изолирующими рукоятками. К дополнительным изолирующим защитным средствам относятся средства, которые дополняют основные, а

также могут служить для защиты от напряжения прикосновения и шагового напряжения. Дополнительными защитными средствами служат диэлектрические галоши, диэлектрические коврики, изолирующие подставки.

Для обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала необходимо предусмотреть:

- защитное заземление всех металлических нетоковедущих частей электрооборудования $R_3 \leq 4$ Ом, безопасное значение напряжения до 36В, а тока – 0,1 А;
- раздельное размещение аппаратуры с напряжением до 1000 В и выше;
- ограждение электронного источника, исключающее возможность прикосновения к токоведущим частям;
- полное ограждение от прикосновения к аппаратуре с напряжением выше 1000 В;
- отключение всех источников питания установки общим рубильником.

5.3.7. Пожарная и взрывная безопасность

По пожарной и взрывопожарной опасности помещения независимо от их функционального назначения подразделяются на следующие категории:

- 1) повышенная взрывопожароопасность (А);
- 2) взрывопожароопасность (Б);
- 3) пожароопасность (В1 – В4);
- 4) умеренная пожароопасность (Г);
- 5) пониженная пожароопасность (Д).

Помещение, в котором выполняется данная работа, по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В3, т.е. горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых они находятся, не относятся к категории А или Б. Помещение, в котором находится установка, находится на

первом этаже и оснащено аварийными выходами, обеспечено средствами пожаротушения, сигнализацией оповещения пожара.

В лаборатории расположены огнетушители порошковые ОП–4(з)–АВСЕ (огнетушитель порошковый закачной с массой огнетушащего вещества 4кг, предназначенный для тушения твердых, жидких и газообразных веществ и электроустановок до 1000 вольт).

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения – предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо: сообщить руководству (дежурному); позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел. 112; принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

5.4. Организационные мероприятия по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов

Для обеспечения безопасности перед началом работы необходимо правильно надеть спецодежду, подготовить для работы необходимый инструмент и приспособления, подготовить рабочий стол.

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

проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение. К работе на вакуумной установке ННВ–6 допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющих медицинских противопоказаний, прошедших вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний правил электробезопасности, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы с данной установкой, ознакомленные с инструкцией по эксплуатации прибора и имеющие не менее II группы по электробезопасности.

Перед проведением работ на вакуумной установке необходимо проверить целостность ПФМС насоса, отсутствие утечки газа. При выполнении работ по управлению в помещении должно находиться не менее 2-х лиц. На установке напыления выполняются только те работы, которые предусмотрены технологической картой. Во время работы во избежание термоожогов рабочую камеру необходимо открывать по достижении температуры устройства не выше 60 °С, а загрузку и выгрузку образцов производить в хлопчатобумажных перчатках. По окончании работы выключить установку согласно инструкции по эксплуатации.

Этиловый спирт для удаления загрязнений на поверхности образцов хранить в закрытых тарах с надписью «Спирт».

По завершению работ необходимо отключить установки, насосы от электросети, убрать рабочее место, выключить компьютеры. Сообщить мастеру о замеченных отклонениях в работе оборудования.

5.5. Экологическая безопасность

Работа с кремний-углеродными покрытиями в лаборатории сопровождается образованием и выделением газообразных, жидких и твердых отходов, влияющих на атмосферу, гидросферу и литосферу. Покрытия осаждаются вакуумным ионно-плазменным методом, главным достоинством

которого является экологическая безопасность, поэтому влияние на атмосферу, гидросферу и литосферу не сильно велико.

К газообразным отходам, загрязняющие атмосферу помещения, относятся естественные выделения – углекислый газ, летучие органические соединения ПФМС, пары спирта, с помощью которых происходит очистка подложек, а также бытовая пыль. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения.

К жидким отходам относятся отходы, образующиеся в процессе очистки образцов в органических и неорганических растворителях (спирт), в процессе влажной уборки помещения лаборатории, при пользовании водопроводом. Данные отходы сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях.

При обращении с твердыми отходами такими, как отходы бумаги (в том числе для хранения образцов); отработанные специальные ткани для протирки подложек; отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства: бытовой мусор после предварительной сортировки необходимо сложить в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передать специальным службам (предприятиям) для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах [29]. Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681 (с изменениями от 1.10.2013) [30]. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является

сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки. В случае боя ртутьсодержащих ламп осколки собирают щеткой или скребком в герметичный металлический контейнер с плотно закрывающейся крышкой, заполненный раствором марганцевокислого калия. Поверхности, загрязненные боем лампы, необходимо обработать раствором марганцевокислого калия и смыть водой. Контейнер и его внутренняя поверхность должны быть изготовлены из неадсорбирующего ртуть материала (винипласта). К сфере защиты окружающей среды и рационального использования природных ресурсов относится и экономия ресурсов, в частности, энергетических. Это сокращает расходы на электротепловую энергию и означает уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух ТЭС.

5.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Рассмотрим две наиболее типичных чрезвычайных ситуации, которые могут произойти в здании, где была разработана магистерская работа.

Первый случай: остановка производства в результате заморозок.

Меры по предупреждению ЧС:

1. Повышение устойчивости системы электроснабжения. В первую очередь целесообразно заменить воздушные линии электропередач на

кабельные (подземные) сети, использовать резервные сети для запитки потребителей, предусмотреть автономные резервные источники электропитания объекта (передвижные электрогенераторы).

2. Обеспечение устойчивости теплоснабжения за счет запасных автономных источников теплоснабжения, кольцевания системы, заглубления теплотрасс.

3. Обеспечение устойчивости системы водоотведения. Повышение устойчивости системы канализации достигается созданием резервной сети труб, по которым может отводиться загрязненная вода при аварии основной сети.

4. Обеспечение устойчивости транспорта заключается в организованном сборе и развозе рабочих на служебном транспорте. В случае аварии на дороге доставка рабочих осуществляется по объездным маршрутам.

Второй случай: проникновение посторонних лиц. Для обеспечения безопасности работника и предотвращения проникновения посторонних лиц на предприятие следует использовать ряд мер безопасности:

1. Организовать контрольно–пропускной пункт.
2. Нанять охрану для обхода здания.
3. Установить системы видеонаблюдения в производственных цехах, а также на всех входах и выходах из здания.
4. Установить оповещающие системы безопасности при несанкционированном проникновении на предприятие в нерабочее время.

Выводы к 5 главе:

В данной главе рассмотрены правила безопасной работы труда при выполнении основных этапов производства кремний-углеродных покрытий. Рассмотрены условия работы с установками, выделены опасные и вредные производственные факторы, а также существующие средства и методы

защиты, описаны организационные и технические мероприятия, проводимые перед началом работы.

Была определена и оценена социальная направленность магистерской диссертации, проанализированы объекты исследования на предмет выявления основных техносферных опасностей и вредностей, оценена степень воздействия их на человека, общество и природную среду, предложены методы минимизации этих воздействий и защиты от них, обеспечивающих снижение вредных воздействий и безопасность в чрезвычайных ситуациях.

По причине особенностей метода осаждения $a\text{-C:H:SiO}_x$ покрытий, они являются экологически безопасными. Учитывая их свойство продлевать срок службы деталей – будут уменьшены сопутствующие загрязнения и влияние на окружающую среду от производства новых деталей и изделий.

Заключение

В результате исследований, проведенных в рамках выполнения ВКР, были исследованы зависимости твёрдости и модуля упругости, индекса эластичности и сопротивления пластической деформации, а также структуры $a\text{--C:H:SiO}_x$ плёнок от параметров осаждения, в частности расстояния плазмогенератор/подложка, индукции магнитного поля и амплитуды отрицательного биполярного напряжения смещения.

- 1) Установлено, что при уменьшении $L_{nz/подл}$ происходит увеличение плотности ионного тока на подложку, что приводит к более плотной и более алмазоподобной структуре плёнки.
- 2) При повышении $U_{см}$ и B твёрдость и модуль упругости снижаются, то есть механические характеристики ухудшаются. Это является следствием перегрева подложки из-за высокоинтенсивной ионной бомбардировки и графитизации плёнок.
- 3) Осаждение $a\text{--C:H:SiO}_x$ плёнки обеспечивает снижение коэффициента трения стали марки 12X18H10T с 0,5 до 0,1 и скорости износа с $7 \cdot 10^{-5}$ мм³/Н·м до $8 \cdot 10^{-7}$ мм³/Н·м при толщине покрытия $2 \pm 0,2$ мкм и параметрах осаждения $U_{см}=500$ В, $L_{nz/подл}=100$ мм, $B=3$ Гс

Таким образом, получены $a\text{--C:H:SiO}_x$ плёнки с высокими механическими и трибологическими параметрами, которые могут использоваться в качестве защитных покрытий для трущихся деталей.

Список литературы

1. Оленин С. С. Фадеев Г. Н. Неорганическая химия: Учеб. Пособие для студентов вузов. – М.: Высш. школа, 1979. – 383 с.
2. Князев, Д. А. Неорганическая химия: учебник для бакалавров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Дрофа, 2004. – 592 с.
3. Исламгалиев А.А. Влияние упрочняющего покрытия дереворежущего инструмента на его срок службы // Молодой исследователь: вызовы и перспективы: сб. ст. по материалам CXVI Международной научно-практической конференции «Молодой исследователь: вызовы и перспективы». – № 16 (116). – М., Изд. «Интернаука», 2019
4. Гилев В.Г. Перспективы применения алмазоподобных покрытий для деталей узлов трения, работающих в коррозионно-абразивной среде. Стр. 66 – 72
5. Мелисов А. Свойства углеродных покрытий, получаемых импульсными сильноточными методами вакуумно-дугового и магнетронного распыления: диссертация магистра. Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, 2018
6. Erdemir, A., Voedvodin, A.A. Nanocomposite coatings for severe applications. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings, third ed. Elsevier, Amsterdam, (2009) pp. 679–715
7. Манабаев Н. К. Электронные свойства углеродных плёнок, модифицированных нанокластерами металла: диссертация доктора. Казахский национальный университет, Алматы, 2013
8. Тарала В. А. Физические принципы осаждения из газовой фазы аморфных, нанокристаллических и микрокристаллических пленок алмазоподобного углерода и карбида кремния: диссертация доктора. ЮНЦ РАН, Ростов–на–Дону, 2013
9. Специальные технологии [Электронный ресурс]: сайт компании производителя. – Березовский, 2014. – режим доступа: <http://www.dlc.ru/>

10. Минибаев М. И. Особенности технологии изготовления образцов из ПКМ на станках с ЧПУ (обзор). Труды ВИАМ 1 (73), Изд-во: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва (2019)
11. Доровских С. И. Синтез и характеристика летучих хелатов никеля(II) и кобальта(II) с различной комбинацией О, N-донорных атомов для формирования металлосодержащих покрытий методом МОСVD: диссертация кандидата. ИНХ СО РАН, Новосибирск (2014)
12. Звонцов И.Ф. Проектирование и изготовление заготовок деталей общего и специального машиностроения: учебное пособие; Балт. гос. техн. ун-т.–СПб., 2015. –179с
13. Кривобоков В.П. Плазменные покрытия (методы и оборудование): учебное пособие / В.П. Кривобоков, Н.С. Сочугов, А.А. Соловьёв. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 104 с.
14. Bendavid, A., Martin, P. J., Comte, C., Preston, E. W., Haq, A. J., Magdon Ismail, F. S., Singh, R. K. The mechanical and biocompatibility properties of DLC–Si films prepared by pulsed DC plasma activated chemical vapor deposition. *Diamond and Related Materials*, 16 (2007) 1616–1622
15. Bräuer, G. Magnetron Sputtering. *Comprehensive Materials Processing*, (2014) 57–73
16. Batory D., Jedrzejczak A., Kaczorowski W., Szymanski W., Kolodziejczyk L., Clapa M., Niedzielski P. Influence of the process parameters on the characteristics of silicon incorporated a–C:H:SiO_x coatings. *Surf. Coat. Tech.*, 271 (2015) 112–118
17. Batory D., Jedrzejczak A., Szymanski W., Niedzielski P., Fijalkowski M., Louda P., Kotela I., Hromádka M., Musil J. Mechanical characterization of a–C:H:SiO_x coatings synthesized using radio–frequency plasma–assisted chemical vapor deposition method. *Thin Solid Films*, 590 (2015) 299–305

18. Kim, W. R., Park, M. S., Jung, U. C., Kwon, A. R., Kim, Y. W., Chung, W. S. Effect of voltage on diamond-like carbon thin film using linear ion source. Surf. Coat. Tech., 243 (2014) 15–19
19. Романов Ю.А. комбинационное рассеяние света в твердых телах: электронное методическое пособие. Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 2010 – 17 с.
20. Юраков Ю.А. Исследование пористого кремния методом инфракрасной спектроскопии / Ю.А. Юраков, А.С. Леньшин, П.В. Середин. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2014. – 13 с.
21. Shugurov A.R., Panin A.V., Oskomov K.V. Specific features of the determination of the mechanical characteristics of thin films by the nanoindentation technique. Physics of the Solid State, 50 (2008) 1050-1055.
22. Casiraghi, C., A.C. Ferrari, and J. Robertson: Raman spectroscopy of hydrogenated amorphous carbons. Phys. Rev, 72 (2005)
23. Сталь 12X18Н10Т: характеристики, применение и цены на металлопрокат [Электронный ресурс]: новостной портал. – Москва, 2012. – режим доступа: <https://www.kp.ru/guide/>
24. Курбанбеков Ш. Р. Модификация структуры и механических свойств поверхностных слоёв стали 12X18Н10Т при электролитно-плазменной обработке: диссертация доктора. Восточно-Казахстанский государственный технический университет, Усть-Каменогорск, 2014
25. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
26. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
27. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
28. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

29. Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 г. №1110 (с изменениями от 24.12.2014) "Об организации сбора, вывоза, утилизации и переработки бытовых и промышленных отходов на территории муниципального образования «Город Томск».
30. Постановление Правительства РФ от 03.09. 2010 №681 (с изменениями от 1.10.2013) «Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде».

Приложение А (справочное)

The Magnetic Field Induction Effect in the Region of the Substrate and Plasma Generator/Substrate Distance to the Structure and Mechanical Properties of a-C:H:SiO_x Films

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Ярославцева Ольга Анатольевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник ИСЭ СО РАН	Гренадёр Александр Сергеевич	к.т.н		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Утятина Янина Викторовна			

1. The Object of Research and Methods for its Preparation

1.1. Carbon and Carbon-based Films

Carbon is located in the second period and the main subgroup of the fourth group of the periodic system. There are six electrons in the carbon atom - two at the internal energy level and four at the external $1s^2 2s^2 2p^2$. The last two electrons are located on separate p -orbitals and are unpaired. Upon transition of an atom to an excited state, a valence state with the $1s^2 2s^1 2p_x^1 2p_y^1 2p_z^1$ configuration. It is precisely this characteristic of the diamond lattice - the tetrahedral spatial arrangement of hybrid orbitals, the same length and bond energy. This phenomenon is called sp^3 -hybridization. In addition to it, the carbon atom also exhibits sp^2 - (superposition of s - and two p - orbitals) and sp - hybridization (superposition of the s and p orbitals) [1]. A schematic representation of each is shown in Figure 1.

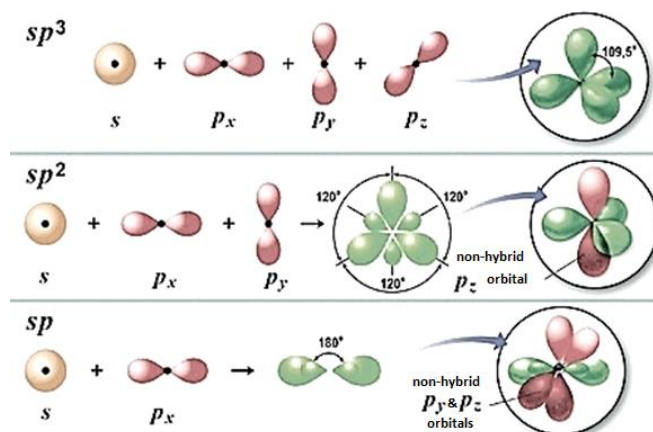


Figure 1. Hybridization of carbon atomic orbitals

In the form of a simple substance, carbon is in the form of several allotropic modifications - diamond, graphite, carbene (Fig. 2). Two forms are most interesting from the point of view of technical application: diamond and graphite.

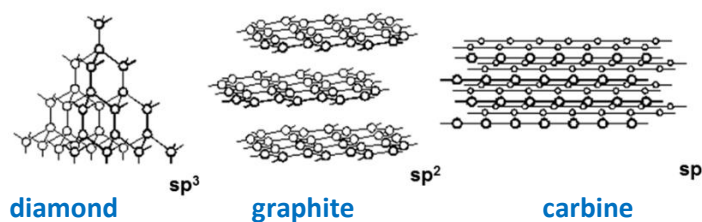


Figure 2. Forms of carbon

Diamond is one of the hardest materials. It is a dielectric that conducts heat poorly. The crystal lattice is a carbon atoms base. All carbon atoms have strong bonds (sp^3) in all directions. Therefore, diamond is the material with the highest hardness, electrical insulating, transparent [2]. With the help of diamond tips, rocks are drilled, metals and stones are drilled and cut. Graphite, in contrast to diamond, is soft, has a metallic luster, conducts heat and electricity. All this is due to the layered structure of graphite. In it, atoms have a strong bond in the plane and a weak bond between the planes (sp^2). The result is a soft, electrically conductive, matted, gray material having a low friction coefficient [3].

The properties of carbon coatings depend on the method, the conditions of their deposition and are determined by the phases percentage with different valence electrons hybridization: sp^2 , sp^3 . Several modifications of diamond-like films are distinguished depending on the content of sp^3 – hybridized atoms in the structure of the carbon film, the concentration of hydrogen, and the presence of dopants: amorphous (a–C, DLC), hydrogenated amorphous (a–C:H), tetrahedral amorphous (ta–C), tetrahedral amorphous hydrogenated carbon (ta–C:H).

1.2. Properties and Structure of Carbon Films

The diamond-like coatings structure is composed of diamond-like and graphite-like bonds, which significantly increases the wear potential of products with a similar coating. Such amorphous carbon coatings with diamond hardness and graphite friction coefficient can be applied over a wide temperature range and on various materials [3].

Diamond-like Amorphous Carbon

Exists in various forms. DLC coatings can be amorphous and have sp^3 hybridization (diamond-like). Inclusions, such as hydrogen, sp^2 carbon, are necessary to reduce economic costs or give desired properties. The use of DLC increases the material abrasion resistance. Wear, friction and electrical properties make DLC coatings an attractive material for medical applications. Such coatings are biologically inert and do not cause either toxic or inflammatory reactions. Good

biocompatibility of DLC coatings with blood plasma proteins and living cells of the human body is assumed.

Hydrogenated Amorphous Carbon

Amorphous carbon coatings with bound hydrogen are called hydrogenated films. ($a\text{-C:H}$). The coatings hardness is from 10 to 30 GPa [4]. Depending on the deposition method, the energy gap of the films is from 0,5 to 3,0 eV, and the refractive index can vary from 1,5 to 2,5 [5]. The scope is quite large - as anti-wear and anti-reflective protective optical coatings, in high-temperature electronics, in solar energy.

Tetrahedral Amorphous Carbon

The hardest is tetrahedral amorphous carbon ($ta\text{-C}$). Hardness ranges from 50 to 100 GPa. For example, $ta\text{-C}$ coating with a thickness of only 2 microns increases the resistance of ordinary stainless steel from abrasive wear, changing its service life in this operation mode from one week to 85 years [6]. Such $ta\text{-C}$ can be considered as a «pure» form of DLC, since it consists only of carbon atoms bound to sp^3 . This type of material corresponds to a dense amorphous material consisting of disordered sp^3 bonds, bonded by strong bonds similar to those that exist in disordered diamond with a supposedly similar diamond hardness.

Tetrahedral Hydrogenated Amorphous Carbon

Films with a high fraction of sp^3 atoms-hybridized carbon (about 70%) and a hydrogen content of $\approx 30\%$ are called amorphous hydrogenated tetrahedral carbon films ($ta\text{-C:H}$). Such a material has high values of hardness (30–50 GPa) [7] and Young's modulus [8]. They are used as protective inert coatings against metal corrosion and chemical exposure to aggressive media, as durable, heat-resistant insulating coatings in electronics and as hard wear-resistant coatings.

Particular attention should be paid to **amorphous hydrogenated silicon – carbon coatings ($a\text{-C:H:SiO}_x$)**. As already mentioned, $a\text{-C:H:SiO}_x$ coatings have a number of advantages compared to other diamond-like ones and are more promising material for study. Their application is possible in a wide range of

production: from antireflection optical (due to the content of the sp^2 phase) to durable, protective wear-resistant coatings (due to the content of the sp^3 phase).

1.3. Methods for Producing Diamond-like Carbon Coatings

There are several methods for producing DLC, which differ in their operational characteristics, which, in turn, is due to a different ratio of sp^3/sp^2 bonds characteristic of all carbon formations in them. The carbon films structural state depends on the condensation mode of carbon atoms on the substrate.

The most widespread method is the diamond-like coatings production by chemical vapor deposition on a substrate (CVD – chemical vapor deposition) from hydrocarbons subjected to thermal or discharge degradation. The coating hardness in this case is in the range from 9 to 40 GPa. The reason for this is the presence in the chemical bond structure of the resulting amorphous coating of hydrogen atoms formed during the destruction of hydrocarbons and deposited on a substrate together with carbon atoms. So get amorphous hydrogenated films. A more time-consuming method is to obtain DLC by plasma spraying graphite in a vacuum chamber and depositing high-energy carbon ions on a part (PVD – physical vapor deposition), for example, on a metalworking tool. The fundamental difference between this technology is that the concentration of carbon with diamond-like bonds of the sp^3 type in the resulting diamond-like coatings reaches the maximum possible value of 85%, and the hardness corresponds to the interval of values from 50 to 100 GPa and tends in its parameters to single-crystal diamond. Using this method, diamond-like films of ta-C and a-C are obtained. [9, 10].

Let consider methods for obtaining the studied a – C:H:SiO_x films.

1.3.1. Methods of Obtaining a-C:H:SiO_x Coatings

To obtain a-C:H:SiO_x coatings, the direct current plasma chemical deposition method, radio-frequency plasma chemical deposition method, Kaufman ion source method and arc discharge are used.

Direct Current Plasma Chemical Deposition Method (DC PECVD)

The starting substances used are compounds having a high vapor pressure at low temperatures (100–400°C; metal chlorides, organometallic complex compounds) [11]. Most reagent precursors for this method are used only in the liquid phase at room temperature. They must be heated to their own evaporation temperature and brought to the reactor using a working gas. If the vapor pressure of the liquid precursor is known, then its partial pressure is easy to calculate and control the speed and the working gas flow volume. A key factor in obtaining high-quality coatings by this method is the accuracy of controlling the speed of gas flows and the precursors evaporation rate [11]. In the deposition process, the substrate is placed in a reactor where precursor vapors are supplied, which react and break down on the surface or near the surface of the heated substrate, while forming a thin film of the desired substance on the surface of the substrate. Instead of thermal energy, reactant vapors are activated by fast electrons. A reactive gas reacts to form a volatile heat-sensitive compound. When this gas comes into contact with a surface heated to a higher temperature than the vaporized material ($T_2 > T_1$), this compound decomposes and pure material precipitates [12].

The advantages of this method are the combination of low pressure in the reactor and low temperatures, giving a more uniform film thickness; good deposition rates and high-quality step coating.

Disadvantages: it is necessary to control a larger number of process variables compared to other processes; the cost of the process is greater due to the requirement to have more elements; contamination of the deposited films by reaction particles and chemical. Another drawback is the strong interaction of the plasma with the growing film. A high deposition rate requires careful debugging of the reaction unit [13].

Using this method, films were deposited in [14]. It studied the effect of silicon incorporation on the mechanical properties and biocompatibility of carbon films. The results showed a decrease in hardness from 14 GPa to 12 GPa and internal stresses from 1.53 GPa to 1.0 GPa for DLC and DLC doped with silicon,

respectively. Tests using cell culture showed good adhesion of cells with silicon – carbon coatings applied by this method. The authors believe that DC PECVD is a promising film-making technology in the context of biomedical applications and may provide an alternative to the traditional RF PECVD process.

The Method of Radio-frequency Plasma-chemical Deposition (RF PECVD)

The basis of the radio-frequency (RF) discharge generation is the frequency-modulated constant voltage in the spatial discharge layer at the RF electrode. The essence of the method is the decomposition of silicon – carbon precursors in a glow discharge plasma until the active components formation with their further deposition on a substrate. In the positive half-cycle, plasma electrons reach the target faster than ions in the negative half-cycle. Thus, on average over time, the target receives a negative charge, although an alternating voltage is applied. In a system with an RF hollow cathode, the substrates are surrounded by a space charge layer, which initiates the ion bombardment of the coating during its deposition [8]. The advantage of this method is the possibility of applying APP on dielectric substrates, because charge does not accumulate on their surface. RF discharge is widely used in industry, but the cost of RF power, low deposition rates, and high thermal load on the substrate complicate the use of this method. In addition, high-frequency spraying is very difficult to scale, avoiding the thickness variation [15].

In [16, 17], the deposition parameters effect on the mechanical and tribological properties of a-C:H:SiO_x films synthesized by RF PACVD was described in detail. The obtained films characteristics are combined in table 1.

Table 1 – Characteristics of a-C:H:SiO_x films

Bias voltage, (V)	Hardness, H (GPa)	Young's modulus, E (GPa)	Residual stress, (GPa)	sp ² , (%)	sp ³ , (%)
200	13.84	95	1.86	64.1	17.4
400	18.34	131	2.33	69.8	18.9
600	16.47	137	1.55	65.2	26.0
800	13.94	93	0.92	67.10	22.70

With an increase in the negative bias potential, lower Si/O concentrations were observed. An increased concentration of silicon and Si–C bonds was also observed, increasing with increasing precursor fraction in the working chamber. Oxygen-containing plasma, especially at high negative bias voltages, can participate in surface etching of sp^2 hybridized carbon, which can affect the increase in sp^3 content of hybridized carbon and, at the same time, can cause the absence of SiO_x precipitation, which can be easily etched at high negative bias potentials.

Kaufman Ion Source Method

The coatings deposition is also possible by applying to the substrate the products of plasma chemical reactions in a hydrocarbon plasma formed using an ion beam generated by an autonomous ion source. This method is attractive because ion beams are more energetic, and many ion sources make it possible to independently control the trajectory of ions, energy and their density. It is possible to coat using an extended ion source with a closed electron drift. The operation of the ion source consists of supplying gas to the gap between the electrodes and a positive potential at the anode. The magnetic field causes the electrons to make a closed drift motion in the accelerating channel, thereby repeatedly ionizing the working gas and forming a plasma. The accelerating channel is a gap formed by the internal and external parts of the cathode. In a plasma, silicon-carbon gas decomposes into ions and active particles, which then precipitate and form a coating on the substrate.

In [18], the dependences of the film properties on the applied voltage to the anode (800 ÷ 1800 V) and bias voltage (from 0 to –200 V) were studied. As a result, the highest hardness obtained was about 23 GPa at an anode voltage of 1400 V and about 22.5 GPa at a bias voltage of –100 V. As the voltage increases, the kinetic energy of ions increases. High kinetic energy carbon ions combine with dangling bonds and form three-dimensional transverse bonds, improving the mechanical properties of the diamond-like coating.

2. Description of Experimental Equipment and Methods for Studying the Coatings Properties

2.1. Description of Experimental Equipment and Methods for Deposition a-C:H:SiO_x Coatings

In this work, a-C:H:SiO_x films were deposited from a plasma of a non-self-contained arc discharge with a glowing cathode with a pulsed bipolar bias voltage of the substrate applied to the substrate. An organosilicon liquid, polyphenylmethylsiloxane (PFMS), was used as a working precursor. Figure 3 shows a block diagram of a working chamber on which deposition was carried out.

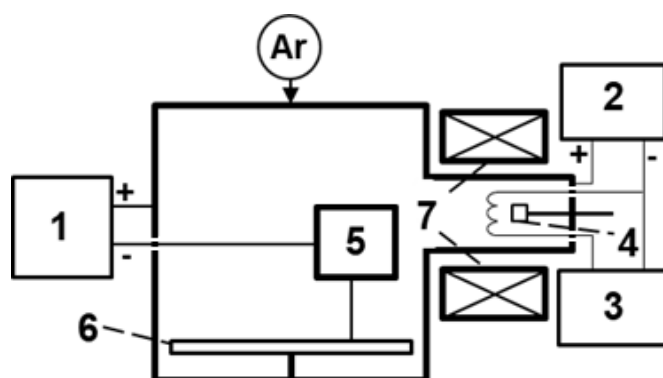


Figure 3. Scheme of the working chamber: 1 - bias power source; 2– discharge power source; 3 - glow power source; 4 - PFMS source; 5 - sample holder; 6 - rotating table; 7 - electromagnetic coil

Plasma formation occurs due to ionization of the working gas through thermionic emission. The main source of electrons is a heated cathode. The source of the vapor phase is heated to a temperature of about 500 °C and then PFMS is continuously fed into it, where it passes from the liquid to the vapor phase, and a directed vapor stream forms at the outlet. The plasma generator (PFMS source) is equipped with an electromagnetic coil. A potential difference is applied to the substrate as a bias voltage. In the resulting potential difference, positively charged PFMS molecules are accelerated in the direction of the substrate, and, having some energy, are introduced into the surface of the substrate itself, forming a coating.

2.2. Description of Analytical Equipment and Methods for Studying the Coatings Properties

The structure of the obtained films was studied by Raman spectroscopy on a *Centaur U HR* complex. This method is widely used in the study of DLC to estimate the sp^3 and sp^2 – hybridized carbon atoms content in them. Raman scattering changes the wavelength of the incident light due to the interaction of light with the vibrational quanta of a scattering molecule (based on the study of scattered light). According to the results of Raman spectroscopy, intramolecular interactions can be studied by observing the location and intensity of bands in the Raman spectrum [19].

To determine the presence of functional groups and structural bonds in the film, we used IR Fourier spectroscopy, a *Nicolet 5700* instrument. The method is based on the Fourier transform of the interferogram of two beams of the investigated radiation with a variable optical path difference of these beams, due to the fact that the radiation of each wavelength λ corresponds to a certain curve obtained using a Michelson interferometer (Fig. 4) when moving a moving mirror.

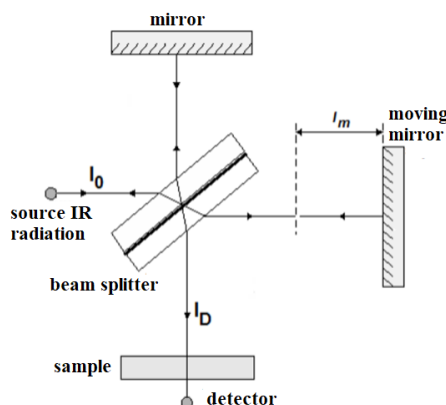


Figure 4. Optical design of a Michelson interferometer

The IR radiation coming from the source is divided by a translucent beam splitter into two coherent beams. One of them goes to a stationary flat mirror and is reflected from it to the beam splitter, the other beam goes to the moving mirror and also returns where they are connected on the beam splitter. These two coherent beams interfere with each other and as a result of this can either strengthen or weaken each other. The result is an interferogram – a graph of the dependence of the intensity of the detected radiation on the difference in the path of the beams. It contains all

the spectral information about the beam incident on the detector. Further, the interferogram is recalculated by the Fourier transform [20]. The measurements were made by placing the sample in the holder and passing a beam of light through them. The results were processed in the spectrometer program and displayed.

Hardness and elastic modulus were determined by the Oliver-Farr method using a *NanoTest 600* nanoindenter at a load of 10 mN. According to this technique, the Berkovich tip indenter was perpendicular to the surface of the test sample. A load was applied to the indenter, under the influence of which it was pressed into the sample. Such a pressing effect with maximum load was maintained for a strictly defined time (15 seconds), and then the load gradually decreased. As a result, the so-called elastoplastic deformation occurred, in which the surface of the material under the indenter partially returned to its original state [21].