

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

Институт Физико-технический

Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии

Кафедра Физико-энергетические установки

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

| Тема работы |
|---|
| Исследование влияния магнитного поля и потенциала смещения на подавление медных макрочастиц вакуумно-дугового испарителя |

УДК 533.9

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------------|---------|------|
| 0AM4B | Андрияшин Дмитрий Александрович | | |

Руководитель

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------------------|---------------|---------------------------|---------|------|
| старший научный сотрудник | П. С. Ананьин | к.ф.-м.н. | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|------------------|---------------------------|---------|------|
| доцент | М. В. Верховская | к.э.н. | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|----------------|---------------------------|---------|------|
| ассистент | Т. С. Гоголева | к.ф.-м.н. | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Зав. кафедрой | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|----------------|---------------------------|---------|------|
| ФЭУ | О. Ю. Долматов | к.ф.-м.н. | | |

Томск – 2016 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

| Код результата | Результат обучения |
|--|--|
| <i>Профессиональные компетенции</i> | |
| P1 | Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности. |
| P2 | Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов. |
| P3 | Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде. |
| P4 | Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиоэкологии, медицинской физике и ядерной медицине. |
| P5 | Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение. |
| P6 | Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации. |
| <i>Общекультурные компетенции</i> | |
| P7 | Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности. |
| P8 | Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности. |
| P9 | Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности. |
| P10 | Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации. |

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

Институт Физико-технический

Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии

Кафедра Физико-энергетические установки

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

О. Ю. Долматов

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|----------------------------------|
| 0AM4B | Андряшину Дмитрию Александровичу |

Тема работы:

Исследование влияния магнитного поля и потенциала смещения на подавление медных макрочастиц вакуумно-дугового испарителя

Утверждена приказом директора (дата, номер)

26.02.2016 № 1618/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

20.06.2016

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

| | |
|---|--|
| Исходные данные к работе | |
| Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов | <ul style="list-style-type: none">– Подготовка обзора литературы посвященной процессам формирования потока микрокапельной фракции вакуумно-дугового разряда, способам фильтрации плазмы и снижения числа макрочастиц на поверхности образца.– Ознакомление с оборудованием для ионно-плазменной обработки материалов, исследования поверхности экспериментальных образцов и методами расчета поверхностной плотности макрочастиц.– Изучение влияния тангенциального к поверхности катода магнитного поля на формирование потока макрочастиц и плазмы в |

| | |
|--|--|
| | <p>вакуумно-дуговом испарителе</p> <p>– Исследование влияния высокочастотного коротко-импульсного потенциала смещения отрицательной полярности на накопление макрочастиц на поверхности образца, погруженного в титановую вакуумно-дуговую плазму.</p> <p>– Обработка образцов, набрать достаточную для получения достоверных результатов статистику, представить полученные данные.</p> |
|--|--|

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

| Раздел | Консультант |
|---|------------------|
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | М. В. Верховская |
| Социальная ответственность | Т. С. Гоголева |
| Иностранный язык | Я. В. Ермакова |

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

| |
|--|
| Введение |
| Состояние исследований по подавлению микрокапельной фракции катодов вакуумно-дуговых испарителей |
| Оборудование и методики исследований |
| Исследование закономерностей подавления микрокапельной фракции на потенциальном электроде |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение |
| Социальная ответственность |
| Заключение |
| Часть на английском языке |

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

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------|---------------|------------------------|---------|------|
| старший научный сотрудник | П. С. Ананьин | к.ф.-м.н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------------|---------|------|
| 0AM4B | Андрияшин Дмитрий Александрович | | |

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

Студенту:

| | |
|---------------|----------------------------------|
| Группа | ФИО |
| 0AM4B | Андряшину Дмитрию Александровичу |

| | | | |
|----------------------------|---------------------------|----------------------------------|--|
| Институт | Физико-технический | Кафедра | Физико-энергетические установки |
| Уровень образования | магистр | Направление/специальность | 14.04.02 Ядерная физика и технологии |

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

| | |
|---|---|
| – стоимость ресурсов научного исследования (НИ): | – материально-технических; – энергетических; – информационных; – человеческих. |
| – нормы и нормативы расходования ресурсов: | – электроэнергии. |
| – используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений для: | – преподавателей и студентов университета. |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|--|---|
| – оценка коммерческого и инновационного потенциала НИ; | – составление карты сегментирования рынка; – формирование оценочной карты для сравнения конкурентных технических решений. |
| – планирование и формирование бюджета НИ; | – составление иерархической и организационной структуры НИ; – представление плана НИ; – формирование бюджета затрат НИ. |
| – определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности НИ. | – расчет интегрального финансового показателя, интегрального показателя ресурсоэффективности, интегрального показателя экономической эффективности. |

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|------------------|------------------|-----------------------------------|----------------|-------------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| доцент | М. В. Верховская | к.э.н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|---------------|--------------------------------|----------------|-------------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| 0AM4B | Андряшин Дмитрий Александрович | | |

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| | |
|---------------|----------------------------------|
| Группа | ФИО |
| 0AM4B | Андряшину Дмитрию Александровичу |

| | | | |
|----------------------------|---------------------------|----------------------------------|--|
| Институт | Физико-технический | Кафедра | Физико-энергетические установки |
| Уровень образования | магистр | Направление/специальность | 14.04.02 Ядерная физика и технологии |

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

| | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> – описание рабочего места для работы с персональной электронно-вычислительной машиной (ПЭВМ) на предмет возникновения: | <ul style="list-style-type: none"> – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы). – вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, электромагнитные поля, ионизирующие излучения). |
| <ul style="list-style-type: none"> – знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме: | <ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность; – пожарная безопасность; – гигиенические требования к ПЭВМ. |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> – анализ выявленных вредных производственных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности: | <ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ). |
| <ul style="list-style-type: none"> – анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведенной среды в следующей последовательности: | <ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения). |

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

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| ассистент | Т. С. Гоголева | к.ф.-м.н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|---------------|--------------------------------|----------------|-------------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| 0AM4B | Андряшин Дмитрий Александрович | | |

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 93 стр., 30 рис., 19 табл., 54 источника, 2 приложения.

Ключевые слова: плазма, дуговой разряд, медь, осаждение, макрочастица, микрокапля.

Объектом исследования являются магнитное поле и отрицательный короткоимпульсный потенциал смещения, влияющие на подавление медных макрочастиц вакуумно-дугового испарителя.

Цель работы – исследование закономерностей формирования потока микрокапельной фракции вакуумно-дугового испарителя и увеличение эффективности подавления макрочастиц при использовании магнитного поля и приложении к потенциальной мишени высокочастотного короткоимпульсного потенциала смещения.

В процессе исследования проводились различные эксперименты для определения влияния различных параметров установки на формирование микрокапельной фракции в потоке плазмы и на поверхности образца.

В результате исследования определены наиболее оптимальные параметры составляющих магнитного поля и конструкции катода.

Область применения: электроника, медицина, легкая промышленность, тяжелая промышленность.

Значимость работы состоит в том, что применение данного метода плазменно-эмиссионной имплантации ионов позволит увеличить скорость осаждения покрытий и уменьшить количество макрочастиц на поверхности образца.

Оглавление

| | |
|---|----|
| Введение..... | 10 |
| Глава 1 Состояние исследований по подавлению микрокапельной фракции катодов вакуумно-дуговых испарителей..... | 13 |
| 1.1 Процессы генерации макрочастиц | 13 |
| 1.2 Поведение макрочастиц вакуумной дуги в плазме | 18 |
| 1.3 Снижение генерации макрочастиц..... | 23 |
| 1.3.1 Управление катодным пятном | 25 |
| 1.3.2 Снижение интегральной температуры катода | 27 |
| 1.3.3 Присутствие газа в разрядном промежутке | 27 |
| 1.3.4 Снижение плотности тока | 28 |
| 1.3.5 «Бескапельные» режимы дуги | 28 |
| 1.3.6 Принцип действия и основные разновидности плазменных фильтров..... | 30 |
| Глава 2 Оборудование и методики исследований | 42 |
| 2.1 Описание экспериментальной установки..... | 42 |
| 2.2 Подготовка экспериментальных образцов | 44 |
| 2.3 Оборудование для исследования свойств материалов и покрытий..... | 46 |
| Глава 3 Исследование закономерностей подавления микрокапельной фракции на потенциальном электроде..... | 52 |
| 3.1 Влияние магнитного поля направленного нормально к поверхности катода | 52 |
| 3.2 Влияние тангенциального магнитного поля катода на генерацию макрочастиц | 54 |
| Глава 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | 59 |
| 4.1 Предпроектный анализ | 60 |
| 4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования | 60 |
| 4.1.2 SWOT-анализ..... | 61 |
| 4.2 Планирование научно-исследовательских работ..... | 64 |
| 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования | 64 |

| | |
|--|----|
| 4.2.2 Контрольные события проекта | 65 |
| 4.2.3 План проекта..... | 66 |
| 4.3 Бюджет научно-технического исследования | 67 |
| 4.3.1 Расчет материальных затрат НТИ | 67 |
| 4.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ | 69 |
| 4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы..... | 70 |
| 4.3.4 Дополнительная заработная плата | 71 |
| 4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) | 72 |
| 4.3.6 Накладные расходы..... | 72 |
| 4.3.7 Формирование бюджета научно-исследовательского проекта | 73 |
| 4.4 Организационная структура проекта | 74 |
| 4.5 Матрица ответственности | 74 |
| Глава 5 Социальная ответственность..... | 76 |
| 5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов при работе в лаборатории | 76 |
| 5.2 Организация работ на ПЭВМ и установке | 78 |
| 5.2.1 Организационные мероприятия..... | 78 |
| 5.2.2 Технические мероприятия..... | 78 |
| 5.2.3 Условия безопасной работы..... | 80 |
| 5.3 Электробезопасность | 82 |
| 5.4 Пожарная и взрывная безопасность | 84 |
| Заключение | 87 |
| Список публикаций..... | 88 |
| Список использованных источников | 89 |
| Приложение А Вакуумно-дуговой испаритель..... | 94 |
| Приложение Б Macroparticle Generation of Plasma Arcs | 95 |

Введение

Вакуумно-дуговой разряд, генерирующий потоки высокоионизированной плазмы, является эффективным инструментом для осаждения покрытий различного назначения. Поскольку в качестве катодного плазмообразующего материала могут служить практически любые металлы или сплавы, то вакуумно-дуговым методом могут быть получены покрытия разнообразного состава. Высокая степень ионизации, достигающая для некоторых материалов почти 100 %, позволяет с помощью магнитных и электрических полей управлять плазменным потоком, регулировать в широких пределах его энергосодержание, форму и направление движения. Это позволяет активно влиять на структурные характеристики получаемых конденсатов, обеспечивать возможность синтезировать покрытия с заданными физико-механическими и служебными характеристиками. Широкие технологические возможности вакуумной дуги обусловили тот повышенный интерес к разряду этого типа, который отмечается в последние годы в связи с успехами в области наноструктурных материалов, нанопленочных покрытий.

Однако, известная проблема наличия в потоке вакуумно-дуговой плазмы микрокапельной фракции, существенно ограничивает использование непрерывных вакуумных дуг в высокотехнологичных областях, предъявляющих повышенные требования к качеству поверхностей. Для решения проблемы ухудшения свойств формируемых покрытий предложен целый ряд модификаций плазменных фильтров, однако, не смотря на высокую степень очистки от макрочастиц, эффективность прохождения плазмы через такие системы мала.

В ряде работ теоретически рассмотрена принципиальная возможность уменьшения количества капель в плазменном потоке вакуумной дуги за счет их испарения под действием потоков заряженных частиц в пространстве массопереноса [1]. В работе [2] рассмотрен вариант применения инфракрасных лазеров для прямого разогрева частиц, однако на сегодняшний день,

использование подобного метода не представляется экономически целесообразным.

Интересный эффект уменьшения числа капель на поверхности при приложении к мишени отрицательных смещений наблюдалось экспериментально и описано в [3, 4]. Авторы работы наблюдали 3-4 кратное снижение плотности макрочастиц при приложении отрицательного потенциала смещения $U_{см} = -1000$ В к подложке, погруженной в плазму вакуумной дуги. Изучая результаты, было получено объяснение наблюдаемого эффекта. Авторы высказали предположение, что отражение отрицательно заряженных частиц связано с электростатическим отталкиванием экранирующего электрического поля вблизи потенциальной поверхности.

Можно заметить, что в большинстве работ выполненных к настоящему моменту использовались постоянные потенциалы смещения, однако в [5] показано, что приложение коротко-импульсного высокочастотного потенциала смещения значительно снижает поверхностную плотность макрочастиц на мишени, погруженной в алюминиевую и титановую плазму. В связи с этим, дальнейшее исследование процессов происходящих на поверхности мишени погруженной в плазму вакуумно-дугового разряда при приложении к ней высокочастотных коротко-импульсных потенциалов смещения отрицательной полярности и в слое пространственного разделения заряда представляется актуальным.

Цель работы состояла в исследовании закономерностей формирования потока микрокапельной фракции вакуумно-дугового испарителя и увеличении эффективности подавления макрочастиц при использовании магнитного поля и приложении к потенциальной мишени высокочастотного коротко-импульсного потенциала смещения.

Задачи:

1. Подготовить обзор литературы посвященной процессам формирования потока микрокапельной фракции вакуумно-дугового разряда,

способам фильтрации плазмы и снижения числа макрочастиц на поверхности образца.

2. Ознакомиться с оборудованием для ионно-плазменной обработки материалов, исследования поверхности экспериментальных образцов и методами расчета поверхностной плотности макрочастиц.

3. Изучить влияние тангенциального к поверхности катода магнитного поля на формирования потока макрочастиц и плазмы в вакуумно-дуговом испарителе с перемещающейся магнитной системой.

4. Исследовать влияние высокочастотного коротко-импульсного потенциала смещения отрицательной полярности на накопление макрочастиц на поверхности образца, погруженного в титановую вакуумно-дуговую плазму.

5. Обработать образцы, набрать достаточную для получения достоверных результатов статистику, представить полученные данные.

Глава 1 Состояние исследований по подавлению микрокапельной фракции катодов вакуумно-дуговых испарителей

1.1 Процессы генерации макрочастиц

Макрочастицы представляют собой жидкие или твердые куски материала катода, генерируемые в катодном пятне наряду с плазмой. Термин «макрочастица» используется часто и подчеркивает массивность частиц по отношению к электронам и ионам, однако некоторые авторы предпочитают использовать термины «капли», «микрочастицы» и «наночастицы», когда речь идет о субмикронных частицах [6].

На сегодняшний день предложено несколько механизмов объясняющих процесс формирования капель в катодном пятне. Выбор модели в частности зависит и от материала катода, ведь в случае легкоплавких материалов (например алюминий, медь) большинство генерируемых частиц формируются в жидком виде, а для тугоплавких материалов (особенно графита) частицы в основном представляют собой отколовшиеся куски материала катода.

Рассмотрим, в частности, модель формирования капель в металлическом катоде, впервые представленную Б. Ютнером в работе [7]. Во время взрывных процессов на поверхности катода, вещество находится во всех четырех агрегатных состояниях (твердое, жидкое, газообразное и плазма). Очевидно, что должна существовать тонкая переходная граница между регионом плотной плазмы с характерными температурами несколько десятков тысяч К и значительно более холодным катодом. Жидкий металл, в такой транзитной зоне подвергается воздействию изменяющегося во времени давления ионной компоненты плазмы, расплавленный слой катодного материала вытесняется на периферию, образуя кольцевой гребень. Под действием сил поверхностного натяжения и флуктуаций гребень распадается на отдельные стержни, в процессе вытягивания которых появляются микроострия и формируются капли [8]. Изображения кратеров на поверхности катода, полученные при помощи сканирующего электронного микроскопа, рисунок 1, подтверждают взрывные

процессы в катодном пятне и выбросы вещества в процессе его существования, и что генерация плазмы и макрочастиц является неотъемлемой характеристикой вакуумной дуги.

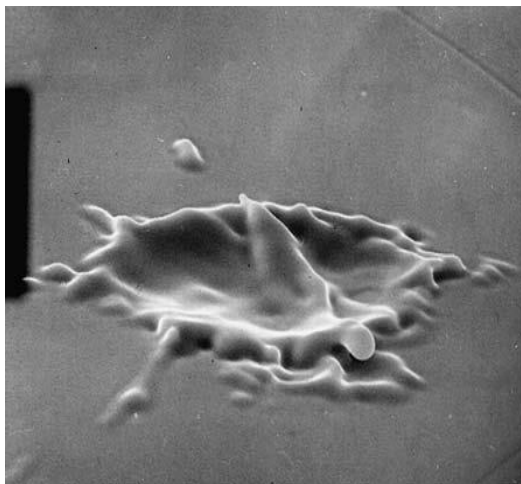


Рисунок 1 – Пример образования кратера катодным пятном. Изображение получено при помощи сканирующего электронного микроскопа после 10 нс горения катодной дуги на Молибдене. (Лаборатория Б. Ютнера, Берлин)

Процесс схематически изображен на рисунке 2. Макрочастица образуется, когда жидкий материал катода взаимодействует с плазмой. Как отображено на иллюстрации, большинство микрочастиц выбрасываются под углами $5-30^\circ$ к поверхности катода. Только испущенная макрочастица может остыть за короткое время и застыть на границе кратера, сформировав микроострие, создающее неоднородность в напряженности электрического поля и может послужить местом локализации следующего пробоя.

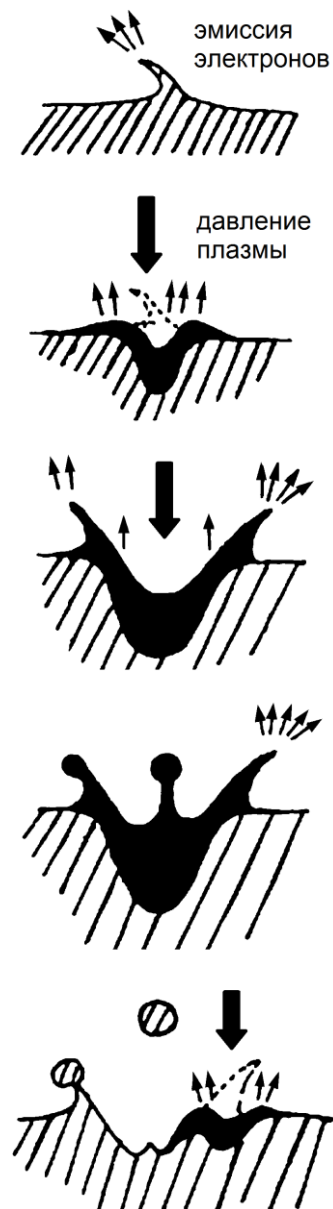


Рисунок 2 – Упрощенная схема генерации микрокапель под действием плазмы

Есть все основания что бы полагать что схема излишне упрощена. Например, взрывная стадия в эволюции эмиссионной зоны должна быть короче, чем характерное время движения жидкого металла. Даалдер в работе [9], наблюдал максимум углового распределения испущенных частиц в диапазоне углов $10-30^\circ$ к поверхности катода, однако, значительная часть макрочастиц испускается в направлении близком к нормали. Во взрывной стадии формируется жидкий слой, чем создается местное ослабление механической прочности материала. На следующем этапе, когда давление плазмы мгновенно уменьшается, электрическое поле пятна вытягивает и вырывает ослабленный участок материала, который отделившись от катода

принимает форму капли. На рисунке 1 можно наблюдать центральный конус и каплю отделившуюся от него.

Наиболее распространенный метод для подсчета частиц испущенных катодом – это анализ макрочастиц накопленных на подложке. Предположение что распределение частиц на подложке соответствует распределению испущенных частиц с катода, несколько не соответствует действительности, так как экспериментально наблюдалось отражение части частиц от подложки, стенок камеры и прочих объектов, особенно в случае тугоплавких металлов и графита, рисунок 3 [10].

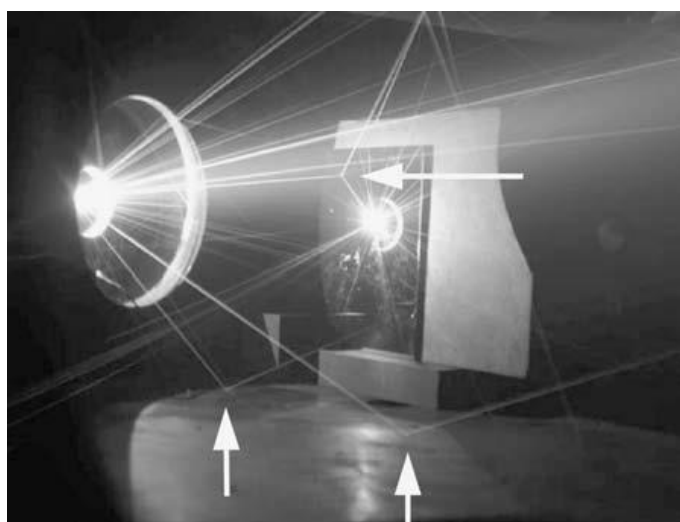


Рисунок 3 – Эмиссия микрочастиц из катодной дуги на графите с током дуги 100 А, время измерения 100 мс. Белыми стрелками отмечены места отражения микрочастиц от поверхности

Для процессов связанных с модификацией структуры поверхности, наибольшее значение имеют частицы испущенные по нормали к поверхности катода, то есть те что испущены совместно с плазмой. На рисунке 4 представлено распределение макрочастиц от импульсной вакуумной дуги с использованием Pb, W, Ag, Ni, Pt и Cu катодами [11]. Можно заметить, что чем ниже точка плавления материала, тем больше и крупнее частицы.

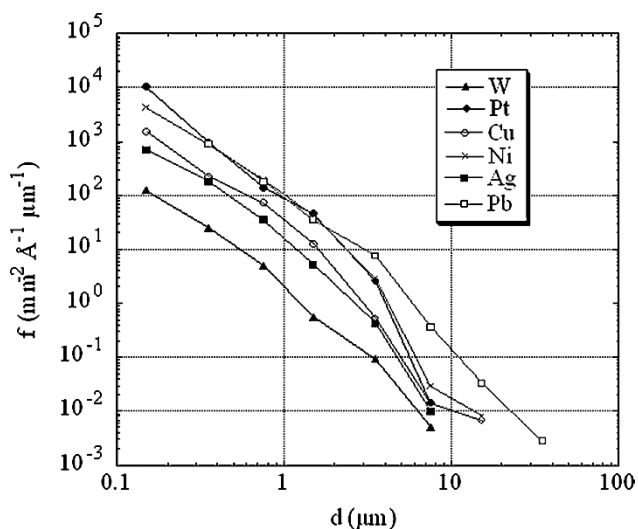


Рисунок 4 – Распределение частиц по размерам от импульсной вакуумной дуги с различными материалами катода. Подложка располагалась на расстоянии 6,5 см от катода, ток дуги 200 А

Важно отметить, что высокий ток дуги увеличит число активных катодных пятен или эмиссионных зон, а не изменит их поведение. Поэтому, можно считать, что распределение макрочастиц не изменится, до тех пор пока дуга функционирует в нормальном режиме, т.е. собственное магнитное поле и анодные пятна можно проигнорировать. Рисунок 5 подтверждает эту мысль [11].

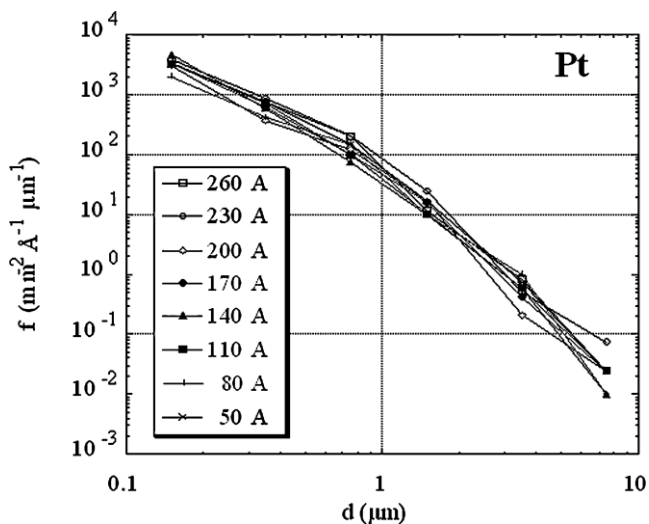


Рисунок 5 – Распределение частиц по размерам для платинового катода, как функция от тока вакуумной дуги

На долю микрокапель может приходиться до нескольких десятков процентов массы распыленного материала катода. Материал катода напрямую

влияет на размер частиц. Например, для молибдена размер микрочастиц не превышает 20 мкм, а для кадмия достигает более 100 мкм. Минимальные размеры зарегистрированных частиц – менее 100 Å. С уменьшением диаметра макрочастиц экспоненциально возрастает их количество. Однако, основные потери массы в микрокапельной фракции, например, для меди и кадмия происходят за счет частиц размером 10-40 мкм.

Макрочастицы обнаруженные на подложке, как правило, деформированы от взаимодействия, часто имеют тороидальную форму. Очевидно, что частицы находились в жидкой фазе на момент взаимодействия с подложкой, а затем мгновенно остыли. Расплющенные частицы достаточно частое явление, не только для материалов с низкой температурой плавления, но и для тугоплавких материалов. Однако не все частицы расплавлены, как показывает опыт, большинство частиц меньше чем 0,5 мкм сферичны, что свидетельствует о том, что на момент соударения они остыли и затвердели.

1.2 Поведение макрочастиц вакуумной дуги в плазме

Макрочастицы покидают поверхность катода в расплавленном состоянии и по данным работы [12] имеют температуру более 1700 °С. Энергетическое состояние макрочастицы при ее дальнейшем движении в плазме определяется общим балансом энергии. Энергетический баланс макрочастицы в плазме вакуумной дуги детально рассмотрен в работе [13]. Одним из основных источников охлаждения макрочастиц является их радиационное излучение $P_{\text{рад}}$, определяемое законом Стефана-Больцмана:

$$P_{\text{рад}} = \alpha \cdot 4\pi \cdot r_{\text{мч}}^2 \cdot \sigma \cdot T_{\text{мч}}^4 \quad (1)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К⁴ – постоянная Стефана-Больцмана, α – степень черноты материала макрочастицы, $r_{\text{мч}}$ – радиус макрочастицы, $T_{\text{мч}}$ – температура макрочастицы.

Излучение металла при высокой температуре зависит от материала и длины волны излучения. По данным работы [14] степень черноты металла α

при высоких температурах (1000-5000 К) может быть примерно равна 0,1. Однако в случае макрочастиц малого размера (около 1 мкм) это излучение может стать пренебрежимо мало из-за того, что длина волны ИК-излучения оказывается сравнима с диаметром макрочастиц [15].

В нагреве частицы, движущейся в плазме вакуумной дуги, существенную роль играет ток ионов $j_{и}$. В работе [16] для оценки ионного тока на микрокаплю используется выражение Бома:

$$j_{и} = 0,6 \cdot e \cdot n_{пл} \sqrt{\frac{T_e}{m_{и}}}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона, $n_{пл}$ – плотность плазмы, T_e – температура электронов, $m_{и}$ – масса иона.

Однако в случае плазмы вакуумной дуги ионы имеют значительную направленную скорость, и использование формулы Бома может привести к существенному занижению величины ионного тока, а значит и энергии, передаваемой от ионов к макрочастице. В работе [13] ионный ток на макрочастицу определяется исходя из плотности ионного тока, обусловленного направленным движением ионов в плазме, и поперечным сечением макрочастицы:

$$j_{и,Q} = q_{и} \cdot e \cdot n_{и} \cdot V_{и} \cdot \pi \cdot r_{Мч}^2, \quad (3)$$

где $q_{и}$ – заряд иона, $V_{и}$ – скорость ионов.

Соответственно, мощность, передаваемая ионами макрочастице, может быть оценена, исходя из выражения:

$$P_{и,пл} = \bar{z} \cdot e \cdot n_{и} \cdot V_{и} \cdot E_{и} \cdot \pi \cdot r_{Мч}^2, \quad (4)$$

где $E_{и} = \bar{z}e\varphi + (m_{и}V_{0и})/2$ – средняя энергия ионов, \bar{z} – зарядовое состояние иона, φ – потенциал макрочастицы, $V_{0и}$ – начальная скорость ионов.

Важная роль в нагреве макрочастиц принадлежит и электронам плазмы. Поток электронов и ионов на макрочастицу в плазме в установившемся режиме будет одинаковым. То есть суммарный ток на макрочастицу будет нулевым. При этом следует принимать во внимание, что в суммарный электронный ток

может вносить существенный вклад ионно-электронная эмиссия с микрокапли, термоэлектронная, а в некоторых особых случаях и автоэлектронная эмиссия. Электронный ток $I_{e,пл}$ на макрочастицу в плазме может быть оценен по формуле Ленгмюра:

$$I_{e,пл} = \int j_{и,пл} dA_{мч} \approx j_{e,пл} 4\pi r_{мч}^2 = \pi n_e V_{e,T} r_{мч}^2 \exp(\eta), \quad (5)$$

где $A_{мч} = 4\pi r_{мч}^2$ – площадь поверхности макрочастицы, $V_{e,T} = \sqrt{8k \cdot T_e} / \pi \cdot m_e$ – средняя тепловая скорость электронов, $\eta = e \cdot U \cdot s / k \cdot T_e < 0$ – установившееся напряжение слоя разделения зарядов.

Как отмечено в работе [13], если температура макрочастицы превышает 1700°C , то в балансе тока на макрочастицу необходимо учитывать ток термоэлектронной эмиссии, определяемый из уравнения Ричардсона-Дешмана:

$$I_{e,пл} = 4\pi r_{мч}^2 \cdot A_p \cdot T_{мч}^2 \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot \Phi}{k \cdot T_{мч}}\right), \quad (6)$$

где A_p – постоянная Ричардсона (для металлов и углерода $A_p = 6 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2\text{K}^2$), Φ – рабочая функция, k – постоянная Больцмана.

Ток термоэлектронной эмиссии оказывает охлаждающий эффект на макрочастицу, поскольку каждый электрон, покидающий макрочастицу, уносит с собой энергию, определяемую работой выхода электронов.

В случае если имеет место испарение вещества макрочастицы, то следует учитывать унос энергии $P_{п}$ за счет парообразования:

$$P_{п} = Q \cdot d \cdot m_{мч}, \quad (7)$$

где Q – скрытая теплота парообразования, $dm_{мч}$ – масса испаренного вещества макрочастицы за время dt .

Общий баланс энергии макрочастицы с учетом вышеназванных составляющих может быть записан в виде:

$$m_{мч} C \frac{\partial T_{мч}}{\partial t} = P_{e,пл} + P_{и,пл} + P_{изл,пл} + P_{\alpha}(T_{мч}) + P_{e,T}(T_{мч}) + P_{изл}(T_{мч}), \quad (8)$$

где C – удельная теплоемкость, $P_{e,пл}$, $P_{и,пл}$ и $P_{изл,пл}$ – тепловая мощность электронов, ионов, плазменного излучения, соответственно, $P_{e,T}(T_{мч})$, $P_{изл}(T_{мч})$

– потери энергии во времени за счет испарения атомов, эмиссии электронов и излучения.

В обычных условиях технологического применения вакуумного дугового разряда для ионной и плазменной обработки материалов, когда плотность плазмы не превышает 10^{16} м^{-3} , для большинства макрочастиц превалирует радиационное излучение, определяемое законом Стефана-Больцмана. Макрочастицы по мере своего движения постепенно остывают и даже переходят в твердое агрегатное состояние. Так, например, проведенная в работе [17] оценка, показала, что макрочастица титана, вылетающая из катода, уже на расстоянии порядка 0,03 м остывает до температуры ниже температуры плавления титана, то есть переходит из жидкого состояния в твердое.

В литературе обсуждаются различные возможности уменьшения количества и размеров макрочастиц в плазме вакуумной дуги. В работе [13] рассмотрена возможность дополнительного нагрева макрочастиц с использованием мощного микроволнового генератора в СВЧ диапазоне при частоте следования импульсов $f = 2,45 \cdot 10^9$ имп/с. Показано, что микроволны с такой частотой не могут проникать в плазму вакуумной дуги вблизи катода ($l < 0,1 \text{ м}$), где макрочастицы еще незначительно теряют свою энергию из-за радиационного излучения.

В этой же работе отмечено, что одним из вариантов дополнительного разогрева макрочастиц может быть использование мощного ИК источника излучения такого, как CO_2 -лазер. Очевидно, что применение такого лазера для испарения макрочастиц вряд ли получит реальное применение в технологиях ионно-плазменной обработки материалов по экономическим соображениям.

Другой вариант возможного нагрева и последующего испарения макрочастиц в плазме вакуумно-дугового разряда предусматривает введение в систему электронного пучка, являющегося источником дополнительного облучения макрочастиц [18]. В данной работе, представляющей собой теоретические исследования, показано, что при инжекции электронного пучка в пылевую плазму происходит существенное увеличение равновесной

температуры, до которой может разогреться макрочастица. Численные расчеты зависимости температуры макрочастиц от времени и их начального радиуса представлены на рисунке 6 [18]. Авторы данной работы делают вывод, что скорость нагрева зависит не только от параметров плазмы и электронного пучка, но и от теплофизических параметров материала макрочастиц и их радиуса. Кроме того, диапазон характерных времен нагрева макрочастиц с начальным радиусом $1 \text{ мкм}^{-10} \text{ мкм}$ составляет $(10^{-4}-10^{-3}) \text{ с}$ при энергии электронов $\varepsilon_e = 5 \text{ кэВ}$, плотности электронного пучка $n_e = 10^9 \text{ см}^{-3}$ и плотности тока электронов порядка 10^4 А/м^2 .

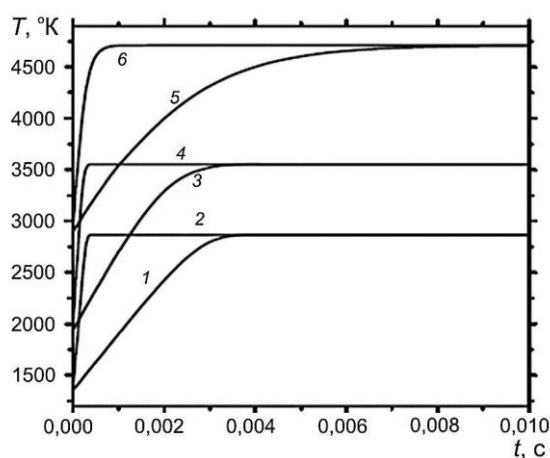


Рисунок 6 – Зависимость температуры макрочастиц в пучково-плазменной системе от времени и их радиуса ($n_{пл} = 10^9 \text{ см}^{-3}$, $n_e = 10^9 \text{ см}^{-3}$, $\varepsilon_e \approx 5 \text{ кэВ}$): 1 – Cu, $r_{МЧ}=10^{-3} \text{ см}$; 2 – Cu, $r_{МЧ} = 10^{-4} \text{ см}$; 3 – Ti, $r_{МЧ} = 10^{-3} \text{ см}$; 4 – Ti, $r_{МЧ} = 10^{-4} \text{ см}$; 5 – Mo, $r_{МЧ} = 10^{-3} \text{ см}$; 6 – Mo, $r_{МЧ} = 10^{-4} \text{ см}$)

Расчеты времени нагрева до температуры кипения и времени испарения макрочастиц с наиболее характерными размерами для плазменного потока дуги низкого давления, сделанные в работе [18], показывают, что применение электронных пучков в вакуумно-дуговых технологических системах нанесения покрытий принципиально может обеспечить испарение капельной фазы на длине пролета порядка нескольких десятков сантиметров и существенно улучшить свойства получаемых покрытий. Однако установка с высокомоушным дополнительным электронным источником может оказаться достаточно сложной в эксплуатации, хотя бы из-за возможного перепыления высоковольтных изоляторов электронной пушки.

Еще один способ испарения макрочастиц в плазме дугового разряда, представленный в работе [16], основан на сильноточном импульсном дуговом разряде низкого давления. Теоретически показана возможность испарения или уменьшения размеров определенной части капель в потоке вакуумно-дуговой плазмы. Эффективность испарения микрокапельной фракции увеличивается с ростом плотности плазмы.

1.3 Снижение генерации макрочастиц

Огромное количество работ и статей посвящены исследованию механизмов эмиссии макрочастиц, их движению взаимодействию с плазмой разряда и с поверхностью конденсации [6, 19, 20]. Большинство исследований катодного пятна затрагивают проблему образования в потоке плазмы макрочастиц. На основе этих работ экспериментально установлено, что:

- Образование потоков вещества с поверхности катода вакуумной дуги обусловлена процессами в катодном пятне; В состав этих потоков входят два основных компонента – ионы и нейтралы виде макрочастиц.
- В основном макрочастицы представляют собой капли расплавленного материала катода с размером от единиц нанометров до десятков микрометров.
- МЧ распределяются по размерам представляет в виде экспоненциально падающей функции (количество макрочастиц уменьшается с увеличением их размеров).
- Основную массу материала составляют макрочастицы «среднего» размера (примерно от 1 до 20 мкм).
- Чем ниже температура плавления материала – тем больше эрозия капельных фракции.
- Основная часть макрочастиц разлетается из катодного пятна под острым углом по отношению к эродирующей поверхности катода. Максимум углового распределения плотности потока крупных частиц находится в области

нескольких градусов, а с уменьшением размеров макрочастиц этот максимум смещается в сторону больших углов (примерно до 30-45°) [21].

- При повышении температуры катода ка эрозия капельной фракции увеличивается.

- При увеличении скорости перемещения катодного пятна по поверхности катода количество капель уменьшается.

- Убыль массы катода за счет капельной фазы эрозии уменьшается при наличии в разрядном пространстве реактивного газа, способного образовывать на поверхности катода пленки соединений с эродирующим металлом.

Макрочастица, как и всякое другое изолированное тело, погруженное в плазму, вследствие более высокой подвижности электронов по сравнению с ионами приобретает отрицательный плавающий потенциал. Для частиц с радиусом порядка 10 мкм этот потенциал составляет около – 12 В, что позволяет заметно снизить количество макрочастиц, поступающих на подложку, путем подачи на нее отрицательного напряжения смещения, достаточного для погашения направленной скорости значительной части макрочастиц (особенно мелких), движущихся в сторону подложки. При заданном потенциале подложки вероятность отражения макрочастиц от нее определяется размерами (массой), скоростью и углом падения частицы по отношению к поверхности подложки. Процесс генерации макрочастиц представлен ранее на рисунке 2.

К настоящему времени разработан ряд способов и устройств, позволяющих заметно снизить интенсивность потоков макрочастиц в эрозионной плазме дугового разряда низкого давления в технологических без фильтровых системах осаждения покрытий. Ряд таких способов и устройств рассмотрен в следующих разделах. Под безфильтровыми системами понимаются такие системы, в которых объект плазменного воздействия (подложка) находится в зоне прямой видимости с рабочей поверхностью катода, эмитирующей макрочастицы. Иначе говоря, между подложкой и катодом отсутствуют какие-либо элементы системы, которые могли бы служить механическим препятствием для

макрочастиц, движущихся в сторону подложки. Также далее будут рассмотрены и физические фильтры плазмы.

1.3.1 Управление катодным пятном

Рассмотрение способов подавления микрокапельной фракции без использования механических фильтрующих систем следует начать с метода управления катодным пятном. В отсутствие магнитного поля катодное пятно совершает хаотические перемещения, которые являются результатом чередующихся спонтанных погасаний и зажигания по соседству с зоной предшествующего горения. В присутствии магнитного поля, параллельного поверхности катода, катодное пятно перемещается в направлении – $[\mathbf{I} \times \mathbf{B}]$. Такое движение катодного пятна принято называть обратным или ретроградным. Вращение пятна уменьшает среднее время локализации пятна, а следовательно температуру и как результат значительно снижается число частиц и их размер, что подтверждает множество экспериментов.

В своем эксперименте Удрис показал [22], что при скорости пятна порядка 30 м/с, число частиц испущенных в направлении движения было значительно меньше числа макрочастиц испущенных в обратном направлении. С увеличением поля и соответственно скорости движения пятна, число частиц по направлению движения осталось постоянным, а число частиц в обратном направлении уменьшилось. Подводя итоги, он заключил, что по мере роста скорости движения пятна, число частиц и их размеры убывают монотонно.

Используя непрерывную вакуумную дугу с управляемым катодным пятном, Свифт показал [23], что при напряженности магнитного поля порядка 15 мТл скорость катодного пятна приходит к насыщению и дальнейшее увеличение поля не приносит результатов. Увеличение тока дуги, так же ограничено исходя из теплового режима, при превышении 400 °С наблюдается рост эрозии катода и образование больших кратеров. Этими факторами определяется максимальная скорость перемещения пятна на катоде.

Следует отметить, что интенсивность каплеобразования в катодном пятне определяются теплоотводом из активной зоны пятна в окружающий массив катодного материала и температурой этого массива. Доказано, что расход материала в капельной фазе увеличивается в несколько раз при повышении температуры от 370 К примерно до 770 К. В связи с этим, для обеспечения режима функционирования вакуумной дуги с малым содержанием макрокапельной фракции необходимо предусмотреть в конструкции источника эффективное принудительное охлаждение катода, в особенности для вакуумно-дуговых источников функционирующих в непрерывном режиме. Оптимальные условия охлаждения катода достигаются при прямом контакте хладагента с телом катода.

В импульсных дугах сила тока значительно выше чем в непрерывных и на поверхности загорается несколько катодных пятен испускающих плазму и макрочастицы. Несмотря на более высокие мгновенные значения тока, средняя мощность импульсной дуги значительно меньше чем у непрерывной и поэтому средняя температура поверхности катода должна быть ниже [24]. Взаимодействие одновременно горящих пятен увеличивает скорость их движения, а зажигание осуществляется на неотработанном месте на поверхности катода, тем самым, выбрасывая значительно меньше частиц меньшего размера, чем при использовании дуги постоянного напряжения. Практически нет проблемы удержания катодного пятна на рабочей поверхности катода. Снимается ограничение на минимальное значение тока дуги. Однако, в условиях промышленного производства, важным фактором является скорость нанесения покрытий, в связи с чем приходится использовать мощные источники, для которых проблема охлаждения остается настолько же актуальной, как и для источников с постоянной дугой [25].

1.3.2 Снижение интегральной температуры катода

Количество расплава в катодном пятне и, следовательно, интенсивность каплеобразования определяются теплоотводом из активной зоны пятна в окружающий массив катодного материала и температурой этого массива. Экспериментально установлено, что унос массы катодного материала в капельной фазе увеличивается в несколько раз при повышении температуры от ~ 370 К примерно до 770-920 К. В этой связи при необходимости иметь потоки эрозионной плазмы с пониженным содержанием макрочастиц в конструкции плазменного источника должно быть предусмотрено эффективное принудительное охлаждение катода (как правило, проточной водой). Прежде всего, это касается источников, работающих в режиме дуги постоянного тока. Оптимальные условия охлаждения катода достигаются при прямом контакте хладагента (воды) с телом катода. Любые прокладки между охлаждающей водой и катодом ведут к заметному ухудшению теплоотвода, повышению интегральной температуры и, следовательно, к повышению интенсивности эмиссии макрочастиц [11].

1.3.3 Присутствие газа в разрядном промежутке

Содержание макрочастиц в плазме и, соответственно, в конденсате уменьшается в присутствии активного газа в системе. В частности, установлено, что при повышении давления азота от 10^{-3} до 1 Па в системе с титановым катодом концентрация капель в конденсате снижалась от 29,6 до 14,5 %. Объясняется это тем, что в присутствии азота на поверхности катода образуется пленка нитрида титана. А поскольку температура плавления этого соединения (3223 К) существенно выше температуры плавления титана (1933 К), то эрозия катода в капельной фазе при наличии на нем слоя нитрида существенно уменьшается. Аналогичное явление наблюдается и при напуске в

систему ацетилен, а также смесей аргона с азотом или углеродосодержащим газом.

1.3.4 Снижение плотности тока

Током дуги определяется мощность, рассеиваемая в зоне, примыкающей к катодному пятну, и, следовательно, температура в этой зоне и интенсивность эмиссии макрочастиц. Снижая ток, можно таким образом уменьшить поступление макрочастиц в плазменный поток, генерируемый катодным пятном. С другой стороны, от тока зависит производительность процесса осаждения покрытия. Поэтому снижать температурный эффект разрядного тока с целью ослабления процесса генерации макрочастиц целесообразнее не в результате его уменьшения, а путем равномерного распределения его воздействия на всю рабочую поверхность катода. При этом фактором, влияющим на эмиссию макрочастиц, становится не величина разрядного тока, а его плотность, распределенная по всей рабочей поверхности катода и усредненная по времени.

1.3.5 «Бескапельные» режимы дуги

В обзоре [8] Боксман и Голдсмит ссылаются на ряд работ по исследованию возможности осуществления таких режимов дуги, при которых генерируются бескапельные атомарно-ионные потоки. Один из способов получения таких потоков основан на распылении мишени из рабочего металла высокоэнергетичными ионами того же металла, генерируемых дугой с катодным пятном. Подложка при этом размещается в потоке распыляемых частиц материала мишени и «отгораживается» от катода, эмитирующего плазму с макрочастицами.

Другой способ состоит в том, что один из электродов дуги термически изолируют. В этом случае температура этого электрода может достигать уровня, при котором происходит интенсивное его испарение со сравнительно

большой поверхности без образования капель. Если теплоизолированным является анод, то подложку размещают на пути прямых потоков с анода, но так, чтобы она, как и в первом случае, была отгорожена от катода. Следует отметить, что как первый, так и второй способы можно отнести к бесфильтровым лишь с определенной долей условности, так как в обоих случаях подложка находится вне зоны видимости со стороны катода, хотя между источником конденсируемых потоков частиц и подложкой никаких преград нет.

Если теплоизолированным электродом является катод, то для некоторых катодных материалов (особенно сублимирующих) возможен переход дуги с катодным пятном к дуге с распределенной зоной привязки разряда к катоду без образования микропятен, эмитирующих макрочастицы. Во всех трех случаях генерируемые пароплазменные потоки отличаются низкой степенью ионизации при низкой энергии частиц. Это при формировании покрытий на подложках с низким уровнем допустимых тепловых нагрузок может рассматриваться как преимущество. Следует, однако, отметить, что ни один из рассмотренных методов пока не вышел за рамки лабораторных исследований.

Одним из способов уменьшения макрокапельной фракции на подложке, является приложение к ней отрицательного потенциала смещения. Впервые эффект наблюдался экспериментально в работах [3, 4], отмечено 3-4 кратное подавления капель на поверхности TiN образца при повышении отрицательного потенциала смещения до $U_{см} = -1000$ В. Теоретическое обоснование предложил Кейдар с коллегами в статьях [26, 27]. Он связал эффект подавления с приобретением нейтральной частицей отрицательного заряда в плазме и ее отражения от отрицательного потенциального электрода. Исследован процесс формирования слоя разделения заряда между потенциальным электродом и квазинейтральной плазмой, изучено влияние плотности плазмы на перезарядку частицы под действием положительных ионов в слое разделения заряда. По известному распределению скоростей частиц, определен критический радиус частиц при котором возможно отражение. Кроме того, показано, что

увеличение потенциала смещения усилит эффект, однако из-за возникающих пробоев технологическое применение потенциалов выше $U_{см} = -1000$ В затруднено.

Также было предложено увеличить температуру электронов в плазме для усиления эффекта отражения частиц и соответственно, величину потенциала до которого сможет зарядиться макрочастица. Помимо плазмы вакуумно-дугового разряда использовалась и газоразрядная плазма низкого давления с накаливаемым катодом. При аналогичном потенциале смещения в $U_{см} = -1000$ В достигнуто снижение капельной фракции в 5 раз.

Кроме того, для увеличения амплитуды потенциала можно использовать высокочастотный коротко-импульсный потенциал смещения. Установлено уменьшение плотности макрокапель на поверхности со временем, при потенциале $U_{см} = -2000$ В, длительности импульса $\tau = 8$ мкс, частоте $f = 10^5$ Гц и временах экспозиции 9-18 мин, наблюдалось уменьшение капель с диаметром менее микрона в 1500 раз. Несмотря на доказанную эффективность метода, вопросы связанные с физическими механизмами усиления эффектов подавления микрокапель требуют дальнейшего уточнения.

1.3.6 Принцип действия и основные разновидности плазменных фильтров

Наиболее эффективный способ очистки плазмы вакуумной дуги от микроскопических включений является использование механических плазменных фильтров. На сегодняшний день разработано большое количество подобных систем обладающих различной степенью очистки плазмы, эффективностью ее прохождения и сложностью конструкции, однако за исключением наиболее экзотических решений они основаны на общем принципе [28-30].

Принцип работы большинства плазменных фильтров основан на том, что нейтральные атомы и макрочастицы, которые вылетают с катода, летят

прямолинейно и могут осаждаться на конструктивных элементах фильтра, при этом движением потоков плазмы можно управлять с помощью различных конфигураций магнитных и электромагнитных полей [31].

Макрочастицы, двигаясь прямолинейно, наталкиваются на эту преграду и не попадают на подложку, в то время как ионная компонента плазменного потока с помощью магнитного поля направляется на образец. Эффективность очистки плазмы тем выше, чем длиннее плазмод, чем он уже и чем больше угол его суммарного изгиба. Однако возрастают потери ионной компоненты, снижается производительность, увеличивается сложность и стоимость его изготовления. Следует так же отметить, что криволинейные фильтры характеризуются крайне неоднородным поперечным распределением плотности выходного плазменного потока, а эффективная площадь поперечного сечения для таких систем составляет лишь несколько см². Это обуславливает необходимость дополнительного усложнения системы введением узлов развертки плазменного потока [32].

Другой важной характеристикой системы формирования чистой эрозионной плазмы является пропускная способность фильтра, которая зависит от уровня потерь плазмы при ее транспортировке вдоль фильтрующего канала. Показателем транспортирующих качеств фильтра является отношение количества ионов на его выходе к количеству ионов, вошедших в него. Однако в подавляющем большинстве случаев входной поток ионов определить затруднительно. Удобнее использовать так называемый системный коэффициент определяемый отношением выходного ионного тока к току дуги.

В случае криволинейного плазмоды кроме диффузии частиц на стенки поперек магнитного поля следует также учитывать их уход, обусловленный смещением (дрейфом) потока в криволинейном поле в направлении векторов R и $[H \times R]$, а так же потери, обусловленные отражением частиц от сужений потока силовых линий транспортирующего поля H .

Классический фильтр с плазмодом в виде части тора схематически изображен на рисунке 7. С момента публикации первых даны по фильтрам

этого типа и до настоящего времени они остаются наиболее распространенными как в лабораторной, так и в производственной практике [33]. Андерсом и Брауном [34] установлены оптимальные соотношения магнитных полей на стыке между плазменным источником и плазмовеющим каналом, подтверждена важная роль положительного потенциала подаваемого на плазмовод, в повышении системного коэффициента фильтра, доводя его до 2,5 %.

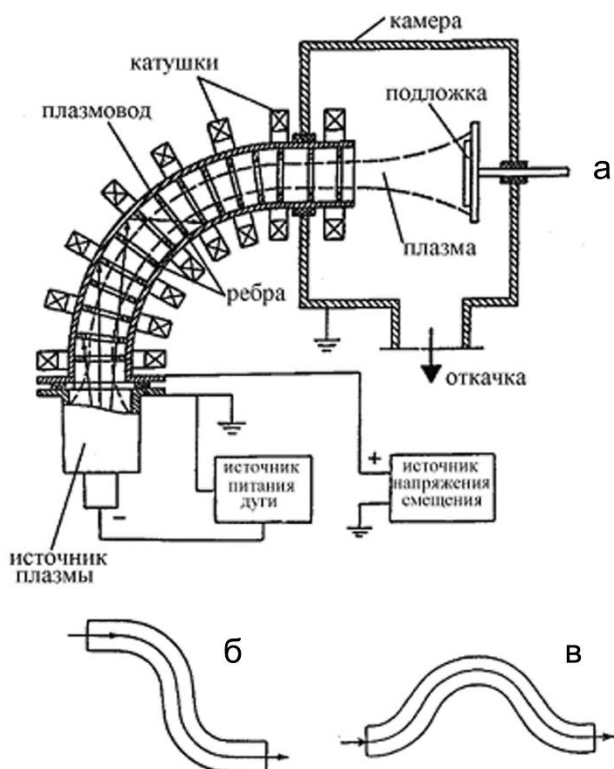


Рисунок 7 – Плазменный источник с криволинейным фильтром [33]: фильтр с плазмоводом в четверти тора (а); S-образный плазмовод (б); Ω-образный плазмовод (в); 1 – источник плазмы; 2 – плазмовод; 3 – ребра; 4 – катушки; 5 – камера; 6 – подложка; 7 – плазма; 8 – источник питания дуги; 9 – источник напряжения смещения

В поиске путей улучшения качества очистки плазмы от макрочастиц, некоторые исследователи увеличивали угол изгиба плазмовода до 120° , 180° и больше [34-36]. Одним из таких устройств является так называемый S-образный фильтр, плазмовод которого представляет два соединенных последовательно плазмовода в виде четверти тора, изогнутые в противоположные стороны, рисунок 8 [37].

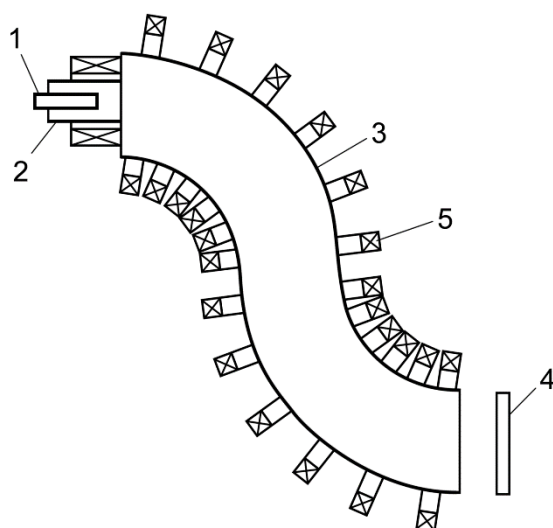


Рисунок 8 – S-образный фильтр с миниатюрным импульсным источником [37]:

1 – катод; 2 – анод; 3 – плазмовод; 4 – подложка; 5 – магнитные катушки

Такое решение улучшает качество фильтрации, но уровень потерь в более длинном канале столь велик, что системный коэффициент не превышает 0,6 %. В этой связи источники с S-образным фильтром представляется целесообразным использовать только в физических исследованиях, а так же в практике синтеза тонких и сверхтонких пленок, когда при повышенных требованиях к частоте плазме отсутствует необходимость обеспечивать высокие скорости осаждения конденсата.

Как альтернатива криволинейному плазменному фильтру был разработан так называемый прямолинейный фильтр с магнитным островом [38, 39]. Его устройство и принцип действия иллюстрирует рисунок 9. Выполнение основного конструктивного требования – отсутствие прямой видимости между катодом и анодом достигается тем, что в прямолинейном цилиндрическом плазмоводе на его оси размещается плоский экран (пассивный «остров»), перекрывающий эту видимость. Транспортировка ионно-электронной компоненты плазмы осуществляется вдоль линий осесимметричного магнитного поля, пересекающих активную поверхность катода и огибающих экран.

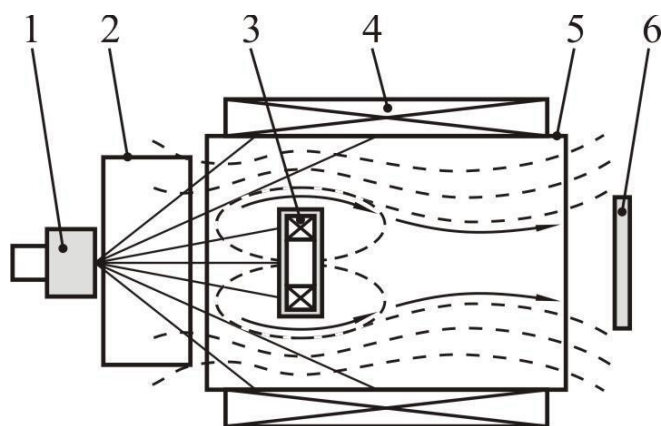


Рисунок 9 – Схема источника плазмы с фильтром типа «магнитный остров» [39]: 1 – катод; 2 – анод; 3, 4 – магнитные катушки; 5 – плазмодук; 6 – мишень; → – направление движения ионов и электронов; ----- –траектории макрочастиц

Установлено, что дрейфовые потери могут быть заметно снижены локальной корректировкой магнитного поля, а также подачей отрицательного потенциала на часть стенки криволинейного плазмодода вблизи его выходного проема со стороны, противоположной направлению $[H \times R]$ или в направлении R , при положительном потенциале смещения на плазмододе в целом. Уровень потерь независимо от их происхождения снижается, а ионный ток на выходе криволинейной части плазмодоводящего канала соответственно увеличивается с повышением положительного потенциала смещения на плазмододе. В исследуемом варианте системы ее максимальная пропускная способность отмечалась при смещении ~ 25 В. В режиме «частично отрицательного» плазмодода достигнуты максимальные значения пропускной способности системы. При этом в отличие от традиционных условий ионный ток на выходе увеличивался, не достигая максимума, с ростом положительного смещения до 50 В. Изложенные результаты использованы при разработке источника с Т-образным плазмододом [40], схематический чертеж которого представлен на рисунке 10. Системный коэффициент эффективности источника достигает 5,5 %.

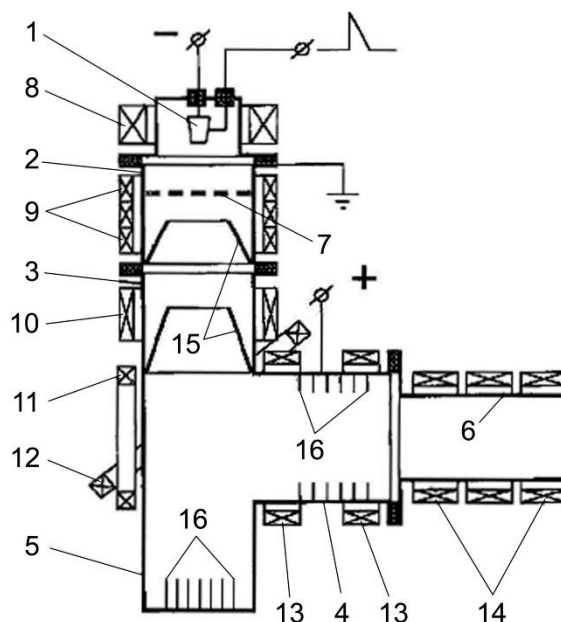


Рисунок 10 – Вакуумно-дуговой источник фильтрованной плазмы с Т-образным плазмодом [40]: 1 – катод; 2 – анод; 3,4 – входная и выходная секции плазмодода; 5 – ловушка макрочастиц; 6 – дополнительная секция плазмодода; 7 – анодная вставка; 8-14 – магнитные катушки; 15 – экраны; 16 – ребра

Наиболее простая и эффективная система фильтрации плазмы от микрочастиц, была предложена и исследована в работах [41, 42, 43, 44]. Аксиально-симметричный плазменный фильтр, представляет собой систему вложенных друг в друга конусов. Конструкция фильтра представлена на рисунке 11.

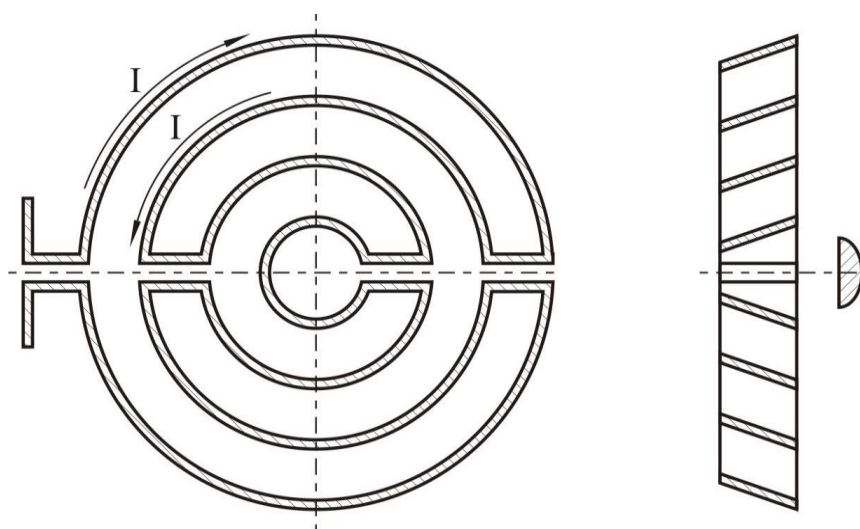


Рисунок 11 – Конструкция аксиально-симметричного плазменного фильтра

Схема его использования совместно с аксиально-симметричным вакуумно-дуговым испарителем показана на рисунке 12.

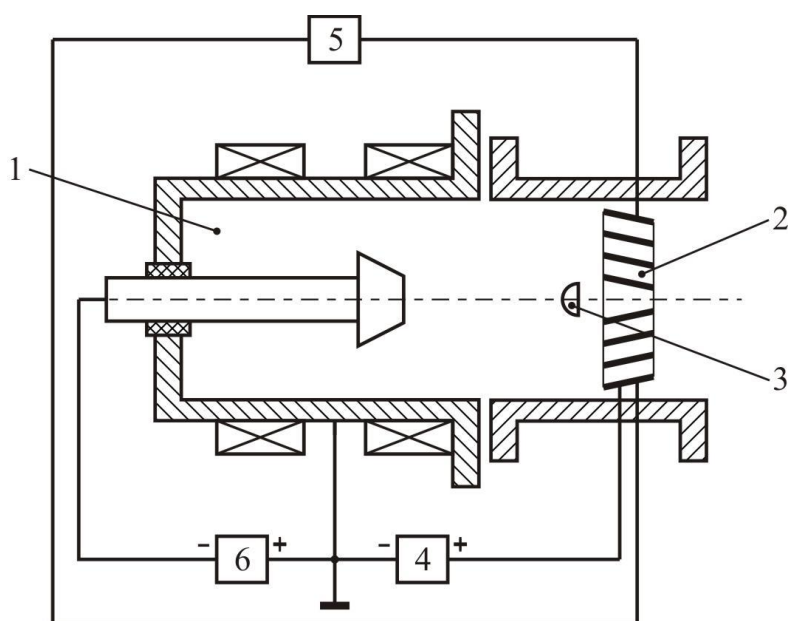


Рисунок 12 – Схема включения аксиально-симметричного плазменного фильтра совместно с электродуговым испарителем «Булат-3»: 1 – электродуговой испаритель; 2 – электроды (жалюзи) плазменного фильтра; 3 – защитный экран; 4 – источник питания для формирования дополнительного смещения на электродах плазменного фильтра; 5 – источник питания для формирования в межэлектродном пространстве плазменного фильтра магнитного поля; 6 – источник питания электродугового испарителя

По замкнуто-жалюзийной системе фильтра, пропускается ток на уровне одного килоампера, для создания магнитного поля в пространстве между электродами (жалюзьями). На плазменный фильтр подается положительный потенциал смещения с амплитудой порядка 12-15 В. Данный фильтр обеспечивает уменьшение микрокапельной фракции на выходе в 10^2 - 10^3 раз [41, 42, 43, 44]. Характерно, что благодаря фокусирующей геометрии электродов плазменного фильтра, распространение микрокапельной фракции возможно, преимущественно, только в направлении некоторого телесного угла, определяемого углом наклона электродов фильтра, рисунок 13.

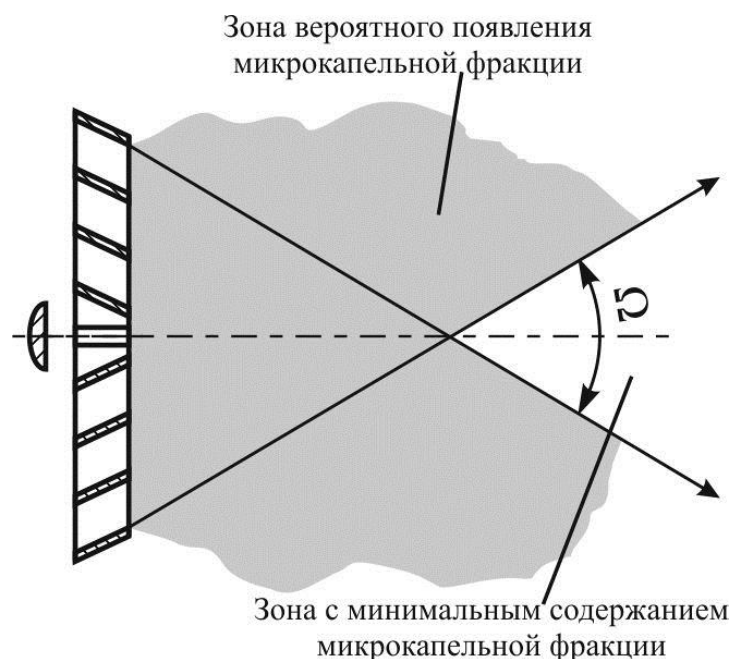


Рисунок 13 – Схема распределения микрокапельной фракции на выходе плазменного фильтра

Таким образом, при размещении образцов на расстоянии, превышающем геометрический фокус плазменного фильтра, обусловленным конической формой его электродов, можно добиться дополнительного снижения микрокапельной фракции в структуре формируемого покрытия.

Простота конструкции, компактность, высокая надежность и эффективность транспортировки плазмы через плазменный фильтр жалюзийного типа обеспечили возможность его применения в источнике ионов металлов и плазмы на основе непрерывной вакуумной дуги [45].

В целом, следует отметить, что разработанные к настоящему времени плазменные фильтры, обеспечивая необходимую с технологической точки зрения очистку плазмы от макрочастиц, уменьшают в несколько раз поток плазмы дугового испарителя. Это означает, что для высокопроизводительных технологий ионно-плазменного осаждения покрытий и плазменно-иммерсионной имплантации ионов металлов должны бы использоваться установки, оснащенные гораздо большим числом вакуумно-дуговых испарителей с соответствующими системами фильтрации макрочастиц. Сложность технической реализации таких установок и экономические затраты на их создание и эксплуатацию ограничивают развитие этих технологий.

Другой важной характеристикой системы формирования чистой эрозионной плазмы (помимо степени очистки) является пропускная способность фильтра, которая зависит от уровня потерь плазмы при ее транспортировке вдоль фильтрующего канала. Показателем транспортирующих качеств (пропускной способности) фильтра является отношение количества ионов на его выходе к количеству ионов, вошедших в него. Однако в подавляющем большинстве случаев входной поток ионов определить затруднительно.

Более удобно пользоваться величиной выходного ионного тока I_i , отнесенной к величине разрядного тока дуги I_a . Поэтому чаще употребляется так называемый «системный коэффициент» $K_s = I_i/I_a$, который характеризует не только фильтр, но и степень согласования плазменного источника с фильтром, т.е. является показателем качества системы источник-фильтр в целом.

В случае криволинейного плазмоведа (с радиусом кривизны R) кроме диффузии частиц на стенки поперек магнитного поля следует также учитывать их уход, обусловленный смещением (дрейфом) потока в криволинейном поле в направлении векторов R и $[H'R]$, а также потери, обусловленные отражением частиц от сужений потока силовых линий транспортирующего поля H . Такие сужения могут возникать в местах, где «сшиваются» поля отдельных частей плазмоведа: между выходом генератора плазмы и входом тороидального плазмоведа, между отдельными катушками плазмоведа.

Анализ движения плазмы вдоль тороидального магнитного поля показывает, что для свободного перемещения плазмы его напряженность в плазмоведающем канале должна удовлетворять соотношению:

$$i > \frac{M_i \cdot V_0 \cdot c}{Z \cdot e \cdot a}, \quad (9)$$

где a – внутренний радиус плазмоведа; M_i , V_0 , Z – масса иона, его поступательная скорость и кратность заряда соответственно; e – электронный заряд; c – скорость света.

При транспортировке потоков плазмы металлов с энергией даже в несколько десятков электронвольт для выполнения неравенства (9) потребовались бы поля свыше 1 Тл. Но при таких полях практически невозможно обеспечить стабильное горение дуги постоянного тока. Кроме того, определенные трудности возникли бы при инжекции плазмы в такое поле. Таким образом, представлялось целесообразным исследовать транспортировку потоков плазмы тяжелых элементов в криволинейной системе со скрещенными электрическим и магнитным полями, руководствуясь принципами плазмооптики, реализованными ранее в фильтрующей системе [46, 47]. В этом случае необходимое магнитное поле определяется выполнением требования

$$\rho_e \ll a < \rho_i, \quad (10)$$

где ρ_e , ρ_i – электронный и ионный ларморовские радиусы соответственно) и является существенно слабее тех полей, которые отвечают неравенству (10). При этом замагниченными являются только электроны, а ионы остаются незамагниченными. Электроны частично замагниченной плазмы движутся по спирали вдоль линий магнитного поля. В связи с высокой продольной проводимостью плазмы магнитные силовые линии в рассматриваемой системе являются эквипотенциалами. Линии имеют потенциал того электрода, с которым они пересекаются. Таким образом, пучок магнитных линий (magnetic flux-tube магнитная силовая трубка), пересекающий активную поверхность катода, находится под потенциалом этого электрода (за вычетом катодного падения). Электроны, возникающие на катоде, движутся вдоль такой трубки, а вместе с ними движутся и ионы, которые электростатически удерживаются электронами, так что квазинейтральность плазмы сохраняется. Если плазмовод электрически изолирован от анода, то он может быть заряжен положительно вследствие попадания на него наиболее высокоэнергетичных ионов, которые не могут быть удержаны отрицательным пространственным зарядом транспортируемых электронов. В этом случае плазмовод приобретает положительный плавающий потенциал. Возникающее при этом радиальное электрическое поле между транспортирующей магнитной трубкой и

положительно заряженным плазмодом способствует транспортировке ионной компоненты плазмы. Для повышения эффективности транспортировки на криволинейный плазмод должен быть подан «принудительный» положительный потенциал (около 20 В) от специального источника.

Такая теоретическая модель была использована в работе [47] для описания движения ионов в тороидальных фильтрах и впоследствии стала известна как «flux-tube» модель. Более тщательно она была исследована Боркером с сотрудниками [48].

В дальнейшем было предложено несколько более совершенных моделей, преимущества которых продемонстрированы в ряде теоретических и экспериментальных исследований [49, 50]. Вместе с тем, как отмечалось выше, в соответствии с наиболее простой и предельно доступной для понимания концепцией транспортировка ионов плазмы в криволинейном плазмодуэющем канале в условиях замагниченности электронов происходит вдоль магнитных силовых линий, пересекающих активную поверхность катода. Причем эти линии нигде не должны пересекать стенки плазмодоа, чтобы ведомая этими линиями плазма также не уходила на стенки плазмодоа или других элементов плазмодоуэющего канала. Эффективность транспортировки зависит от уровня диффузионных и дрейфовых потерь плазмы при ее прохождении через фильтрующий канал. Следовательно, условия прохождения плазмы через фильтр организовать тем проще, чем больше радиус плазмодоа а по отношению к радиусу катода r_k , чем короче путь L между входом и выходом системы, чем сильнее магнитное поле (до определенного предела), чем меньше угол изгиба плазмодоа и, следовательно, кривизна транспортирующего Н-поля и чем меньше вариации толщины транспортирующего пучка силовых линий. Очевидно, что те из перечисленных требований, которые относятся к геометрическим параметрам, вступают в противоречие с требованиями, выполнение которых обеспечивает наилучшее фильтрующее качество системы (см. предыдущий раздел). В этой связи выбор геометрических параметров R , r_k , L и θ (суммарный угол изгиба плазмодоа) определяется допустимым

компромиссом между "конфликтующими" требованиями. Что же касается потерь ионной компоненты, то при заданной геометрии проектируемой системы, обеспечивающей требуемую степень фильтрации, минимизировать эти потери возможно подбором оптимальных напряженности и топографии транспортирующего магнитного поля.

Очистка плазмы с применением барьерных фильтров имеет существенный недостаток в виде низкой пропускной способности потока ионизированных частиц, что существенно снижает скорость обработки материала. В связи с этим данный метод не применяется для обработки в промышленных масштабах.

Глава 2 Оборудование и методики исследований

2.1 Описание экспериментальной установки

Исследование влияния магнитного поля на генерацию макрочастиц проводили с двумя типами вакуумных дуговых испарителей. Катоды обоих испарителей из меди. Первый – традиционный катод с нормальным к поверхности магнитным полем. Второй – испаритель с тангенциальным магнитным полем, чертеж данного катодного узла приведен в приложении А. Основой установки является вакуумная камера стандартной промышленной установки ННВ – 6.6-И1 объемом $\sim 0.2 \text{ м}^3$. Схема установки и испарителей показана на рисунке 14.

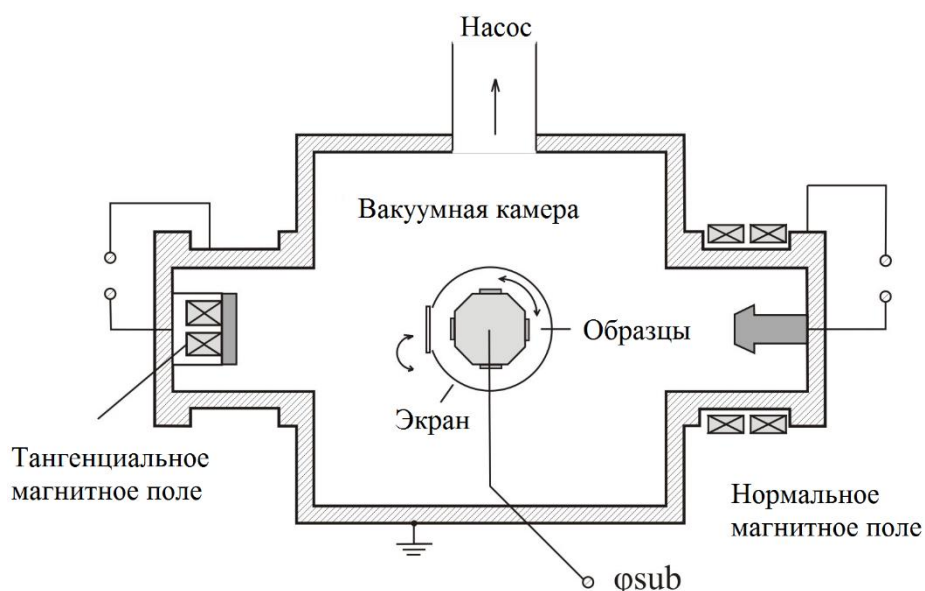


Рисунок 14 – Схема экспериментальной установки

С помощью диффузионного промасленного насоса создается рабочее давление в камере до 10^{-3} Па. Для измерения давления в камере применяется вакуумметр ВИТ-3, в который входит датчик термопары датчик для измерения давления в диапазоне от 1 до 10^{-1} Па и датчик ионизации, используемый для измерения давления в диапазоне $10^{-1} \div 10^{-7}$ Па.

Высокочастотный короткоимпульсный отрицательный потенциал смещения подавался по коаксиальным кабелям на металлический держатель от генератора, позволяющего получить импульсы длительностью 7 мкс и паузой между импульсами 3 мкс. Таким образом, частота следования импульсов в

обычном режиме работы генератора составляла 10^5 имп/с, а коэффициент заполнения импульсов 0,7. Амплитуда импульса смещения может варьироваться от 0 до -4000 В, длительность переднего фронта импульса – $0,2 \div 0,5$ мкс, в зависимости от характера нагрузки и амплитуды импульса, длительность заднего фронта импульса целиком определялась характером и величиной нагрузки. Изменение активной нагрузки генератора позволяло существенно удлинить задний фронт импульсов потенциала смещения и таким образом обеспечить экспериментальное моделирование условий ионной обработки изделий при коэффициенте заполнения импульсов, приближающимся к 100 %.

В экспериментах были использованы образцы из нержавеющей стали. Обрабатываемая поверхность предварительно полировалась до $R_a = 0,035$ мкм. Образцы устанавливались на массивном держателе на расстоянии 24 см до испарителя. Также поверхность каждой из подложек предварительно обрабатывалась с использованием плазмы аргона и высокочастотного короткоимпульсного потенциала смещения.

Внешний вид генератора и характерные осциллограммы импульсов потенциала смещения представлены на рисунке 15. Для регистрации выходного сигнала использован осциллограф Tektronix TDS2024B, характеристики которого приведены в таблице 1, а его внешний вид представлен на рисунке 16.

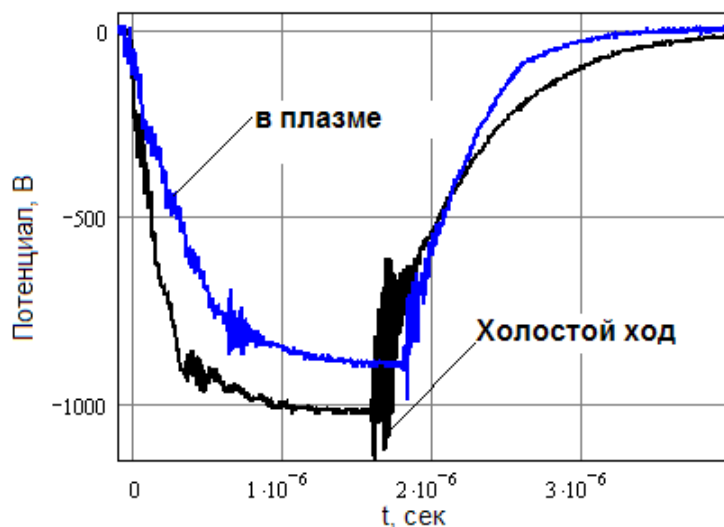


Рисунок 15 – Внешний вид импульсно-периодического источника потенциала

смещения и характерные осциллограммы импульсов

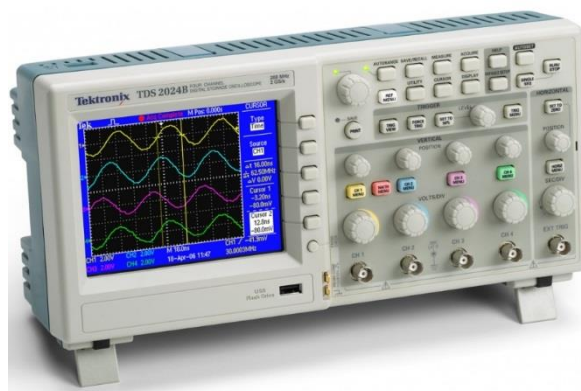


Рисунок 16 – Внешний вид осциллографа Tektronix TDS2024B

Таблица 1 – Технические характеристики осциллографа Tektronix TDS2024B

| | |
|--|---|
| Полоса пропускания (при 2 м/дел полоса пропускания 20 МГц) | 200 МГц |
| Число каналов | 4 |
| Вход внешней синхронизации | Имеется |
| Частота дискретизации в каждом канале | 2,0 Г _{выб} /с |
| Погрешность по постоянному току по вертикали | 3 % |
| Погрешность горизонтальной развертки | 50·10 ⁻⁶ |
| Тип входа | Постоянный ток (DC), переменный ток (AC) и заземление входа (GND) во всех моделях |
| Входной импеданс | 1 Мом параллельно с емкостью 20 пФ |
| Диапазон горизонтальной развертки | 2,5 нс/дел - 50 с/дел |

2.2 Подготовка экспериментальных образцов

Физико-механические характеристики, во многом определяют эксплуатационные свойства поверхностных слоев материалов и покрытий, подвергнутых воздействию пучков заряженных частиц и плазмы. Специфическая особенность пучковых и плазменных технологий связана с совокупностью физических процессов, происходящих на поверхности и в приповерхностных слоях материалов включая, например, распыление атомов,

вторичную ионную и электронную эмиссии, рассеяние и торможение ионов, диффузию атомов, формирование радиационных дефектов, конденсацию вещества и т.д. Как следствие, эти процессы обуславливают одновременное изменение целого ряда характеристик материалов. В связи с этим возникает острая необходимость именно в комплексном исследовании свойств материалов и установлении взаимосвязи их изменения от условий и режимов ионной и плазменной обработки.

Важный фактор, влияющий на эффективность и качество проведения исследований физико-механических и эксплуатационных свойств материалов и покрытий, связан с подготовкой экспериментальных образцов. Как показали оценки, время подготовки образцов может достигать до 80 % от общего времени отработки технологических режимов ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов. С целью повышения производительности процесса подготовки экспериментальных образцов «Центр исследования свойств материалов» – ЦИСМ укомплектован прецизионным отрезным станком АТА BRILLANT 201, рисунок 17 а. Станок оснащен функцией отрезания длинных образцов, а используемые отрезные круги обеспечивают резку твердых сплавов, керамики, полимеров, цветных металлов и др. В процессе резки применяется водяное охлаждение.



Рисунок 17 – Оборудование ЦИСМ для подготовки экспериментальных образцов: а) Отрезной станок АТА BRILLANT 201, б) Шлифовально-

полировальная машина АТА SAPHIR 320

В экспериментах использовались образцы нержавеющей стали и титана квадратной формы, рисунок 18.



Рисунок 18 – Образец из нержавеющей стали

Подготовка образцов осуществляется с использованием шлифовально-полировальной машины АТА SAPHIR 320, рисунок 17 б. Машина оснащена головкой Rubin 500, что обеспечивает мокрое шлифование и полирование различных материалов в автоматическом режиме. Шлифование и полирование материалов производится с применением абразивных кругов, полировального сукна, алмазных суспензий с различным размером зерна. С помощью данного прибора образцы полируются до $R_a = 0,035$ мкм. Полировка производится путем постепенного уменьшения размера абразивных частиц на полировальных кругах. Технические характеристики SAPHIR 320 приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики SAPHIR 320

| | |
|------------------------------|---------------|
| Мощность, кВт | 0,4 |
| Рабочий круг – диаметр, мм | 200, 250 |
| Скорость, об/мин | 50-600 |
| Индивидуальная нагрузка | До 5 образцов |
| Шероховатость по R_a , мкм | До 0,05 |

2.3 Оборудование для исследования свойств материалов и покрытий

После ионной и плазменной обработки различных образцов свойства полученных поверхностных слоев и покрытий исследовались комплексом

стандартного оборудования. Адгезионные свойства покрытий исследовались при помощи микроскретчтестера.

Измерительная установка «Micro Scratch Tester MST-S-AX-0000», рисунок 19, фирмы «CSEM Instruments» позволяет исследовать адгезионные свойства различных покрытий и пленок. Принцип действия прибора заключается в создании на поверхности образца продольной царапины протяженностью

до 20 мм при равномерном движении алмазного конуса и при постоянной или изменяющейся нормальной нагрузке, величина которой может быть задана в пределах 0,1 мН÷30 Н. Технология исследования включает в себя следующее: во время теста на образец, движущийся со скоростью 0,1÷20 мм/мин наносится контролируемая царапина при помощи алмазного наконечника. Наконечник проходит по поверхности исследуемого покрытия при постоянной или изменяющейся нагрузке. При определенной критической нагрузке покрытие начнет отслаиваться.



Рисунок 19– Измерительная установка «Micro Scratch Tester MST-S-AX-0000»

Критические нагрузки определяются очень точно при помощи акустического датчика, датчика тангенциальной нагрузки, датчика глубины проникновения индентора, нормальной нагрузки и изображений встроенного оптического микроскопа. Полученные данные о критической нагрузке используются для количественного анализа адгезионной прочности покрытия. Прибор компенсирует неоднородность подложки выполняя предварительное сканирование при низкой нагрузке.

Прибор оснащен моторизованным рабочим столом и микроскопом фирмы «Nicon», обеспечивающим 50-, 200-, 1000-кратное увеличение, позволяющее измерять линейные размеры микроскопических объектов.

Микротвердость сформированных покрытий исследовалась с использованием микротвердомера. Прибор позволяет выполнять индентирование поверхности на глубину до 20 мкм с разрешением 0,03 нм при величине нагружения от 0,8 до 300 мН с разрешением ± 1 мкН. Полученные кривые характеризуют силу реакции подложки в процессе нагружения и разгрузки образца, что позволяет судить не только о микротвердости, но и о пластических свойствах исследуемого поверхностного слоя.

Исследования морфологии поверхности исходных образцов и сформированного покрытия проводились при помощи трехмерного бесконтактного (оптического) микропрофилометра. Профилометр позволяет исследовать фрагменты поверхности размерами 100×100 мм при минимальном размере прохода 0,1 мм и максимальной скорости прохода (по X и по Y) 20 мм/сек. Прибор оборудован набором из трех датчиков, позволяющих измерять глубины до 20, 80 и 300 мкм с разрешением 0,001, 0,003 и 0,01 мкм, соответственно. При этом производительность прибора ограничена максимальной скоростью сбора данных, которая не превышает 1000 точек в секунду.

Для анализа толщины покрытий применялась методика исследования сферического шлифа, реализованного на приборе CSEM Instruments «Calotest», рисунок 20. Прибор предназначен для измерения толщины покрытий в диапазоне 0,1-50 мкм, в том числе многослойных. Может быть исследован образец любой геометрической формы. Время измерения, как, правило, не превышает несколько минут, что делает прибор высокоэффективным инструментом при обработке технологий формирования современных многослойных покрытий.



Рисунок 20 – Внешний вид прибора «Calotest»

Прибор отличается простым и оригинальным принципом работы, схема которого приведена на рисунке 21. Вращающийся шар с известным диаметром прижимается к поверхности образца при помощи выбранной нагрузки. Положение шара относительно образца и контактная нагрузка являются постоянными. После добавления абразивной пасты к контактному участку на поверхности образца формируется сферический шлиф. Изображение шлифа анализируется программным обеспечением прибора «Calotest». Из представленной на рисунке 21 схемы видно, что толщина покрытия может быть

рассчитана, как $s = 0,5 \cdot (\sqrt{4R^2 - d^2} - \sqrt{4R^2 - D^2})$.

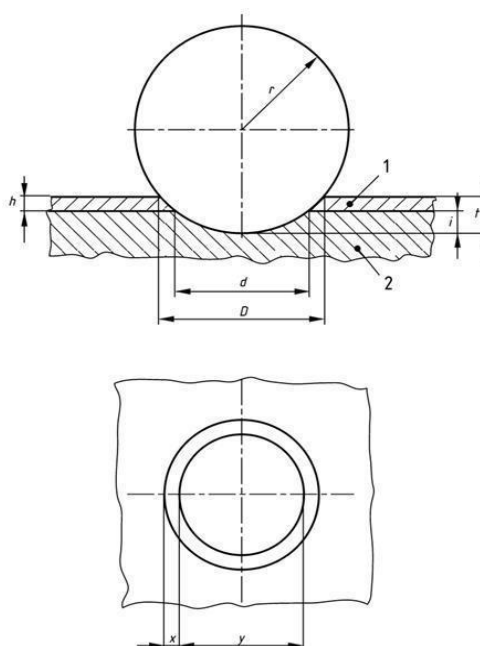


Рисунок 21 – Схема измерения толщины покрытия

Микрофотографии поверхности экспериментальных образцов получены при помощи электронного сканирующего микроскопа Hitachi TM 1000, рисунок 22, предназначенного для исследования морфологии и химического состава поверхности твердых образцов. Микроскоп укомплектован детектором M1000 EDS, предназначенным для определения химического состава образца. Химический состав определяется путем измерения энергии рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии электронного пучка с поверхностью образца. Программное обеспечение спектрометра позволяет идентифицировать пики и предоставить качественную информацию о составе образца, а учет процессов поглощения дает возможность получения количественной информации. Характеристики электронного сканирующего микроскопа представлены в таблице 3.



Рисунок 22 – Микроскоп Hitachi TM 1000

Таблица 3 – Характеристики Hitachi TM-1000 [44]

| | |
|----------------------------------|--|
| Ускоряющее напряжение, В | 15000 |
| Детектор | Полупроводниковый детектор обратно рассеянных электронов |
| Увеличение, крат | 20 – 10000 (Цифровое увеличение: 4) |
| Диапазон перемещения столика, мм | X = 15, Y = 18 |
| Максимальный размер образца, мм | D = 70 |
| Максимальная высота образцы, мм | H = 20 |
| Вакуумная система | Турбомолекулярный, диафрагменный насосы |
| Операционная система | Microsoft Windows XP Professional |
| Габариты, мм | 478 (Ш)×564 (Д)×513 (В) |

Определение плотности макрочастиц на поверхности потенциального электрода, погруженного в плазму вакуумно-дугового испарителя, проводилось на основе анализа полученных микрофотографий. Экспериментальные данные по изменению поверхностной плотности макрочастиц представлены в абсолютных величинах и в относительных, выраженных коэффициентом эффективности подавления микрокапельной фракции и могут быть посчитаны по формуле:

$$k = N_0 / N = n_0 / n \quad (11)$$

где $N = nS$ – число макрочастиц, находящихся, на выбранной площади образца (S) под отрицательным потенциалом смещения, $N_0 = n_0S$ – число макрочастиц, находящихся, на выбранной площади образца (S) под анодным потенциалом.

Исследуемая площадь образца S связана с получением статистически достоверных результатов расчета поверхностной плотности макрочастиц и для каждой экспериментальной точки общая площадь составила 60000 мкм^2 .

Глава 3 Исследование закономерностей подавления микрокапельной фракции на потенциальном электроде

3.1 Влияние магнитного поля направленного нормально к поверхности катода

При осаждении медной плазмы с применением магнитного поля, направленного нормально к поверхности катода, при отрицательном анодном потенциале смещения, на поверхности подложки проявляется большое количество макрочастиц. На рисунке 23 а изображена поверхность подложки после 6 минут ионно-плазменного напыления. Изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) показывают, что большинство макрочастиц имеют диаметр менее 1 мкм. В то же время есть много больших макрочастиц диаметром до десятков микрометров, которые имеют уплощенную форму. Это означает, что в момент взаимодействия с поверхностью они находятся в жидком состоянии. Зависимость поверхностной плотности макрочастиц от времени обработки при отрицательно анодном потенциале смещения показана на рисунке 3 (кривая 1).

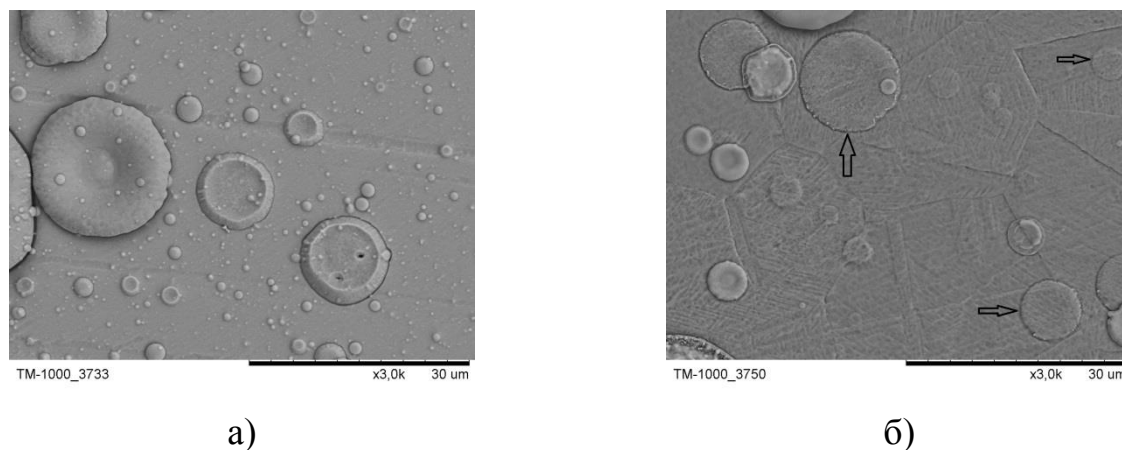


Рисунок 23 – СЭМ-фотографии поверхности подложки через 6 мин из обработки (нормальное поле): а) с отрицательным анодным потенциалом смещения; б) отрицательный короткоимпульсный потенциал смещения

$$(\tau = 7 \text{ мкс}, f = 10^5 \text{ Гц}, U_{\text{см}} = -2000 \text{ В})$$

Очевидно, что без отрицательного потенциала смещения общее число макрочастиц на поверхности подложки постепенно увеличивается. Через 3

минуты плазменного осаждения можно наблюдать тенденцию к насыщению, связанную с тем, что макрочастицы покрываются сверху слоем материала катода.

Применение высокочастотного короткоимпульсного отрицательного потенциала смещения существенно влияет на поверхностную плотность макрочастиц и динамику их образования на подложке во время обработки. Зависимость поверхностной плотности макрочастиц от времени обработки при высокочастотном короткоимпульсном отрицательном потенциале смещения показана на рисунке 24 (кривые 2, 3). Поверхностная плотность капель меди размером больше, чем 1 мкм постепенно растет от $7 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^5$ частиц/см² с увеличением времени обработки, увеличивающимся от 30 секунд до 6 минут, рисунок 24, кривая 2). Поверхностная плотность мелких макрочастиц (менее 1 мкм), вместо увеличения, значительно уменьшается от $\sim 10^6$ до 10^5 частиц/см² в течение того же времени обработки. Это означает, что через 6 минут нанесения, поверхностная плотности мелких макрочастиц в 5 раз меньше, чем крупных микрокапель. На рисунке 23 б видно не только сплюснутые макрочастицы, но и множество различных макрочастиц, которые имеют такую же микроструктуру, как и окружающая поверхность. Можно предположить, что расплавленные микрокапли разбились после их взаимодействия с нагретым образцом. Площадь поверхности даже крупных макрочастиц значительно увеличилась после их столкновения с поверхностью образца.

Очевидно, что испарение микрокапель происходит после того, как поверхность образца достигает температуры плавления меди. В результате ионного распыления и постепенного испарения макрочастиц, образуются выступы на поверхности подложки. Эти выступы обозначены стрелками на рисунке 23 б. Размер выступов можно регулировать путем изменения параметров дуги. Изменение высокочастотного короткоимпульсного отрицательного потенциала смещения позволяет добиться компенсации ионного распыления путем плазменного осаждения. В результате исключается распыление поверхности образца [14]. Общее снижение количества

макрочастиц после применения высокочастотного короткоимпульсного отрицательного потенциала смещения по сравнению с плазменным напылением с анодным потенциалом, увеличился с 3 раз после 30 секунду, почти до 41 раза через 6 минут после обработки подложки. Эффективность подавления малых макрочастиц, как можно видеть из рисунка 24, значительно выше (снижение до 205 раз в течение 6 мин).

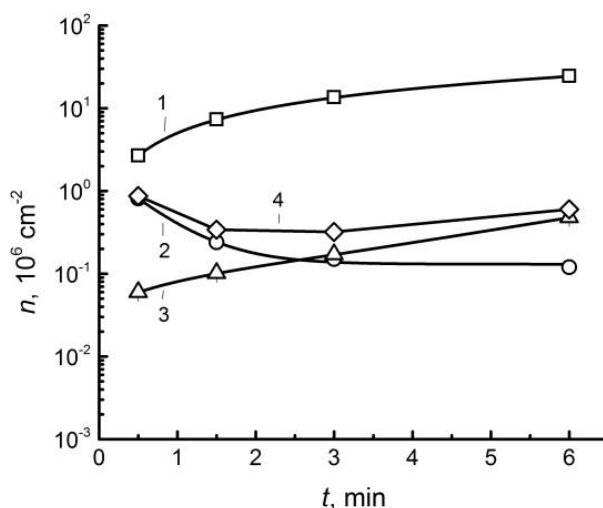


Рисунок 24 – Поверхностная плотность макрочастиц в зависимости от времени обработки при анодном потенциале, отрицательном короткоимпульсном потенциале смещения ($\tau = 7$ мкс, $f = 10^5$ имп, $U = -2$ кВ), нормальном магнитном поле: 1 – при анодном потенциале; 2 – при отрицательном короткоимпульсном потенциале смещения, диаметр макрочастиц < 1 мкм; 3 – при отрицательном короткоимпульсном потенциале смещения, диаметр макрочастиц ≥ 1 мкм; 4 – при отрицательном короткоимпульсном потенциале смещения, общая поверхностная плотность макрочастиц

3.2 Влияние тангенциального магнитного поля катода на генерацию макрочастиц

В случае применения тангенциального магнитного поля, осаждение медной плазмы на подложку при подаче анодного потенциала, выявляется значительное снижение количества макрочастиц. Это снижение связывается с

увеличением скорости движения катодного пятна по рабочей площади дуговика, что приводит к снижению локальной температуры поверхности катода. Скорость движения катодного пятна зависит от напряженности тангенциального магнитного поля. Тем не менее, увеличение напряженности магнитного поля вакуумно-дугового испарителя с тангенциальным полем приводит к электронной намагниченности, снижению плотности ионного тока и увеличению падения напряжения разряда. В наших экспериментах было исследовано влияние напряженности магнитного поля от 60 до 250 Гс. Зависимость плотности тока ионов от напряженности магнитного поля, измеренного с катода расположенного на расстоянии $L = 24$ см представлена на рисунке 25. Плотность ионного тока линейно уменьшается от 10 до 4,5 мА/см², когда изменения напряженности магнитного поля от 60 до 250 Гс.

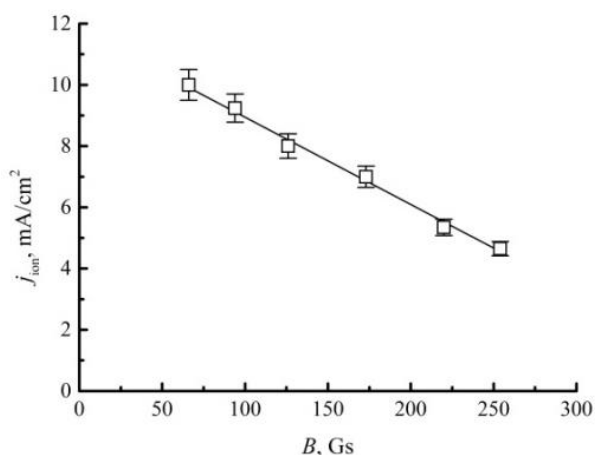


Рисунок 25 – Зависимость плотности тока ионов от напряженности магнитного поля

Скорость катодного пятна изменяется от 4 м/с (60 Гс) до 15 м/с (250 Гс). Существует явная тенденция к насыщению скорости катодного пятна, когда напряженность магнитного поля превышает 180 Гс. Увеличение напряженности магнитного поля от 60 до примерно 150 Гс приводит к резкому сокращению производства макрочастиц. Поверхностная плотность макрочастиц уменьшается до 3,5 раз. Увеличение напряженности магнитного поля от 150 до 250 Гс почти не влияет на содержание макрочастиц на поверхности подложки.

Исследование влияния времени обработки на динамику накопления макрочастиц на поверхности мишени, осуществляется с напряженностью

тангенциального магнитного поля 175 Гс. Кривая 1 рисунка 26 показывает изменение поверхностной плотности макрочастиц на образце с приложенным анодным потенциалом при осаждении плазмы. Сравнение кривой 1 рисунка 24 с кривой 1 рисунка 26 показывает, что применение тангенциального магнитного поля катода обеспечивает 5-кратное уменьшение поверхностной плотности макрочастиц после 6 мин осаждения вакуумно-дуговой плазмы.

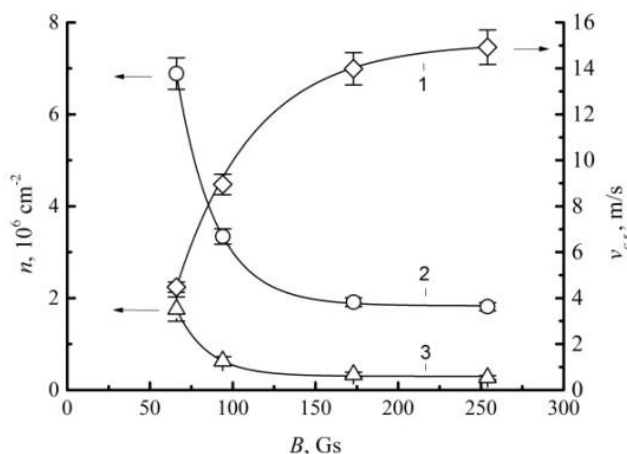
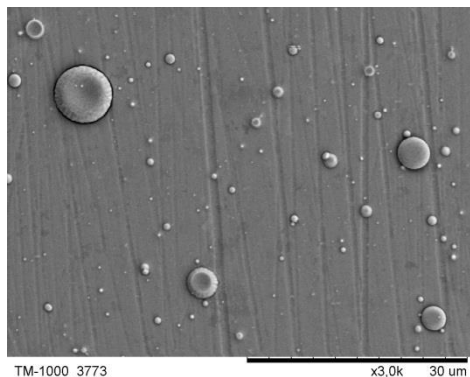


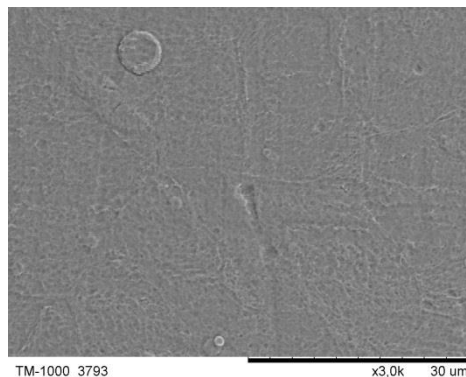
Рисунок 26 – поверхностная плотность макрочастиц и скорость катодного пятна в зависимости от напряженности магнитного поля: 1 – скорость катодного пятна, 2 – поверхностная плотность макрочастиц на осаждаемом покрытии (время обработки 30 сек) с анодным потенциалом, 3 – поверхностная плотность макрочастиц на осаждаемом покрытии (время обработки 30 сек) с короткоимпульсным потенциалом смещения ($\tau = 7$ мкс, $f = 10^5$ Гц, $U_{см} = -2000$ В)

Использование высокочастотного короткоимпульсного отрицательного потенциала смещения по-разному воздействует на накопление крупных макрочастиц (диаметр ≥ 1 мкм) и мелких (диаметр < 1 мкм) на подложке. Как можно видеть из рисунка 26 (кривая 3) поверхностная плотность больших макрочастиц возросла от $7 \cdot 10^3$ до $6 \cdot 10^4$ частиц/см² после увеличения времени обработки от 30 сек до 6 мин. В то же время, поверхностная плотность мелких макрочастиц резко снизилась. В общем, после 6 минут ионно-плазменной обработки количество макрочастиц на поверхности образца уменьшилось на 3 порядка. Изображения, полученные с помощью сканирующего электронного

микроскопа (рисунок 27 а, б) показывают эффект многократного снижения плотности макрочастиц на поверхности образца при отрицательном короткоимпульсном потенциале смещения в сравнении с осаждением вакуумно-дуговой плазмы на подложке с анодным потенциалом через 6 мин обработки.



а)



б)

Рисунок 27 – Фотоснимки подложки после 6 минут обработки при тангенциальном магнитном поле: а) при анодном потенциале; б) отрицательном короткоимпульсном потенциале смещения

$$(\tau = 7 \text{ мкс}, f = 10^5 \text{ Гц}, U_{\text{см}} = -2000 \text{ В})$$

Сравнение данных, изображенных на рисунке 24 и рисунке 28, позволяет сделать вывод о предпочтительности совместного использования тангенциального магнитного поля катода и высокочастотного короткоимпульсного отрицательного потенциала смещения в случае использования медного катода для получения плазмы вакуумной дуги. Поверхностная плотность макрочастиц через 6 мин плазменного напыления с нормальным магнитным полем к поверхности катода (рисунок 24, кривая 1) превосходят аналогичный показатель в случае тангенциального магнитного поля и отрицательного потенциала смещения в 400 раз (рисунок 28, кривая 4).

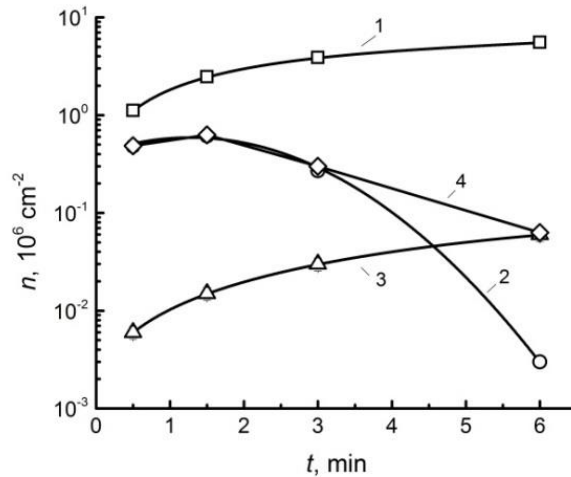


Рисунок 28 – Поверхностная плотность макрочастиц в зависимости от времени обработки при анодном потенциале, отрицательном короткоимпульсном потенциале смещения ($\tau = 7$ мкс, $f = 10^5$ Гц, $U_{см} = -2000$ В), тангенциальном магнитном поле: 1 – при анодном потенциале; 2 – при отрицательном короткоимпульсном потенциале смещения, диаметр макрочастиц < 1 мкм; 3 – при отрицательном короткоимпульсном потенциале смещения, диаметр макрочастиц ≥ 1 мкм; 4 – при отрицательном короткоимпульсном потенциале смещения, общая поверхностная плотность макрочастиц

Из вышесказанного можно сделать вывод, что полученные экспериментальные результаты показывают возможность постоянного использования вакуумно-дугового испарения для плазменно-иммерсионной ионной имплантации со значительным подавлением макрочастиц на поверхности подложки, без снижения плазменных и ионных плотностей тока. Эффективность ликвидации капель на поверхности образца соизмерима с эффективностью большинства плазменных фильтров.

Глава 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Повышение требований к качеству деталей машин стимулирует создание новых методов целенаправленного изменения фазового состава и структуры их поверхностных слоев. В частности, широкое распространение получили методы воздействия на поверхность деталей концентрированными потоками энергии.

Наиболее перспективной, энергосберегающей и экологически чистой технологией среди них является метод электролитно-плазменной обработки (ЭПО). При этом происходит изменение структуры и свойств материала в тонких поверхностных слоях вследствие физического воздействия ионов высокотемпературной плазмы и электрического разряда.

Дополнительное повышение поверхностной прочности, твердости и износостойкости деталей при ЭПО можно также достичь за счет целенаправленного изменения химического состава поверхностного слоя путем легирования и модифицирования. В данной главе была рассмотрена экономическая выгода использования метода плазменно-иммерсионной имплантации ионов.

Для эффективного использования научного потенциала научно-исследовательской работы (НИР) необходимо прилагать усилия не только к непосредственно ее разработке, но и к проведению ее анализа с точки зрения экономических требований, то есть определить затраты на разработку, продолжительность работ, рассмотреть вопрос об экономической эффективности НИР.

В организационно-экономической части выпускной квалификационной работы рассмотрены следующие вопросы:

1. Оценку коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.
2. Планирование научно-исследовательских работ.

3. Расчет бюджета: материальных затрат, дополнительных выплат и заработной платы.

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Повышение производственных требований к эффективности используемых материалов предопределяет непрерывное развитие современных технологий. В этом контексте плазменная технология имеет огромный потенциал, поскольку позволяет направленно изменять физические свойства материалов и гибко подстраивается под нужды конкретного заказчика. Спектр применения плазменной обработки чрезвычайно широк и не ограничивается только полупроводниковым кристалльным производством, изготовлением гибридных интегральных микросхем (ГИС) или печатных плат. Системы плазменной обработки также находят применение в автомобиле- и самолетостроении, медицинской технологии, биотехнологии, технологии обработки пластмасс, металлов, различных порошков и даже в текстильной промышленности.

Таблица 4 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию результатов исследований

| | | Применение технологии плазменно-иммерсионной имплантации ионов | | |
|-------------|---------|--|----------------|---------------------------------|
| | | Приборостроение | Машиностроение | Предприятия медицинской отрасли |
| Потребность | Сильная | | | |
| | Слабая | | | |

4.1.2 SWOT-анализ

Проведем SWOT-анализ плазменной обработки лигнина. Результаты первого этапа, а именно описание сильных и слабых сторон проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Матрица SWOT

| Сильные стороны | Слабые стороны |
|--|--|
| С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. | Сл1. Относительно небольшая производительность по данной технологии, по сравнению с традиционными методами. |
| С2. Более высокая плотность плазмы по сравнению с методами барьерной фильтрации. | Сл2. Отсутствие массового производства установок и, следовательно, малое внедрение на мировой и российский рынок. |
| С3. Простота внедрения в производственный процесс промышленного масштаба. | Сл3. Степень очистки ниже, чем у систем с барьерной фильтрации. |
| С4. Высокая степень отчистки плазмы от микрокапель в широком диапазоне размеров по сравнению с другими методами очистки. | |
| С5. Простота монтажа установки и эксплуатация. | |
| С6. Широкая область применения данной технологии. | |
| С7. Относительная дешевизна установки. | |
| Возможности | Угрозы |
| В1. Организация массового производства установок. | У1. Отсутствие спроса на новую технологию. У2. Развитая структура традиционных методов нанесения покрытий. У3. Неудовлетворительная чистота поверхности. |
| В2. Целенаправленное сотрудничество с предприятиями занимающимися осаждением материала покрытия плазменным методом. | |
| В3. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж. | |

Проведем второй этап SWOT-анализа. Результаты приведены в таблице. В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу научной разработки.

Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей SWOT-матрицы. 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 «-».

Таблица 6 – Интерактивная матрица проекта

| Сильные стороны проекта | | | | | | | | |
|-------------------------|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| Возможности проекта | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 |
| | B1 | + | + | + | + | + | + | + |
| | B2 | + | - | + | - | + | + | + |
| | B3 | + | - | + | - | + | + | + |
| Угрозы проекта | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 |
| | У1 | - | - | - | - | - | - | - |
| | У2 | - | - | - | + | - | + | - |
| | У3 | - | - | - | - | - | - | - |
| Слабые стороны проекта | | | | | | | | |
| Возможности проекта | | Сл1 | Сл2 | Сл3 | | | | |
| | B1 | 0 | + | - | | | | |
| | B2 | 0 | 0 | - | | | | |
| | B3 | - | 0 | - | | | | |
| Угрозы проекта | | Сл1 | Сл2 | Сл3 | | | | |
| | У1 | 0 | + | - | | | | |
| | У2 | + | + | 0 | | | | |
| | У3 | + | - | + | | | | |

Третий этап заключается в составлении итоговой матрицы SWOT-анализа, заполняемой на основании анализа таблицы 6.

Результаты анализа запишем в итоговую таблицу 7.

По результатам SWOT-анализа делаем вывод о том, что на преимущества разрабатываемой технологии преобладают над ее недостатками. Сильные стороны проекта могут понизить процент угроз исследования.

Таблица 7 – Итоговая таблица SWOT-анализа

| | | |
|---|--|--|
| | <p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Более высокая плотность плазмы по сравнению с методами барьерной фильтрации. С3. Простота внедрения в производственный процесс промышленного масштаба. С4. Высокая степень отчистки плазмы от микрокапель в широком диапазоне размеров по сравнению с другими методами очистки. С5. Простота монтажа установки и эксплуатация. С6. Широкая область применения данной технологии. С7. Относительная дешевизна установки.</p> | <p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Относительно небольшая производительность по данной технологии, по сравнению с традиционными методами. Сл2. Отсутствие массового производства установок и, следовательно, малое внедрение на мировой и российский рынок. Сл3. Степень очистки ниже, чем у систем с барьерной фильтрации.</p> |
| <p>Возможности: В1. Организация массового производства установок. В2. Целенаправленное сотрудничество с предприятиями занимающимися осаждением материала покрытия плазменным методом. В3. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж.</p> | <p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»: В целом технология плазменной обработки материалов обладает большими плюсами. Желаемое направление развития – это внедрение массового производства и сотрудничество с предприятиями, что приведет к укреплению данного метода обработки, как на российском рынке, так и за рубежом.</p> | <p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»: Слабые стороны плазменного метода обработки могут стать большой проблемой для закрепления данного метода на рынке. Модернизация, согласно возможностям данного метода, значительно улучшит технические показатели установок и позволит гибко подстраиваться под нужные требования производительности и любого заказчика.</p> |
| <p>Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новую технологию. У2. Развитая структура традиционных методов нанесения покрытий. У3. Неудовлетворительная чистота поверхности.</p> | <p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»: Угрозы научно-технического проекта значительно подрывают авторитет плазменно-иммерсионного метода обработки материалов. В этой связи учет факторов угроз, необходим и поможет в будущем исключить все возможные факторы риска.</p> | <p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»: Опасные факторы для производства и закрепления технологии на рынке – это сочетание слабых сторон и угроз научно-технического проекта. В данном случае, направление работы – это максимально возможное уменьшение количества уязвимых мест (слабых сторон) и учет угроз производству, как внешних, так и внутренних, негативно влияющих на закрепления технологии на рынке.</p> |

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения научных исследований сформирована рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и инженер.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок составления этапов и работ приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

| Основные этапы | № раб | Содержание работ | | Должность исполнителя |
|--|-------|---|---|-----------------------|
| Разработка технического задания на ВКР | 1 | Составление и утверждение технического задания | | Руководитель темы |
| Выбор направления исследований | 2 | Изучение проблемы и подбор литературы | | Инженер |
| | 3 | Подбор и изучение материалов по теме подавления микрокапельной фракции катодов вакуумно-дуговых испарителей | | Инженер |
| | 4 | Календарное планирование работ по теме | | Инженер |
| Теоретические и экспериментальные исследования | 5 | Проектирование чертежа экспериментальной установки | | Руководитель, инженер |
| | 6 | Планирование и проведение исследований | Подготовка экспериментальных образцов на базе лаборатории ЦИСМ. | Руководитель, инженер |
| | 7 | | Исследование режимов работы экспериментальной установки. Определение оптимальных режимов. | |
| | 8 | | Планирование экспериментов. Определение оптимальных времен обработки образцов. | |
| | 9 | Анализ и обработка полученных результатов с помощью специализированного оборудования | | |

4.2.2 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Контрольные события проекта

| № | Контрольное событие | Дата | Результат (подтверждающий документ) |
|----|---|---------------------------|--|
| 1 | Составление и утверждение технического задания | 4.02.2016 | Приказ № 791/с об утверждении руководителей и тем выпускных квалификационных работ студентов ФТИ |
| 2 | Изучение проблемы и подбор литературы | 14.03.2016- 19.03.2016 | Список литературы |
| 3 | Изучение литературы и выбор методов решения проблемы | 21.03.2016- 9.04.2016 | Отчет |
| 4 | Календарное планирование работ | 11.04.2016 | План работ |
| 5 | Моделирование технологического процесса на компьютере | 11.04.2016- 30.04.2016 | Отчет |
| 6 | Планирование и проведение экспериментальных исследований | 2.05.2016- 21.05.2016 | Отчет |
| 7 | Анализ и обработка полученных результатов | 23.05.2016- 1.06.2016 | Отчет |
| 8 | Оценка эффективности полученных результатов | 3.06.2016- 5.06.2016 | Отчет |
| 9 | Составление пояснительной записки | 6.06.2016- 16.06.2016 | Пояснительная записка |
| 10 | Проверка правильности оформления пояснительной записки согласно ГОСТу | 17.06.2016- 18.06.2016 | |
| 11 | Подготовка к защите | 20.06.2016 | |

4.2.3 План проекта

Таблица 10 – Календарный план-график проведения научного исследования

| № работ | Вид работ | Исполнители | Т _к , кал.дн. | Продолжительность выполнения работ | | | | | | | | | | | | |
|---------|---|-----------------------|--------------------------|------------------------------------|---|---|--------|---|---|-----|---|---|------|---|---|---|
| | | | | Март | | | Апрель | | | Май | | | Июнь | | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | | |
| 1 | Составление и утверждение технического задания | Руководитель | 2 | █ | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Изучение проблемы и подбор литературы | Руководитель, студент | 5 | █ | █ | | | | | | | | | | | |
| 3 | Изучение литературы и выбор методов решения проблемы | Студент | 18 | | | █ | █ | █ | | | | | | | | |
| 4 | Календарное планирование работ | Руководитель, студент | 1 | | | | █ | █ | | | | | | | | |
| 5 | Моделирование технологического процесса на компьютере | Студент | 18 | | | | | █ | █ | █ | | | | | | |
| 6 | Планирование и проведение экспериментальных исследований | Руководитель, студент | 18 | | | | | | | | █ | █ | █ | | | |
| 7 | Анализ и обработка полученных результатов | Студент | 12 | | | | | | | | | █ | █ | █ | | |
| 8 | Оценка эффективности полученных результатов | Студент | 2 | | | | | | | | | | | | █ | |
| 9 | Составление пояснительной записки | Студент | 18 | | | | | | | | | | | | | █ |
| 10 | Проверка правильности оформления пояснительной записки согласно ГОСТу | Руководитель, студент | 1 | | | | | | | | | | | | █ | █ |
| 11 | Подготовка к защите | Студент | 3 | | | | | | | | | | | | | █ |

█ – Руководитель █ – Студент

4.3 Бюджет научно-технического исследования

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 (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

4.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- приобретаемые со стороны сырье и материалы, необходимые для создания научно-технической продукции;
- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса;
- покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;
- сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований.

Некоторые материалы: ВЧ-генератор, масла и реагенты являются

собственностью лаборатории № 22, поэтому в расчет показателей затрат не берутся.

Эксперименты проводились 3 дня по 3 часа (9 часов), мощность установки 10 кВт/час и расход охлаждающей воды (не менее) 1,8 м³/час.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} , \quad (12)$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (2,7 руб за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

$F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

$$C_{эл} = 2,7 \cdot 10 \cdot 9 = 243 \text{ руб.}$$

Затраты на водоснабжение рассчитываются по формуле:

$$C_{вд} = C_{вд} \cdot Q \cdot F_{об} , \quad (13)$$

где $C_{вд}$ – тариф на промышленное водоснабжение (8 руб за 1 м³);

Q – расход воды, м³;

$F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

$$C_{вд} = 8 \cdot 1,8 \cdot 18 = 259,2 \text{ руб.}$$

Материальные затраты находятся по формуле:

$$C_{м} = C_{эл} + C_{вд} . \quad (14)$$

Расчет затрат представлен в таблице 11.

Таблица 11 – Материальные затраты НИР

| Наименование | Единица измерения | Количество | Цена за ед., руб. | Затраты на материалы, руб. |
|---------------|-------------------|------------|-------------------|----------------------------|
| Электричество | кВт/ч | 90 | 2,7 | 243 |
| Водоснабжение | м ³ | 32,4 | 8 | 259,2 |
| | | Итого: | 10,7 | 502,2 |

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

При проведении научно-технических исследований в рамках данного проекта использовался электронный сканирующий микроскоп «Hitachi TM 1000», проведем расчет затрат на амортизацию используя метод уменьшаемого остатка.

При использовании способа уменьшаемого остатка годовая сумма амортизационных отчислений определяется исходя из остаточной стоимости объекта основных средств на начало отчетного года и нормы амортизации, исчисленной на основании срока полезного использования этого объекта:

$$A = C_{\text{ост.}} \cdot \frac{k \cdot N_a}{100}, \quad (15)$$

где $C_{\text{ост}}$ – остаточная стоимость объекта;

k – коэффициент ускорения;

N_a – норма амортизации для данного объекта.

Стоимость электронного сканирующего микроскопа «Hitachi TM 1000» составляет 4 млн. рублей. Заявленный срок службы составляет 5 лет. Коэффициент ускорения примем равным 2. Годовая доля амортизации составляет: $N_a = 100:5 \cdot 2 = 10 \%$.

Таким образом, годовая амортизации будет равна:

$$A_{\text{год}} = 4000000 \cdot \frac{2 \cdot 10}{100} = 800000 \text{ руб.}$$

Рассчитаем амортизационные отчисления на период написания диплома (137 дней).

$$A_{\text{дипл}} = \frac{800000}{365} \cdot 137 = 300273,97 \text{ руб.}$$

На период написания диплома общая сумма амортизации составила 300273,97 рублей.

Данный метод расчета позволяет списать максимальную амортизационную стоимость в первые годы работы оборудования.

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Данная статья включает в себя затраты на оплату труда работников, непосредственно участвующих в выполнении НИР, включая (премии, доплаты, и дополнительную заработную плату).

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (16)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб.;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.

Основную заработную плату руководителя НИР можно рассчитать по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (17)$$

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

$T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{дн} = (Z_{м} \cdot M) / F_{д}, \quad (18)$$

где $Z_{м}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

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

$F_{д}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн., таблица 12.

Таблица 12 – Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени | Руководитель | Инженер-исследователь |
|--|--------------|-----------------------|
| Календарное число дней | 365 | 365 |
| Количество нерабочих дней: | | |
| – выходные дни; | 52 | 104 |
| – праздничные дни | 14 | 14 |
| Потери рабочего времени: | | |
| – отпуск; | 48 | 24 |
| – невыходы по болезни | – | – |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 251 | 223 |

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_M = Z_{TC} \cdot K_p, \quad (19)$$

где Z_{TC} – заработная плата по тарифной ставке, руб. (для младшего научного сотрудника составляет 23719 руб., для инженера исследователя 10223 руб.);

K_p – районный коэффициент, равный 1,3 для Томска.

Результаты расчета основной заработной платы представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты расчета основной заработной платы

| Исполнители | Z_{TC} , руб. | K_p | Z_M , руб. | $Z_{дн}$, руб. | $T_{раб}$ раб. дн. | $Z_{осн}$, руб. |
|-------------------|--------------------|-------|-----------------|--------------------|-----------------------|---------------------|
| Руководитель | 23718,51 | 1,3 | 30834,06 | 1375,86 | 10 | 13758,6 |
| Инженер | 10223,32 | | 13290,32 | 667,49 | 96 | 64079,59 |
| Итого $Z_{осн}$: | | | | | | 77838,19 |

4.3.4 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из 10-15 % от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы:

$$Z_{доп} = Z_{осн} \cdot K_{доп}, \quad (20)$$

где $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$K_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплаты ($K_{доп} = 0,1$);

$Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб.

В таблице 14 приведен расчет основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 14 – Заработная плата исполнителей НИР

| Заработная плата | Руководитель | Инженер |
|--------------------------------|--------------|----------|
| Основная зарплата, руб | 13758,60 | 64079,59 |
| Дополнительная зарплата, руб | 1375,86 | 6407,95 |
| Зарплата исполнителя, руб | 15134,46 | 70487,54 |
| Итого по статье $C_{зн}$, руб | 85622 | |

4.3.5 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:

$$Z_{\text{внеб}} = K_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (21)$$

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

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 № 212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30 %. На основании пункта 1 ст.58 закона № 212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1 %.

Отчисления во внебюджетные фонды представим в табличной форме, таблица 15.

Таблица 15 – Отчисления во внебюджетные фонды

| Исполнитель | Основная заработная плата, руб. | Дополнительная заработная плата, руб. | Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды | Сумма отчислений |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--|------------------|
| Руководитель проекта | 13758,60 | 1375,86 | 0,271 | 4101,44 |
| Студент-инженер | 64079,59 | 6407,95 | | 19102,12 |
| Итого: | | | | 23203,56 |

4.3.6 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную

тому. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = K_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (22)$$

где $K_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

Накладные расходы в ТПУ составляют 25-35 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы. Примем $K_{\text{накл}} = 30 \%$.

Накладные расходы составляют:

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot 85622 = 25686,6 \text{ руб.}$$

4.3.7 Формирование бюджета научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

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

Таблица 16 – Расчет бюджета затрат НТИ

| Наименование статьи | Сумма, руб. |
|--|-------------|
| 1. Материальные затраты НТИ | 502,2 |
| 2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ | 300273,97 |
| 3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы | 77838,19 |
| 4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы | 7783,81 |
| 5. Отчисления во внебюджетные фонды | 23203,56 |
| 6. Накладные расходы | 25686,6 |
| 7. Контрагентные расходы | 0 |
| Бюджет затрат НТИ: | 435288,33 |

4.4 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта представляет собой временное структурное образование, создаваемое для достижения поставленных целей и задач проекта и включающее в себя всех участников процесса выполнения работ на каждом этапе.

Данной исследовательской работе соответствует функциональная структура организации. То есть организация рабочего процесса выстроена иерархически: у каждого участника проекта есть непосредственный руководитель, сотрудники разделены по областям специализации, каждой группой руководит компетентный специалист (функциональный руководитель). Организационная структура научного проекта представлена на рисунке 29.

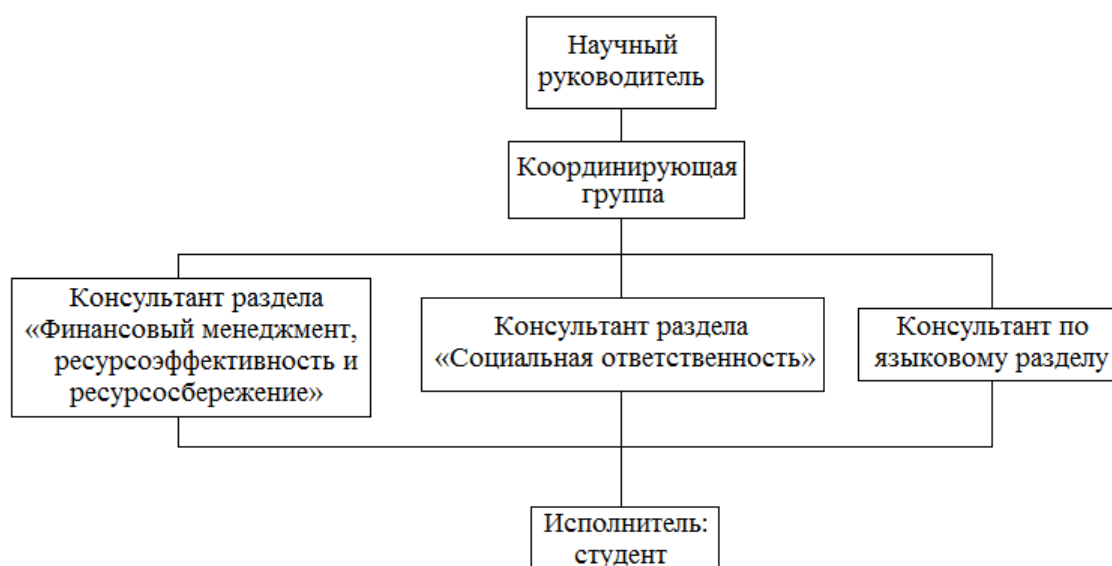


Рисунок 29 – Организационная структура научного проекта

4.5 Матрица ответственности

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 17.

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

- ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта

и контролирующее его ход;

– исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта. Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение);

– согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

Таблица 17 – Матрица ответственности

| Этапы проекта | Научный руководитель | Консультант раздела «Финансовый менеджмент» | Консультант раздела «Соответственность» | Консультант по языковому разделу | Студент |
|---|----------------------|---|---|----------------------------------|---------|
| Составление и утверждение технического задания | О | | | | |
| Изучение проблемы и подбор литературы | | | | | И |
| Изучение литературы и выбор методов решения проблемы | С | | | | И |
| Календарное планирование работ по теме | О | | | | И |
| Моделирование технологического процесса на компьютере | | | | | И |
| Планирование и проведение экспериментальных исследований | С | | | | И |
| Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения | | С | | | И |
| Выполнение раздела по социальной ответственности | | | С | | И |
| Выполнение перевода части работы на английский язык | | | | С | И |
| Анализ и обработка полученных результатов | | | | | И |
| Оценка эффективности полученных результатов | С | | | | И |
| Составление пояснительной записки | С | | | | И |
| Проверка правильности оформления пояснительной записки согласно ГОСТу | С | | | | И |
| Подготовка к защите | О | | | | И |

Глава 5 Социальная ответственность

Одно из основных направлений профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда.

Охрана труда – система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда. [51]

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредный производственный фактор – фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности. [52]

Эксперименты проводились в лаборатории Центра исследования свойств материалов при ТПУ.

5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов при работе в лаборатории

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

В таблице 18 представлены основные виды работ, которые могут привести к воздействию опасных и вредных факторов.

Таблица 18 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

| Наименование видов работ и параметров производственного процесса | ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ | | Нормативные документы |
|--|--|-------------------|--|
| | Вредные | Опасные | |
| | Химические токсические | | ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. |
| | | Электрический ток | ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность |
| | Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.) | | СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы» |
| | | Пожароопасность | |

На работника лаборатории ЦИСМ при ТПУ, проводящего экспериментальные исследования по методу короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации, могут воздействовать следующие факторы:

Физические:

- статическое электричество;
- электромагнитное поле высокой частоты;
- освещенность;
- наличие излучения, вызываемое оборудованием.

Психофизиологические:

- физические перегрузка (статическая, динамическая);
- нервно-психические перегрузки (умственные перегрузки, перегрузки анализаторов, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

Рисунок 30 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

На рисунке 30:

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 подъемно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора

будет составлять 30°.

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 ее размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°.

5.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещенность.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [52] и приведены в таблице 19 Таблица .

Таблица 19 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

| Период года | Температура, °С | Относительная влажность, % | Скорость движения |
|-----------------------|-----------------|----------------------------|-------------------|
| Холодный и переходный | 23-25 | 40-60 | 0,1 |
| Теплый | 23-25 | 40 | 0,1 |

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями

к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – от 20 до 25 °С, зимой – от 13 до 15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основным недостатком такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

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.

Экран, системные блоки и элементы экспериментальной установки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно [52] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

в диапазоне частот 5Гц-2кГц - 25В/м;

в диапазоне частот 2кГц-400кГц - 2,5В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

в диапазоне частот 5Гц-2кГц - 250нТл;

в диапазоне частот 2кГц-400кГц - 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

– увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);

– применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др.

Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам [52] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более $7,7 \cdot 10^{-12}$ А/кг, что соответствует эквивалентной дозе, равной 100 мкР/час.

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

5.3 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.

Электрозщитные 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 индивидуальной 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.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ или другими электрическими приборами и установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта электрических приборов;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;

- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей) [53].

В случае поражения работающего персонала на установке электрическим током необходимо отключить установку от сети и приступить к оказанию первой помощи пострадавшему.

Меры первой помощи зависят от состояния пострадавшего, которые определяются путем проведения следующих мероприятий:

- уложить пострадавшего спиной на твердую поверхность;
- проверить наличие дыхания и пульса;
- выяснить состояние зрачка.

Если пострадавший находится в сознании, но до этого был в состоянии обморока – обеспечить ему условия для полного покоя, следить за дыханием и пульсом, вызвать врача.

Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но дышит и прощупывается пульс, необходимо привести его в сознание, дать понюхать нашатырный спирт и обрызгивать водой, при необходимости делать искусственное дыхание и массаж сердца.

5.4 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [54], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение лаборатории по степени пожароопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей.

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);
- 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.

Пострадавшему следует оказать первую домедицинскую помощь. При ожогах рук (или кожного покрова других частей тела) обожженную поверхность следует перевязать так же как любую рану, покрыть стерилизованным материалом из пакета или чистой глаженной полотняной тканью, сверху положить слой ваты и закрепить бинтом. После этого пострадавшего следует отправить в лечебное учреждение. Запрещается касаться руками обожженного участка кожи и смазывать его какими-либо мазями, маслами, вазелином или растворами. Не следует производить вскрывание пузырей и обожженных участков, так как при этом создаются благоприятные условия для заражения раны микробами с последующим нагноением.

Заключение

Совместное применение тангенциального магнитного поля катода и высокочастотного короткоимпульсного отрицательного потенциала смещения обеспечивает значительное (на несколько порядков) снижение плотности макрочастиц на поверхности образца, погруженного в медную плазму постоянного тока вакуумной дуги. Использование тангенциального магнитного поля уменьшает генерацию макрочастиц в 5 раз. Подавление большого количества капель повышает эффективность снижения количества макрочастиц на поверхности образца с отрицательным короткоимпульсным потенциалом смещения.

В случае нормально к поверхности катода магнитного поля отрицательный потенциал смещения позволяет снизить плотность макрочастиц на подложке в 40 раз по сравнению с традиционным вакуумно-дуговым плазменным осаждением. Применяя тангенциальное поле и отрицательный короткоимпульсный потенциал смещения увеличивается общая эффективность сокращения количества макрочастиц до 400 раз и до 8000 раз мелких макрочастиц, после 6 минут обработки, по сравнению с использованием для плазменного напыления осесимметричного испарителя вакуумной дуги.

Данные результаты показывают, возможность постоянного применения вакуумно-дуговой плазменной ионной имплантации со значительным подавлением макрочастиц на поверхности подложки без снижения плазменных и ионных плотностей тока.

Список публикаций

1. Андрияшин Д. А., Галеев Р. Р., Годовых А. В. Моделирование взаимодействия элементов комплекса инженерно-технических средств физической защиты с целью обучения специалистов служб безопасности [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 14-18 Апреля 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 3 - С. 74-75. - Режим доступа: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C01/V3/C01_V3.p
2. Ryabchikov A. I., Ananjin P. S., Dektyarev S. V., Bumagina A. I., Shevelev A. E., Sivin D. O., Andriyashin D. A. Investigation of Negative Bias Pulse Parameters Influence to Macroparticles Accumulation on Substrate Immersed in Titanium Vacuum Arc Plasma // 19th International Conference on Surface Modification of Materials: Abstarcts, Chiang Mai, November 22-27, 2015. - Chiang Mai: CMU, 2015 - p. 191
3. Ryabchikov A. I., Sivin D. O., Bumagina A. I., Andriyashin D. A. Control of vacuum arc macroparticles by negative repetitively pulsed biasing [Electronic resorces] // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции, Томск, 3-6 Июня 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - С. 207 - <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C49/C49.pdf>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бизюков А. А. и др. Динамика капельной фазы в плазме дугового разряда низкого давления //Вісник Харківського університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля». Г. – 2004. – №. 642. – С. 42Г46.
2. Казарян М. А., Морозова Е. А., Пляка П. С. Возможности лазерных методов исследования динамики микрочастиц в плазме //Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – №. 2.
3. Tau C.N., E.S. Koh E.S., Akari K. Macroparticles on TiN films prepared by the arc ion plating process // Surface and Coatings Technology. – 1990. – V. 43–44. – P. 324–335.
4. Keidar M., Beilis I. I. Macroparticle reflection from a biased substrate in a vacuum arc deposition system // IEEE Transactions on Plasma Science – 1999. – V. 27, № 3. – P. 810–812.
5. Ryabchikov A. I., Ryabchikov I. A., Stepanov I. B. Development of filtered DC metal plasma ion implantation and coating deposition methods based on high-frequency short-pulsed bias voltage application //Vacuum. – 2005. – Т. 78. – №. 2. – С. 331-336.
6. И.И. Аксенов. Вакуумно-дуговые источники фильтрованной плазмы: история, теория, практика, перспективы // Вакуумные технологии и оборудование. – Харьков: НИЦ ХФТИ, «Константа», 2003. – С. 238-258.
7. Juttner B., Puchkarev V.F., Hantzsche E., and Beils I. Cathode Spots / R.L. Boxman, D.M. Sanders, Ph.J. Martin (Eds.), Handbook of Vacuum Arc Science and Technology, Noyes Publications. – Park Ridge, NJ, USA, 1995. – P. 73-281.
8. Boxman R.L. and Goldsmith S. Macroparticle contamination in cathodic arc coatings: generation, transport and control // Surf. Coat. Technol. 1992. v. 52, p. 39-50.
9. Daalder J.E. Components of cathode erosion in vacuum arcs // Journal of Physics D: Applied Physics– 1976.– V.9, No 11.– P. 2379–2395.
10. Anders A. Cathodic Arc Sources. – Springer New York, 2008. – С. 1-37.

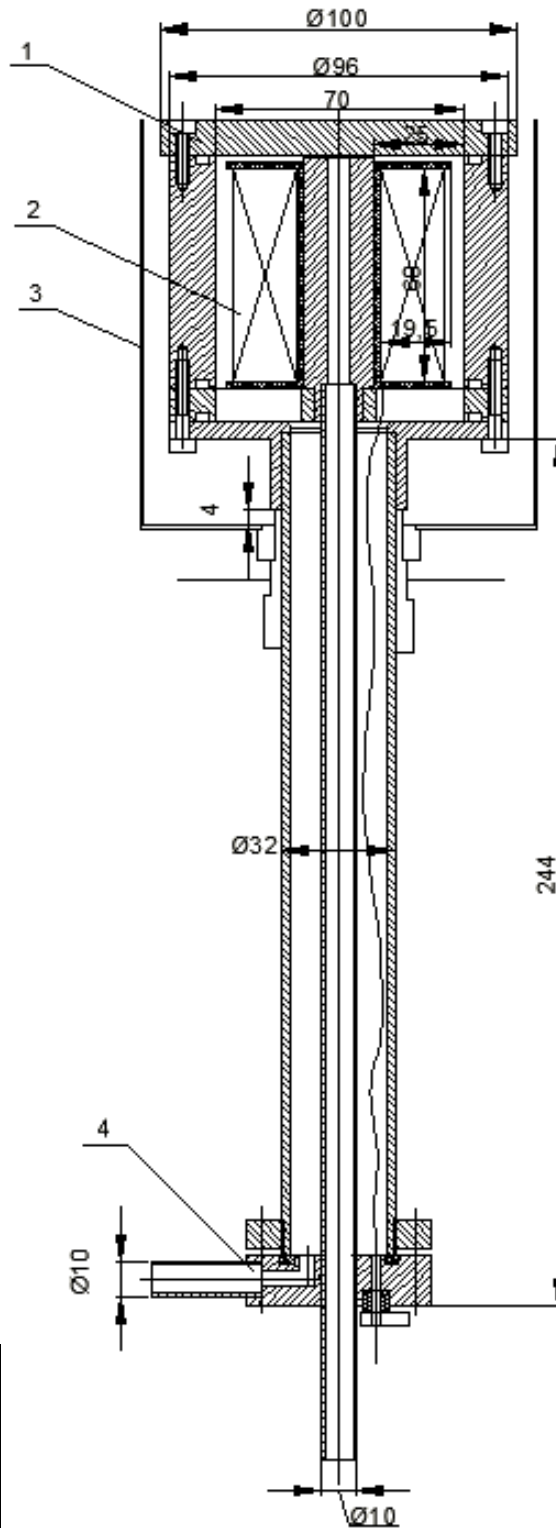
11. Anders, S., Anders, A., Yu, K.M., Yao, X.Y., and Brown, I.G., On the macroparticle flux from vacuum arc cathode spots, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 21, 440–446, (1993).
12. Rysanek F., Rodney L., Burton R.L. // *IEEE Transactions on Plasma Science.* – 2008. – V. 36, No 5. – P. 2147–2162.
13. Anders A. Growth and decay of macroparticles: A feasible approach to clean vacuum arc plasmas // *Journal of Applied Physics.*– 1997.– V. 82.– P. 3679–3688.
14. Brandes E.A. and Brook G.B., *Smithells Metals Reference Book*, 7th Edition. – Butterworth-Heinemann, 1992. – 1794 p.
15. Мартыненко Ю.В., Огнеев Л.В. Тепловое излучение наночастиц// *ЖТФ.* – 2005. – Т. 75, Вып. 11. – С. 130–132.
16. Бизюков А.А. Испарение макрочастиц в плазме сильноточного импульсного дугового разряда низкого давления / А.А. Бизюков, К.Н. Серeda, А.Е. Кашаба, Е.В. Ромащенко, А.Д. Чибисов, В.В. Поневчинский, В.В. Слепцов // *ВАНТ.*– 2006.– №5.– Сер.: Плазменная электроника и новые методы ускорения (5).– С.136–141.
17. Schanin P.M. Influence of the gas discharge plasma on microdroplet fraction of a vacuum arc / P.M. Schanin, N.N. Koval, A.V. Kozyrev, I.M. Goncharenko, J. Langner, S.V. Grigoriev // *Proceedings of the 5th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows.*– 24–29 September, 2000. Tomsk, Russia. Eds. G.Mesyats, S.Bugaev, A.Ryabchikov. Tomsk: Institute of High Current Electronics, 2000.– P. 438–441.
18. Бизюков А.А. Нагрев и испарение металлических макрочастиц в пучково-плазменных системах / А.А. Бизюков, Е.В. Ромащенко, К.Н. Серeda, А.Д. Чибисов // *ВАНТ.*– 2010.– №4.– С. 189–192.
19. Раховский В. И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. – 1970.
20. Аксенов И. И., Хороших В. М. Потoki частиц и массоперенос в вакуумной дуге //М.: ЦНИИАтоминформ. – 1984.

21. Хороших В. М. Стационарный дуговой разряд низкого давления в системах плазменной обработки поверхностей: Докт. дис // Харьков: НИЦ ХФТИ. – 2002.
22. Удрис Я.Я. О разрушении материала катодным пятном дуги // Радиотехника и электроника. – 1963.– №6. – С. 1057–1065.
23. Swift P.D. Macroparticles in films deposited by steered cathodic arc // Journal of Physics D: Applied Physics.–1996.– V. 29.– P. 2025–2031.
24. Andre Anders, Approaches to rid cathodic arc plasmas of macroparticles and nanoparticles: a review // Surf. Coat. Technol. – P. 319-330.
25. Г.А. Месяц. Эктонны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: «Наука», 2000. – 424 с.
26. Keidar M., Beilis I. I. Macroparticle reflection from a biased substrate in a vacuum arc deposition system // IEEE Transactions on Plasma Science – 1999. – V. 27, № 3. – P. 810–812.
27. Keidar M., Aharonov R., Beilis I. I. Influence of an electrical field on the macroparticle size distribution in a vacuum arc // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 1999. – Т. 17. – №. 5. – С. 3067-3073.
28. Хороших В.М. Капельная фаза эрозии катода стационарной вакуумной дуги // Физическая инженерия поверхности.– 2004.– Т. 2, № 4.– С. 200–213.
29. Хороших В.М. Пленки диоксида титана для фотокатализа и медицины // Физическая инженерия поверхности.– 2009.– Т. 7, № 3.– С. 223–238.
30. Paperny V.L., Krasov V.I. Metal Plasma Jet Passage through Plasma Optical Transport System // Technical Physics Letters. – 2011. – V. 37, No. 1. – P. 75–78.
31. Аксенов Д.А. Вакуумно-дуговые источники эрозионной плазмы с магнитными фильтрами: обзор / Д.А. Аксенов, И.И. Аксенов, В.Е. Стрельницкий // ВАНТ.– 2007. – № 2. – С. 190–202.

32. Гаврилов Н.В. Емлин Д.Р. Каменецких А.С. Источник ленточного пучка газовых ионов с широкоапертурным холодным полым катодом // ПТЭ. 2003. – № 1.– С. 85–89.
33. Keidar M. Transport of macroparticles in magnetized plasma duct / M. Keidar, I.I. Beilis, R.L. Boxman, S. Goldsmith // IEEE Transactions on Plasma Science. – 1996. – V. 24, No 1.– P. 226–234.
34. Anders A., Anders S., Brown I. Transport of vacuum arc plasmas through magnetic macroparticle filters // Plasma Sources Science and Technology.– 1995.– V. 4.– P. 1–12.
35. P.J. Martin, R.P. Netterfield, T.J. Kinder Arc source macroparticle filter: pat. 5.433.836 US; 18.07.1995.
36. Jong-kuk Kim, Seung-ho Nam, Byong-lyong Choi Thin-film deposition apparatus using cathodic arc discharge: pat. 6.026.763 US; 22.02.2000.
37. Anders S. S-shaped magnetic macroparticle filter for cathodic arc deposition / S. Anders, A. Anders, M.R. Dickinson, R.A. MacGill, I.G. Brown // IEEE Transactions on Plasma Science.– 1997.– V. 25.– P. 670–674.
38. Stepanov I.B., Ryabchikov I.A., Shaposhnicov P.A., Kurdyukov D.M. Formation of Vacuum-Arc Plasma Flows in Optically Opaque Plasma-Guides of The Shutter Type // Proceedings of 5th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows.– Tomsk, 2000.– P. 198 – 203.
39. Аксёнов И.И., Потапенко В., Тимошенко А., Хороших В.М. А.с. СССР 1989 г., №1708133.
40. X. Shi, H.S. Tan, B.K. Tay. Int. Publication N WO99/22396. May 6, 1999.
41. Рябчиков А.И., Степанов И.Б. Устройство для очистки плазмы дугового испарителя от микрочастиц (его варианты): пат. 2097868 Рос. Федерация. № 96114637/07; заявл. 09.07.96; опубл. 21.11.97.
42. Рябчиков А.И., Степанов И.Б. Устройство для очистки плазмы дугового испарителя от микрочастиц (его варианты): пат. 2107968 Рос. Федерация. № 96116291/09; заявл. 06.08.96; опубл. 27.03.98.

43. Рябчиков А.И. Устройство для очистки плазмы дугового испарителя от микрочастиц: пат. 2108636 Рос. Федерация. № 96108298/09; заявл. 23.04.96; опубл. 10.04.98.
44. Степанов И.Б. Оптически непрозрачные системы жалюзийного типа для очистки плазмы вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции // Известия вузов. Физика. – 2007. – № 10/3. – С. 16–24.
45. Рябчиков А.И, Дектярев С.В., Степанов И.Б. Источники «Радуга» и методы импульсно-периодической ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов // Известия вузов. Физика. –1998.– № 4. – С. 193–207.
46. Aksenov I. I. et al. Plasma flux motion in a toroidal plasma guide //Plasma physics and controlled fusion. – 1986. – Т. 28. – №. 5. – С. 761.
47. D.V. Borker, D.M. Sanders, J. Storer, S. Falabella // J. Appl. Phys. 1991, v. 69, p. 115.
48. Alterkop B. et al. The numerical calculation of plasma beam propagation in a toroidal duct with magnetized electrons and unmagnetized ions //Journal of Physics D: Applied Physics. – 1996. – Т. 29. – №. 12. – С. 3032.
49. Shi X. et al. Simulation of plasma flow in toroidal solenoid filters //Plasma Science, IEEE Transactions on. – 1996. – Т. 24. – №. 6. – С. 1309-1318.
50. Batchelor D. B., Davidson R. C. Nonlocal analysis of the lower-hybrid-drift instability in theta-pinch plasmas //Physics of Fluids (1958-1988). – 1976. – Т. 19. – №. 6. – С. 882-888.
51. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.
52. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
53. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.
54. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.

ФЮРА.44443.002 СБ



| Поз. | Наименование |
|------|-------------------|
| 1 | Катод |
| 2 | Магнитная система |
| 3 | Изолирующий экран |
| 4 | Подвод охлаждения |

| | |
|--------------|--------------|
| Инв. № дубл. | Подп. и дата |
| | Взам. инв. № |
| Инв. № подл. | Подп. и дата |
| | Инв. № инв. |

ФЮРА.44443.002 СБ

| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Дата |
|-----------|------|---------------|-------|------|
| Разраб. | | Андряшин Д.А. | | |
| Пров. | | Ананьин П.С. | | |
| Т. контр. | | | | |
| Н. контр. | | | | |
| Утв. | | Долматов О.Ю. | | |

Вакуумно-дуговой
испаритель
(Приложение А)

| | | |
|-------------------------|------|--------|
| Лит | Лист | Листов |
| У | 94 | 116 |
| ТПУ ФТИ Группа 0АМ4В | | |

Приложение Б

(обязательное)

Section 1

Macroparticle Generation of Plasma Arcs

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------------|---------|------|
| 0AM4B | Андряшин Дмитрий Александрович | | |

Консультант кафедры ФЭУ ФТИ

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------------------|----------|---------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель кафедры ФЭУ ФТИ | Лаас Р.А | | | |

Консультант – лингвист кафедры ИЯ ФТИ

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--------------------------------------|---------------|---------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель кафедры ИЯ ФТИ | Ермакова Я.В. | | | |

Contents

| | |
|---|-----|
| Abstract | 97 |
| Б1 Macroparticle Generation of Random Arcs..... | 98 |
| Б2 Macroparticle Generation of Steered Arcs | 108 |
| Б3 Macroparticle Generation of Pulsed Arcs..... | 111 |
| Б4 Macroparticles from Poisoned Cathodes | 113 |
| References | 114 |

Abstract

The infamous macroparticle problem is the main reason why cathode arc plasma deposition is not broadly used in high-tech applications. Macroparticles are formed at cathode spots, together with electrons and ions. They are commonly called «macroparticles» because they are very massive compared to ions and electrons. The formation and transport of macroparticles are considered, having in mind that we want to reduce, and possibly eliminate them. The size distributions can be fit by power laws, which is another indication for the self-similar nature of cathode processes. In one section, we contemplate whether macroparticles could be destroyed, e.g., by heating or by the interaction with plasma particles.

Б1 Macroparticle Generation of Random Arcs

The generation of macroparticles is the most severe issue in cathode arc plasma deposition. Therefore, a whole chapter is devoted to describe the generation and properties of macroparticles and to touch briefly on the kinds of coating defects they can cause. At the end of this chapter, mitigation measures will be reviewed briefly. A separate chapter is specifically dedicated to macroparticle filtering, which represents to date the most complete approach to macroparticle removal.

Macroparticles are liquid or solid debris particles that are produced at cathode spots along with the plasma. Macroparticles are named this way to emphasize their very massive nature compared to electrons and ions. The term «macroparticle» is commonly used, although some authors refer to «droplets» or «microparticles», or «nanoparticles» when considering the sub-micron part of the size distribution.

It is commonly acknowledged that macroparticle generation is related to the formation of a pool of liquid cathode material formed as a result of thermal runaway and the explosive plasma formation, though there may be special cases such as carbon or sintered cathodes where additional mechanisms may play a role.

Let us consider the typical case of a metal cathode. All phases of matter (solid, liquid, gas, plasma) can be found in the explosive processes on the cathode surface. It is intuitively clear that a thin transition zone must exist between the region of dense plasma (having a temperature of a few 10,000 K) and the much colder solid cathode. The liquid metal in this transition zone is subject to the time-varying plasma pressure, which will cause a rather complicated motion of the liquid. The ejection of droplets from such liquid under varying pressure is to be expected. Images taken of spot craters using scanning electron microscopes bring ample evidence of the violent nature of arc plasma and macroparticle formation, Figure Б1. The generation of plasma and macroparticles is intimately related to the explosive crater formation – they are both characteristic of cathode arcs. Therefore, one may state that if an arc discharge does not emit macroparticles it is not a cathode arc but a thermionic arc, or another form of discharge.

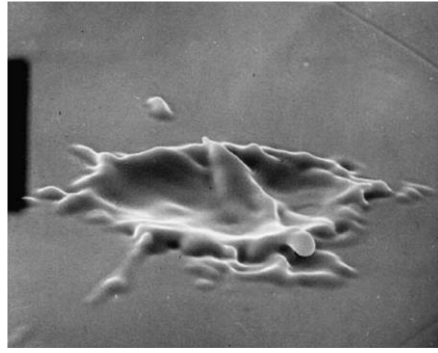


Figure B1 – Example of macroparticle and erosion crater formation by a cathode spot; scanning electron microscope image taken after a 10-ns arc on molybdenum.

A schematic illustration of macroparticle generation is shown in Figure B2. Macroparticles form when the layer of liquid cathode material (in black) yields to the plasma pressure. As the illustration suggests, many macroparticles are preferentially ejected under $5\text{-}30^\circ$ angle to the cathode surface. Just-ejected macroparticles or nonlinear waves of the liquid may rapidly cool down and freeze at the crater rim, forming micro protrusions that can serve as field-enhancing objects for the ignition of the next emission site.

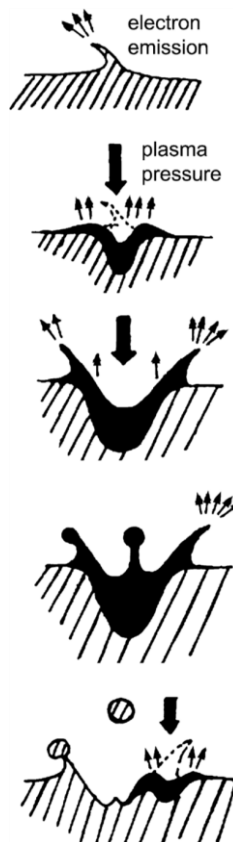


Figure B2 – Cartoon illustrating macroparticle generation as a result of plasma pressure on the liquid cathode material.

There are some considerations indicating that this intuitive picture is oversimplified. For example, the explosive stage in the evolution of the emission site is likely to be shorter than the characteristic time of motion of the metallic liquid. Daalder [1, 2] observed that the angular distribution of macroparticles has a maximum in the range of 10-30° from the cathode surface; however, there is also a large fraction of macroparticles ejected in a direction close to the surface normal. The latter observation can be qualitatively consolidated with the impulse nature of the plasma pressure. In the explosive phase, a layer of liquid metal is formed, which is subject to large plasma pressure. In the next phase, when the plasma pressure drops rapidly, the surface of the liquid may respond similarly to water when a stone has been thrown into it: a transient central column of liquid forms at the impact location in response, from which a droplet detaches. Figure B1 shows such a central cone and one may imagine that the macroparticle on the top left was ejected from the center before it solidified. It is remarkable that crater formation is possible when the arc duration exceeds just 10ns. This is much shorter than assumed in most studies. For example, considering a model for arcs of a few amperes, Coulombe and Meunier [3] determined typical times for reaching the melting temperature in the range of a few microseconds, i.e., much longer than experimentally observed, which is perhaps another indicator that the power density is fractal with much higher peak values at the small-scale cutoff.

Among the systematic studies on cathode erosion and macroparticle generation is the pioneering work done by Udris [4], Davis and Miller [5], Daalder [1, 2], Utsumi and English [6], and Tuma et al. [7], followed by others [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

The most-often-used approach to quantify macroparticles is to analyze macroparticles caught by collecting probes placed near the cathode. An underlying assumption is that the distribution of macroparticles sticking to the surface represents the distribution as emitted from the cathode spot. That assumption is hardly justified, and in fact photographic images show that many macroparticles do not stick but «bounce» off, at least in the cases of carbon and refractory metals, Figure B3.

Macroparticles can in fact be reflected several times before they come to rest on a surface. Keeping this in mind, distributions described in the literature have an error that is usually not specified. Yet deposition probes represent the most straightforward, generally accepted approach for the determination of macroparticles.

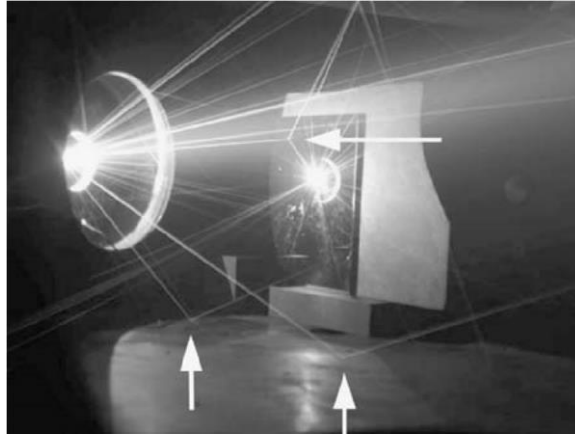


Figure B3 – Macroparticle emission from a cathode arc on graphite; arc current 100 A, exposure time about 100 ms. Macroparticles are incandescently glowing and their trajectories are therefore visible as white lines. Thick arrows indicate where macroparticles are reflected from the chamber wall or other components

When quantifying macroparticles, one should always use normalized values in order to give useful and reproducible data. For example, one could describe the number of macroparticles per size class (e.g., an interval of macroparticle diameter), area, and film thickness. Another normalization could be the number of macroparticles of size class, area, and cumulative charge transferred through the cathode, $\int I_{\text{arc}} dt$.

For coating applications, most relevant are macroparticles emitted in the direction close to the normal direction of the cathode surface, i.e., those ejected along with the useable plasma. Figure B4 gives examples of macroparticle distributions collected on axis of a pulsed cathode arc plasma source using Pb, W, Ag, Ni, Pt, and Cu cathodes. One can see, as a rule, that materials of low melting point, or of low cohesive energy, produce more and larger macroparticles. Comparing macroparticles emitted from copper and cadmium cathodes, Daalder [1] came to the same conclusion.

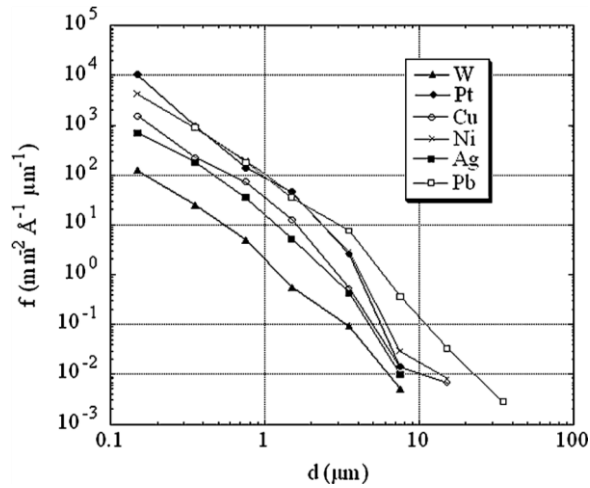


Figure B4 – Size distribution functions for macroparticles collected on axis of a pulsed cathode arc source in vacuum. The macroparticles were collected on a silicon wafer chip that was located 6.5 cm from the cathode on axis of the cathode arc plasma source, and analysis was done using imaging of a scanning electron microscope. The functions are normalized as number in size class per area and film thickness; the arc current was 200 A. (After [17])

A higher arc current would increase the number of active cathode spots or emissions sites, rather than a change in their character. Therefore, one could expect that the distribution of macroparticles is not changed much when the arc current is increased, at least as long as the arc operates in the diffuse anode mode, i.e., when current and plasma concentration due to the magnetic self-field and anode spots are not yet important. Figure B5 shows that this is indeed the case. In that experiment, a platinum cathode was chosen to make sure that no secondary effects due to oxide and other layers would play a role. Studying a range of very small arc current, 2-6 A, Utsumi and English [6] also found an independence of the macroparticle distribution on the arc current. Going to a much higher current range, 2-5 kA, Gellert and Schade [13] found a strong dependence of the macroparticle distribution on the current level, which they associated with anode activities.

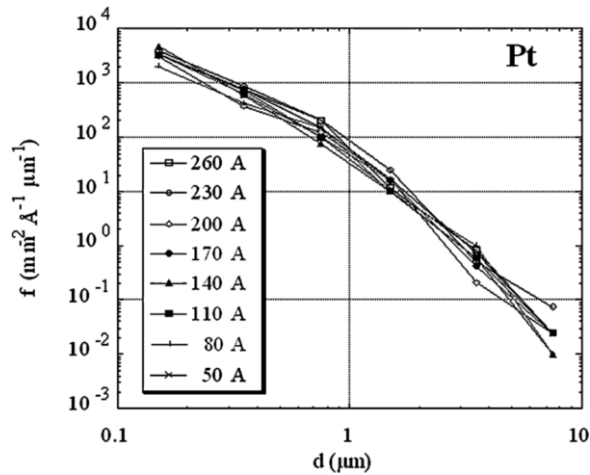


Figure B5 – Macroparticle size distribution for a platinum cathode as a function of arc current; all other details as with Figure B4

In many studies, the reported lower limit of macroparticle size was about 0.1 mm. As pointed out, for example in [17], this lower limit is related to the resolution of the imaging tool, most often a scanning electron microscope, rather than a physically relevant limit, and it is not a priori clear whether a lower limit exists. Some studies claim macroparticles down to the nanometer range [7, 19].

In a study by Siemroth et al. (unpublished), the statistical errors were carefully analyzed. They found that the measuring technique has a systematic error at the lower limit of the size distribution. Figure B6 shows the macroparticle size distribution for a 50-nm copper film. What appears as a «small» macroparticle at low magnification will look like a «large» macroparticle at higher magnification. Because large macroparticles are much less frequent, it is possible that at any given magnification, very large particles are not in the area of view. Therefore, the statistical error of the method is large at the large-size end of the distribution. At the small-size end of the distribution, there are many macroparticles. The issue here is that very small macroparticles may not be well recognized, given the limited resolution of the microscope, camera, and counting system at the particular magnification. Therefore, the data points indicating a drop for the smallest macroparticles are actually an artifact. This becomes clear when considering Figure B7, where a higher resolution was used on the same sample investigated in Figure B6. One might therefore conclude that the drop seen in Figure B7 for the very small

macroparticles is likely to be also an artifact. The observation and interpretation are not specific to copper but applies to other materials as well, see Figure B8.

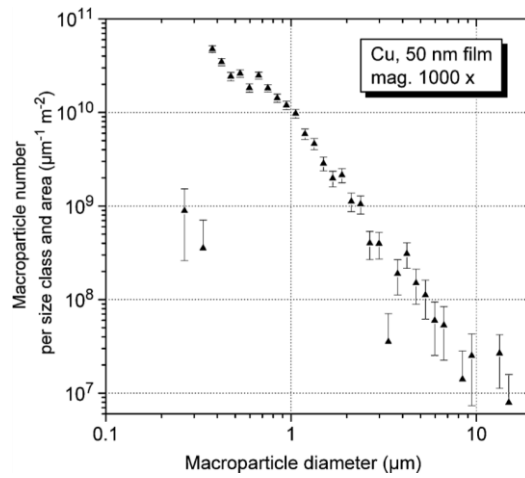


Figure B6 – Macroparticle size distribution measured on a 50-nm-thick copper film deposited on silicon. Magnification 1,000.

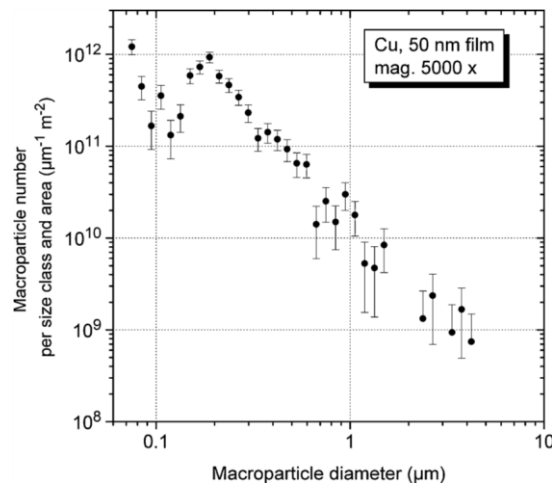


Figure B7 – Macroparticle size distribution of the same sample as in Fig.6.5 but measured with magnification 5,000.

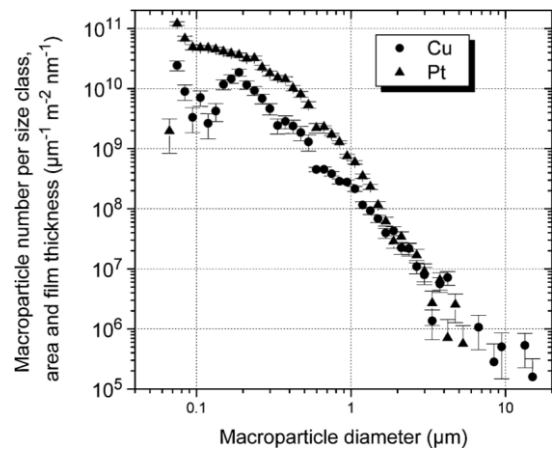


Figure B8 – Macroparticle size distributions for copper and platinum, normalized as number per size class, area, and film thickness.

In all of the previously mentioned figures, the size distribution is a power law,

$$f(d_{MP}) = A \cdot d_{MP}^{-\alpha} \quad (B1)$$

which is represented by a straight line in log-log presentation, where d_{MP} is the diameter of the macroparticle. The power law characteristic is another feature supporting the fractal model of cathode spot processes.

Macroparticles that stick to the substrate or collector surface are usually deformed by the impact. They often have a donut-like shape like shown in Figure B9. It is clear that those macroparticles were still in the liquid phase when impacting the collector surface, and they must have rapidly solidified.

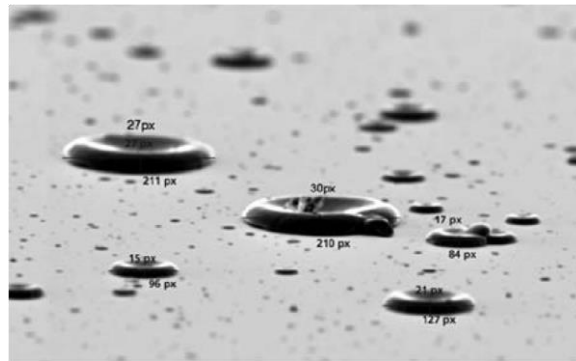


Figure B9 – Copper macroparticles on silicon: they are deformed when they impact the surface still being in the liquid phase (image taken under 10° angle to the surface, data courtesy of Peter Siemroth and co-workers, Dresden, Germany)

Flattened macroparticles are quite common, not just for low-melting-point materials but also for refractory metals, Figure B10. However, not all macroparticles are deformed, quite the contrary: most macroparticles smaller than 0.5 mm tend to be spherical, indicating that they have been cooled down and solidified before impact. Besides the very large macroparticle, Figure B10 also shows numerous small dark spots, indicating defects caused by the impact of small macroparticles. The low resolution of Figure B10 does not allow us to determine whether the small macroparticles are still there or not.

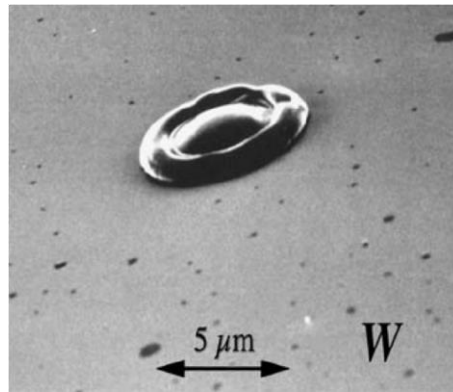


Figure B10 – A large tungsten macroparticle shows the same deformation, indicating that it also arrived on the surface as a liquid droplet (image taken under 20° angle to the surface (After [17]))

Using images of collector probes, one can estimate the volume and mass of macroparticles. In Figure B9, for example, the imaging software put pixel numbers on macroparticles, and such data can be used for quantitative macroparticle statistics. The analysis can provide an answer to the question what size classes of macroparticles contribute most to cathode erosion. There are two competing trends: large-sized macroparticles have larger mass but they are rare, while small macroparticles are much more frequent but each carries only a small mass. By convoluting the macroparticle size distribution with corresponding volume and mass density, the mass erosion function can be determined, as shown in Figure B11. One can see that all macroparticle size classes contribute to the total cathode erosion, with medium-sized macroparticles (of about 1 mm diameter) contributing most.

By integrating over the mass distribution function, the cathode's macroparticle erosion rate can be determined. This is relevant for deposition of films and also for other application of cathode arcs, such as space thrusters. Table B1 compares mass deposition in the form of macroparticles versus condensation of metal ions. One can see that macroparticles may constitute a large or even the dominating fraction of the coating mass. This is especially true for materials of low melting point. However, as mentioned before, a significant fraction of macroparticles does not stick to the collector, especially for refractory metals; therefore, the data present a lower limit of the true macroparticle erosion.

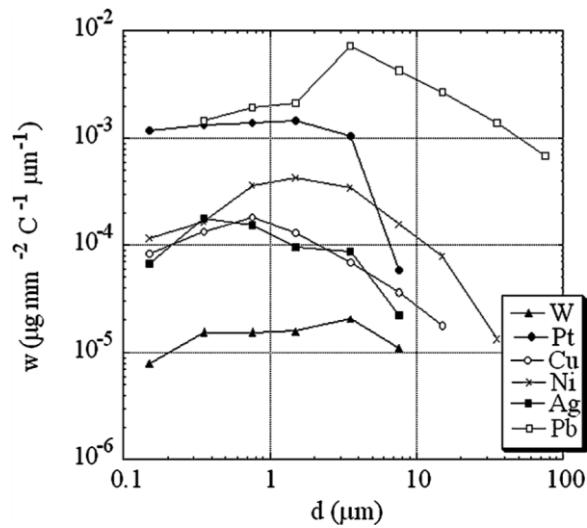


Figure B11 – Mass distribution of macroparticles, obtained by convoluting size distribution function, shape factor, and mass density. (After [17])

Mass distribution of macroparticles, obtained by convoluting size distribution function, shape factor, and mass density. (After [17])

Table B1 – Mass deposited in the form of macroparticles compared to mass deposited by condensing ions. The tungsten data (and possibly others) are lower limits because many already solidified macroparticles «bounce» and they are therefore not taken into account (After [17])

| Cathode material | Mass fraction of macroparticles for a coating made on axis (%) |
|------------------|--|
| W | 3.5 |
| Pt | 43 |
| Ni | 61 |
| Cu | 21 |
| Ag | 10 |
| Pb | 90 |

B2 Macroparticle Generation of Steered Arcs

One may distinguish between cathode arc sources with random spots and steered spots. In «steered arcs», « the ignition probability for the next spot location is greatly affected by a transverse magnetic field, mainly via the anisotropic plasma density, which in turn locally enhances the electric field via a locally thinner sheath. Spot «steering», or «driving», reduces the average spot residence time and enhances the apparent spot velocity. As a result, less and smaller macroparticles are ejected, as will be evident by a number of experiments mentioned.

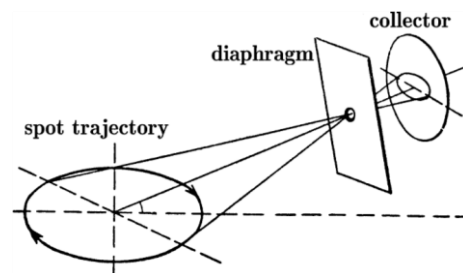


Figure B12 – Macroparticle imaging technique by Udris [4]: the spot is magnetically steered in a circular path; macroparticles are passing through a 1-mm hole and project themselves on a soot-coated glass collector. Because not the macroparticles themselves but their impact traces are recorded; this technique is free of the questionable sticking assumption used in many other studies

One of the first systematic investigations of macroparticle generation was done by Udris in the 1950s, when investigations of spots on liquid mercury were still the focus of cathode arc research [4]. To catch macroparticles from a steered arc, Udris used an ingenious imaging technique shown in Figure B12. The spot was magnetically steered in a circular path. A small fraction of macroparticles passed through a 1-mm diameter diaphragm beyond which a soot-coated glass plate was placed. The mercury macroparticles hit the surface and left a trace, Figure B13. After controlled exposure, the glass with traces was removed and evaluated under a microscope. In this way, Udris found that at relatively low spot velocities of less than 30 m/s, the number of macroparticles ejected in the direction of motion was much less than the number ejected in the back direction. With increasing field and apparent spot velocity, the number in the forward direction remained about constant while the

number in the back direction decreased. Overall, he concluded that as the spot velocity is increased, the number and size of the macroparticles decrease monotonically (see also [20], Appendix 4). This realization is the basis for one of the macroparticle mitigation measures where driving of spots is increased as much as possible. As already found in the 1980s, the reduction of macroparticles when going from a random arc to a steered arc showed immediate improvements in the scratch resistance and wear performance of nitride coatings [21].

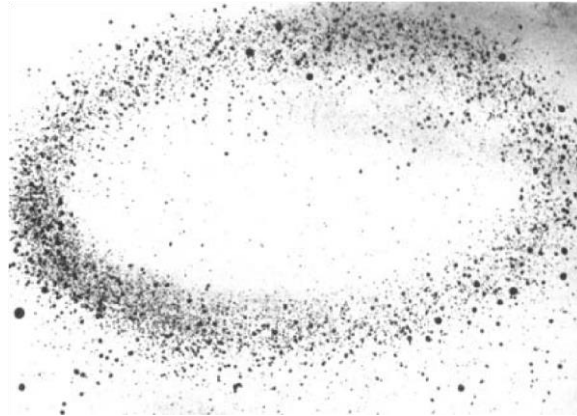


Figure B13 – Macroparticle traces left by a 8.5-A mercury arc, obtained in the projection geometry shown in Figure B12

Even as the macroparticle emission seems to be reduced, the overall cathode erosion rate, as normalized by the charge transferred, remained rather independent of the magnetic induction, or related speed of the apparent spot motion [22]. This has been shown up to a high induction of 0.9 T. The total erosion rate was also independent of the arc current (in the range 300-750 A), which is not surprising given the spot-splitting feature and provided the cathode is well cooled. At high cathode temperature, exceeding 400 °C for stainless steel for example, the erosion rate starts to increase [22], which is consistent with observations that high temperatures lead to larger craters [23].

Using a relatively small steered DC arc source and a titanium cathode, Swift [24] observed that the apparent spot velocity saturated at a relatively low transverse magnetic induction of 15 mT. Such saturation was seen before but at a much higher induction of about 600 mT [22]. Swift measured that the product of apparent spot velocity and number of macroparticles deposited per area is approximately constant,

Figure B14. The spot velocity was determined optically [25], and the macroparticle density by using a collection probe positioned under an angle of 10° to the surface, where the maximum angular emission was expected.

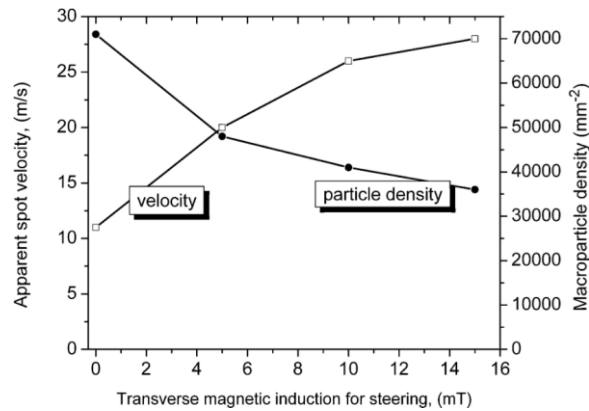


Figure B14 – Apparent speed of cathode spots and the number density of macroparticles deposited on a glass collector plate, placed 130 mm from the cathode center and under an angle of 10° with respect to the cathode surface plane, as a function of the transverse magnetic inductance driving the steered spot motion. The cathode was made from Ti, and the arc current was running at 100 A for 30 s. (Data from [24])

B3 Macroparticle Generation of Pulsed Arcs

In pulsed arcs, the arc current is often much higher than in DC arcs, and thus several cathode spots are simultaneously emitting plasma and macroparticles. Despite higher instantaneous currents, the time-averaged power of pulsed arcs is usually lower than the power of continuous arcs, and therefore the temperature of the cathode surface zone might be lower. The interaction of simultaneously operating spots tends to cause faster spot motion, similar to steered arcs in the previous section. Ignition tends to occur on «fresh» location of the cathode surface, with the result that less and smaller macroparticles are produced compared to the DC case, Figure B15.

Based on data shown in Figure B15 one might suspect that the total cathode erosion rate is reduced because less macroparticles are collected when the spot is magnetically steered by the pulsed self-field. However, the presence of a magnetic field does not necessarily reduce the total cathode mass loss, as cathode weighing experiments showed [17]. A pulsed cathode arc source was used that can run with or without magnetic field. The cathode was weighed before and after the deposition experiment. The results shown in Table B2 indicate that the total mass erosion from a cathode in a magnetic field is not reduced but rather slightly increased. This is in contrast to most other findings using DC arc operation.

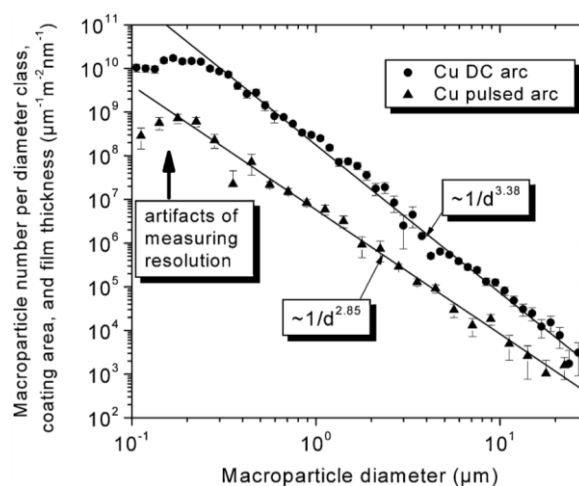


Figure B15 – Compare is on of copper macroparticle distribution functions for DC arcs and pulsed high-current arcs. The number of macroparticles is normalized to size

class, deposition area, and film thickness. (Data courtesy of Peter Siemroth and co-workers, Dresden, Germany)

Table B2 – The total mass erosion rate (mass loss per charge transferred) of the cathode determined by weighing the cathodes; pulsed arc of 250 ms duration, with an external axial magnetic field of $B = 170$ mT (After [17])

| Element | Erosion rate (mC/C) without external field | Erosion rate (mC/C) with 170 mT external field | Relative change in erosion rate (%) |
|---------|--|--|-------------------------------------|
| Pb | 807 | 975 | 21 |
| Ag | 76 | 84 | 10 |
| Cu | 51 | 56 | 10 |
| Au | 86 | 101 | 17 |
| Ni | 38 | 49 | 28 |
| Pt | 111 | 116 | 5 |
| Mo | 31 | 39 | 26 |
| W | 44 | 50 | 13 |

In order to interpret this result, one needs to recall that the cathode erosion is conventionally measured as cathode mass loss per charge transferred through the arc current, in units of mg/As. However, the burning voltage is also enhanced when the magnetic field was used, suggesting that cathode erosion might be better normalized by the energy dissipated rather than the charge transferred. Interestingly, such normalization was quite common in the 1950s and earlier work [20] but unfortunately replaced by normalization to charge transferred, perhaps because such charge normalization is simpler to do because it requires only measurement of the current.

Б4 Macroparticles from Poisoned Cathodes

Cathode «poisoning» is associated with the formation of a non-metallic layer on the cathode surface, which leads to type 1 cathode spots. Because spot ignition is much promoted by such layer, the average time of operation is shorter, and additionally the current per spot is drastically reduced compared to spots burning on clean metal (type 2 spots). Therefore, it is not surprising that fewer macroparticles are observed. Intentionally or unintentionally, this effect is widely used in reactive arc deposition of nitrides and oxides. While there are many studies on macroparticles for vacuum arcs (or cathode arcs with type 2 spots), only few systematic data are available for the industrially more relevant case of reactive deposition. Fewer particles are produced on poisoned cathodes, and macroparticle deposition may be further reduced due to the particle interaction with the background gas.

For example, a hot titanium macroparticle traveling in a nitrogen background atmosphere is likely to form a TiN surface, which has a much higher melting point (2930 °C) than the metallic surface (1668 °C). As a result, the macroparticle arriving at the substrate is more likely in the solid phase and thus more likely to «bounce» than the liquid particle. This example is especially relevant since titanium or titanium-containing cathodes operating in nitrogen or nitrogen–argon mixtures are widely used for hard and decorative coatings.

Studying the titanium–nitrogen system for a total gas pressure from vacuum up to 133 Pa, Kim and co-workers [27] found, as they anticipated, that the erosion rate decreased as the cathode surface was poisoned. Higher cathode temperatures resulted in enhanced nitriding (poisoning), leading to reduced erosion. The erosion rate dropped sharply when the gas pressure reached about 10 Pa. Steered arcs showed lower erosion rates of 38 and 15 mg/C for argon and nitrogen, respectively, compared to random arc values of 45 and 35 mg/C. Erosion rate studies on TiN-coated cathodes showed low erosion rates of about 22mg/C.

References

1. Daalder, J.E., Components of cathode erosion in vacuum arcs, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 9, 2379–2395, (1976).
2. Daalder, J.E., Cathode spots and vacuum arcs, *Physica C* 104C, 91–106, (1981).
3. Coulombe, S. and Meunier, J.-L., Theoretical prediction of non-thermionic arc cathode erosion rate including both vaporization and melting of the surface, *Plasma Sources Sci. Technol.* 9, 239–247, (2000).
4. Udris, Y.Y., Investigation in the field of electric discharges in gases (in Russian), *Trudy VEI (All-Union Order of Lenin Institute of Electric Engineering)* vol. 63. Gosenergoizdat, Moscow, Russia, (1958).
5. Davis, W.D. and Miller, H.C., Analysis of the electrode products emitted by dc arcs in a vacuum ambient, *J. Appl. Phys.* 40, 2212–2221, (1969).
6. Utsumi, T. and English, J.H., Study of electrode products emitted by vacuum arcs in form of molten metal particles, *J. Appl. Phys.* 46, 126–131, (1975).
7. Tuma, D.T., Chen, C.L., and Davis, D.K., Erosion products from the cathode spot region of a copper vacuum arc, *J. Appl. Phys.* 49, 3821–3831, (1978).
8. Gellert, B., Schade, E., and Dullni, E., *IEEE Trans. Plasma Sci.* PS-15, 545–551, (1987).
9. Disatnik, G., Boxman, R.L., and Goldsmith, S., Characteristics of macroparticle emission from a high-current-density multi-cathode spot vacuum arc, *IEEE Trans. Plasma Sci.* PS-15, 520–523, (1987).
10. Shalev, S., Goldsmith, S., Boxman, R.L., Einav, S., and Avidor, J.M., Laser Doppler anemometry: a tool for studying macroparticle dynamics in a vacuum arc, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 17, 56–61, (1984).
11. Shalev, S., Boxman, R.L., and Goldsmith, S.J., Velocities and emission rates of cathode-produced molybdenum macroparticles in a vacuum arc, *J. Appl. Phys.* 58, 2503–2507, (1985).

12. Shalev, S., Boxman, R.L., and Goldsmith, S., *IEEE Trans. Plasma Sci.* PS-14, 59–62, (1986).
13. Gellert, B. and Schade, E., «Optical investigation of droplet emission in vacuum interrupters to improve contact materials», *XIVth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, SantaFe, pp.450–454, (1990).
14. Boxman, R.L. and Goldsmith, S., *Macroparticle contamination in cathode arc coatings: Generation, transport and control*, *Surf. Coat. Technol.* 52, 39–50, (1992).
15. Kandah, M. and Meunier, J.-L., *Study of microdroplet generation from vacuum arcs on graphite cathodes*, *J. Vac. Sci. Technol. A* 13, 2444–2450, (1995).
16. Kandah, M. and Meunier, J.-L., *Erosion study on graphite cathodes using pulsed vacuum arcs*, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 24, 523–527, (1996).
17. Anders, S., Anders, A., Yu, K.M., Yao, X.Y., and Brown, I.G., *On the macroparticle flux from vacuum arc cathode spots*, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 21, 440–446, (1993).
18. Schülke, T. and Anders, A., *Velocity distribution of carbon macroparticles generated by pulsed vacuum arcs*, *Plasma Sources Sci. Technol.* 8, 567–571, (1999).
19. Monteiro, O. and Anders, A., *Vacuum-arc-generated macroparticles in the nanometer range*, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 27, 1030–1033, (1999).
20. Kesaev, I.G., *Cathode Processes in the Mercury Arc* (authorized translation from the Russian). Consultants Bureau, New York, (1964).
21. Boelens, S. and Veltrop, H., *Hard coatings of TiN, (TiHf)N and (TiNb)N deposited by random and steered arc evaporation*, *Surf. Coat. Technol.* 33, 63–71, (1987).
22. Sethumraman, S.K., Chatterton, P.A., and Barrault, M.R., *A study of the erosion rate of vacuum arcs in a transverse magnetic field*, *J. Nucl. Mat.* 111/112, 510–516, (1982).
23. Jüttner, B., *On the variety of cathode craters of vacuum arcs, and the influence of the cathode temperature*, *Physica* 114C, 155–261, (1982).

24. Swift, P.D., Macroparticles in films deposited by steered cathode arc, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 29, 2025–2031, (1996).
25. Swift, P.D., McKenzie, D.R., Falconer, I.S., and Martin, P.J., Cathode spot phenomena in titanium vacuum arcs, *J. Appl. Phys.* 66, 505–512, (1989).
26. Siemroth, P., Schülke, T., and Witke, T., High-current arc-anode source for high rate deposition, *Surf. Coat. Technol.* 68, 314–319, (1994).
27. Kim, G.E., Meunier, J.L., and Ajersch, F., Experimental study of the effect of nitrogen on titanium-arc cathode erosion, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 23, 1001–1005, (1995).