

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

Школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 15.04.01 Машиностроение
 Отделение школы (НОЦ) Материаловедение

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Влияние покрытия на основе Cu-Mo-S и окружающей среды на износ медной пары трения

УДК 621.793:669.33

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM81	Чукарев Богдан Андреевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Сергеев В.П.	Д.Т.Н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рыжакина Т.Г.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
15.04.01	Коростелёва Е.Н.	к.т.н., доцент		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

15.04.01 «Машиностроение»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания для создания и обработки новых материалов
P2	Применять глубокие знания в области современных технологий машиностроительного производства для решения междисциплинарных инженерных задач
P3	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа, связанные с созданием и обработкой материалов и изделий, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов машиностроения
P4	Разрабатывать технологические процессы, проектировать и использовать новое оборудование и инструменты для обработки материалов и изделий, конкурентоспособных на мировом рынке машиностроительного производства
P5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области современных технологий обработки материалов, нанотехнологий, создания новых материалов в сложных и неопределенных условиях
P6	Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современные высокотехнологичные линии автоматизированного производства, обеспечивать их высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на машиностроительном производстве, выполнять требования по защите окружающей среды
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Использовать глубокие знания по проектному менеджменту для ведения инновационной инженерной деятельности с учетом юридических аспектов защиты интеллектуальной собственности.
P8	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности.
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.
P10	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах устойчивого развития.
P11	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

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

Школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 15.04.01 Машиностроение
 Отделение школы (НОЦ) Материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) _____ Коростелёва Г.Н
 (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4AM81	Чукареву Богдану Андреевичу

Тема работы:

Влияние покрытия на основе Cu-Mo-S и окружающей среды на износ медной пары трения
--

Утверждена приказом директора (дата, номер)	
---	--

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе:	Объектом исследования являются медные образцы с электропроводящим твердосмазочным покрытием на основе Cu-Mo-S.
----------------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Изучение литературных источников и целью выяснения достижений мировой науки в области получения и применения покрытий; актуальность работы и постановка задачи; методы получения и исследования объекта; анализ результатов выполненной работы; заключение.
Перечень графического материала	Презентация в Microsoft Power Point

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Рыжакина Т.Г.
Социальная ответственность	Сечин А.И.
Разделы, выполненные на иностранном языке	Ажель Ю.П.

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

Обзор литературы по триботехническим свойствам меди

Literature review on tribotechnical properties of copper

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Сергеев В.П.	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM81	Чукарев Б.А.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа представлена на 131 страницах, включает 25 рисунков, 23 таблицы, 163 источников литературы, 1 приложение.

Ключевые слова: электропроводящие твердосмазочные покрытия, медная пара трения, вакуумная установка, износ

В 1-й главе рассмотрены основные виды деформации и изнашивания, а также изучены трибологические свойства меди. На основании результатов выделены основные закономерности изнашивания меди.

Во 2-й главе изучены основные материалы исследования и проводимые нами триботехнические испытания, а в дальнейшем рассмотрены электрические характеристики материала, а также микроструктура и химический состав покрытий

В 3-й главе рассмотрены структура и свойства покрытий на основе Cu-Mo-S, осажденных методом импульсного магнетронного напыления, а также сравнены триботехнические свойства покрытий при испытании в атмосфере аргона и воздуха.

Оглавление

РЕФЕРАТ	5
ВВЕДЕНИЕ	8
1. Обзор литературы по триботехническим свойствам меди	10
1.1. Основные закономерности трения и изнашивания металлических материалов.....	10
1.2. Основные виды изнашивания	13
1.3. Триботехнические свойства меди.....	17
1.4. Нанесение покрытия как метод повышения износостойкости	23
1.5. Постановка цели и задач исследования.....	28
2. Материалы и методы исследования.....	31
2.1. Материалы для исследования	31
2.2. Магнетронное осаждение композитных покрытий на основе $Cu_xMo_yS_z$.	31
2.3. Триботехнические испытания.....	37
2.4. Электрические характеристики покрытий	39
2.5. Микроструктура и химический состав покрытий.....	40
3. Структура и свойства покрытий на основе $Cu_xMo_yS_z$, осажденных методом импульсного магнетронного распыления.....	44
3.1. Микроструктура и химический состав покрытий $Cu_xMo_yS_z$	44
3.2. Триботехнические свойства покрытий системы Cu–Mo–S при испытании в атмосфере аргона и воздуха.....	47
3.3. Триботехнические свойства покрытий $Cu_xMo_yS_z$ при испытании в вакууме	55
3.4. Электрические характеристики покрытий $Cu_xMo_yS_z$	58
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ..	60
4.1. Предпроектный анализ. Потенциальные потребители исследования .	60
4.1.1. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	61
4.2. SWOT-анализ	66
4.3. Инициация проекта.....	68
4.3.1. Цели и результаты проекта	68
4.3.2. Организационная структура проекта.....	69

4.3.3	Ограничения и допущения проекта	70
4.4	Планирование управления научно-техническим проектом.....	72
4.4.1	Иерархическая структура работ проекта	72
4.4.2	Контрольные события проекта	73
4.5	Расчет сметы затрат на выполнение проекта	73
4.5.1	Расчет затрат на материалы.....	74
4.5.2	Расчет затрат на оборудование	75
4.5.3	Расчет заработной платы	76
4.5.4	Отчисления на социальные нужды	77
4.5.5	Расчет затрат на электроэнергию	77
4.5.6	Расчет прочих расходов.....	79
4.5.7	Расчет общей себестоимости затрат разработки.....	79
4.6	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	80
4.6.1	Оценка абсолютной эффективности исследования	80
4.7	Заключение по разделу	87
5	Социальная ответственность	90
	Заключение.....	103
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	105
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	120

Аннотация

Влияние электропроводящего твердосмазочного покрытия на основе Si–Mo–S, полученного импульсным магнетронным распылением композиционной мишени, на износ медной пары трения изучается при проведении трибологических испытаний на трибомашине в атмосфере аргона при давлении 1×10^5 Па и вакуума при давлении остаточных газов, не превышающих 5×10^{-3} Па. Исследована кинетика износа медной пары трения без покрытия и с покрытием в разных условиях изнашивания. Получены экспериментальные данные о влиянии толщины покрытия и вида окружающей атмосферы на характер износа и величину износостойкости. Полученные результаты могут быть полезны и использованы в космической отрасли с целью разработки высокоресурсных электроконтактных пар трения для космических спутников типа «Метеор» и других сканеров-зондировщиков, осуществляющих непрерывное зондирование Земли из космоса.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных требований, предъявляемых к космическим аппаратам, является обеспечение надежного функционирования и повышение длительности эксплуатации на орбите. Важнейшим конструктивным узлом, определяющим срок службы на орбите сканеров-зондировщиков спутников дистанционного зондирования Земли, является токосъемник, непрерывно вращающийся в процессе эксплуатации и работающий как электроконтактная пара трения [1]. Токосъемник представляет собой контактную пару «металлическая щетка – металлическое контактное кольцо» во вращающихся контактных устройствах, осуществляющих электрическую связь между космическим аппаратом и внешними вращающимися агрегатами типа сканеров-зондировщиков [2]. Для увеличения ресурса токосъемников актуальной является разработка способов повышения износостойкости применяемых для изготовления пар трения конструкционных материалов. Однако в этом случае обязательным условием

является не только сохранение низкого коэффициента трения и высокой износостойкости, но и высоких значений электропроводности.

Трение в условиях космического пространства осложняется бескислородной средой, обуславливающей адгезионное схватывание контактирующих поверхностей, и низкими температурами, обуславливающими невозможность использования жидких смазок. Основным направлением для повышения ресурса работы слаботочных токосъемников в литературных источниках является поиск оптимального состава материала щетки методом порошковой металлургии. В России на сегодняшний день в качестве щеток токосъемников используются серебряные и медные сплавы [3]. Для снижения коэффициента трения и повышения износостойкости в сплавы в процессе плавления добавляют дисульфид молибдена и углерод. Контртела – кольца изготавливают из чистых металлов при содержании основного металла не менее, 9,999 вес.%. Тем не менее, имеющиеся сегодня в промышленности сплавы не могут обеспечить необходимый срок эксплуатации токосъемников для перспективных космических аппаратов, и поиск путей повышения их износостойкости является на сегодня актуальной задачей.

Повысить срок эксплуатации электроконтактной пары трения может поверхностная модификация уже разработанных или разрабатываемых для применения в будущем материалов, однако в литературных источниках представлено мало сообщений об износостойком покрытии, обладающим высокой электропроводностью. За рубежом (NASA, USA, ESA, Europe) для повышения ресурса работы пар трения в космических аппаратах идут по пути разработки износостойких антифрикционных трех- и четырехслойных покрытий типа «хамелеон» на основе композиций типа WC/DLC/WS₂ или ZrYO/Au/DLC/WS₂, имеющих низкий коэффициент трения не только в сухой и влажной атмосфере, но и в вакууме [4-6]. Однако, главное требование, предъявляемое к используемым материалам, помимо высокой износостойкости, является высокая электропроводность. Поэтому указанные выше покрытия типа «хамелеон», которые не являются электропроводными, не могут быть применены

в токосъемниках. Требуется разработка износостойких и электропроводящих покрытий и способов их нанесения.

Для смазывания узлов, работающих в космическом пространстве, традиционно используется дисульфид молибдена, однако применение чистого дисульфида молибдена для смазывания слаботочной электроконтактной пары трения невозможно из-за его высокого удельного электрического сопротивления. Снижение удельного электрического сопротивления дисульфида молибдена представляется возможным путем его легирования медью. Твердая смазка, обладающая с одной стороны металлической проводимостью и смазывающей способностью дисульфида молибдена с другой стороны, может быть перспективной для смазывания узлов электроконтактной пары трения в условиях эксплуатации в открытом космосе.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы является исследование влияния нанесения покрытия на основе Cu-Mo-S и окружающей среды на износ медной пары трения.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ МЕДИ

1.1. Основные закономерности трения и изнашивания металлических материалов

Эксплуатационные характеристики деталей машин и механизмов зачастую обуславливаются трением в процессе их эксплуатации, т.к. трение инициирует деформационные, динамические, тепловые, адгезионные и другие процессы, определяющие работоспособность узлов трения машин.

Наука о трении и о процессах, сопутствующих трению – трибология, по мере своего развития предлагала множество теорий о природе трения и изнашивания двух находящихся во фрикционном контакте тел. В настоящее время наибольшее развитие получила молекулярно-механическая теория трения [7, 8].

Согласно этой теории сила трения представляется как сумма молекулярной (адгезионной) и механической (деформационной) составляющих. Молекулярное взаимодействие обусловлено взаимным притяжением двух твердых тел, их адгезией; механическое – взаимным внедрением и зацеплением их микронеровностей.

При скольжении имеют место различные изменения поверхностного слоя, вызванные деформацией, напряжением, температурой и химическим воздействием окружающей среды.

На рисунке 1.1 представлено пять основных видов нарушения фрикционных связей. Первые три вида наблюдаются при механическом взаимодействии, тогда как последние два – при молекулярном. Условия перехода от первого вида ко второму и третьему зависит от относительной глубины внедрения металла и величины сил адгезии. Осуществление четвертого и пятого видов зависит от соотношения между прочностями оксидной пленки и основного материала и величины напряженного состояния. Если прочность пленки меньше прочности основного материала, то имеет место четвертый вид. Когда прочность пленки или поверхностных слоев, лишенных пленки, больше, то имеет место пятый вид [9].

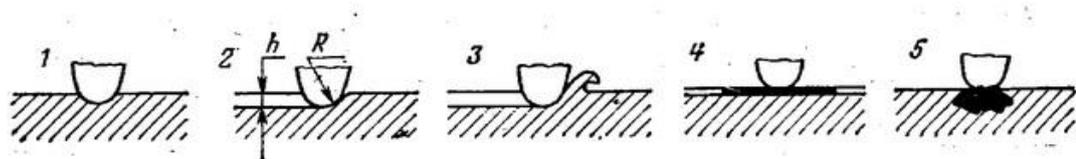


Рисунок 1.1 – Виды нарушения фрикционных связей. 1– упругое отеснение металла, 2– пластическое отеснение металла, 3 – срез, 4 – схватывание пленок и их разрушение, 5 – схватывание с глубинным вырыванием металла.

На основе молекулярно-механической модели И.В. Крагельский сформулировал три последовательных и взаимосвязанных этапа процесса трения:

1. взаимодействие поверхностей с учетом влияния среды;
2. изменение поверхностных слоев в результате взаимодействия с учетом влияния окружающей среды;
3. разрушение поверхностей с учетом двух предыдущих этапов.

Взаимное контактирование деталей происходит на выступах поверхностей на высотах, образованных микронеровностями (рис. 1.2) [10].

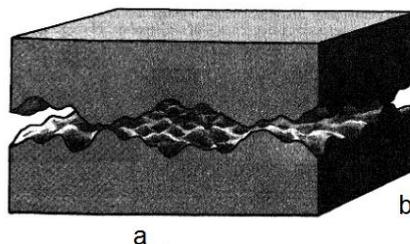


Рисунок 1.2 – Схема контактирования поверхностей тел пары трения [10].

При этом различаются:

1. Номинальная площадь контакта, соответствующая номинальным сопрягаемым размерам деталей: $A_a = a \times b$;
2. Фактическая площадь контакта, равная сумме фактических малых площадок соприкосновения: $A_r = 0,01 \dots 0,1$ от A_a ;
3. Контурная площадь контакта, представляющая собой сумму площадок, ограниченных контурами, в которые вписаны области с близлежащими площадками фактического контакта: $A_k = 5 \dots 15\%$ от A_a .

Возможны следующие виды деформации выступов:

1. Упругая;
2. Упругопластическая без упрочнения;
3. Упругопластическая с упрочнением.

В большинстве случаев первичного нагружения пластической деформации принадлежит ведущая роль в формировании фактической площади контакта. Входящие в касание выступы пластически сплющиваются, чаще всего с внедрением: внедряется более твердый выступ или тот, которому геометрическая форма придает большее сопротивление деформации.

Изнашивание – это разрушение поверхности твердого тела, проявляющееся в изменении размеров или формы. Этот процесс протекает во времени. Если износ какой-либо пары трения изобразить графически как функцию времени (или пути времени), то наклон кривой в каждой точке характеризует интенсивность изнашивания. Если отложить по оси абсцисс время t работы пары трения (рис. 1.3 а), а по оси ординат износ U , то получим кривую

изнашивания детали во времени. Тангенс угла наклона α , образованного осью абсцисс и касательной к кривой в произвольной точке, определяет скорость изнашивания в данный момент времени.

На кривой изнашивания в общем случае (рис. 1.3 а, кривая 1) можно выделить три участка, соответствующие трем стадиям изнашивания. *I* – начальное изнашивание, наблюдаемое при приработке поверхностей деталей; *II* (прямолинейный участок кривой) – установившееся изнашивание ($\operatorname{tg} \alpha = \text{const}$), наблюдаемое при нормальной эксплуатации сопряжения; *III* – процесс резкого возрастания скорости изнашивания, соответствующий стадии катастрофического изнашивания. Кривая 2 на рисунке 1.3 (а) показывает изменение скорости изнашивания.

Кривая на рисунке 1.3 (б) соответствует случаю, когда после окончания приработки постепенно накапливаются факторы, ускоряющие изнашивание, в силу чего отсутствует период установившегося изнашивания.

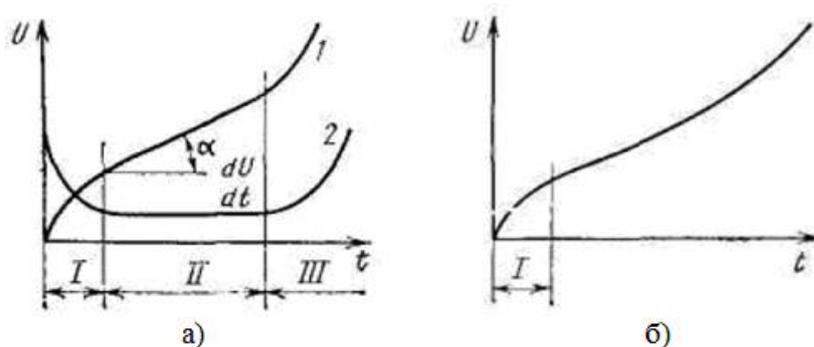


Рисунок 1.3 – Кривые изнашивания [10].

1.2 Основные виды изнашивания

Вид изнашивания и его интенсивность определяется совокупностью механических и физико-химических свойств материала под воздействием таких внешних факторов, как среда, температура, давление, скорость относительного перемещения поверхностей и др. Ввиду разнообразия материалов элементов трибосистем и условий их эксплуатации виды изнашивания достаточно

разнообразны. Ниже перечислены общепринятые основные виды изнашивания, описанные в различных литературных источниках [7-15].

Адгезионное изнашивание. Основной причиной этого вида изнашивания является адгезионная (молекулярная) составляющая силы трения. При сопряжении микронеровностей контактирующих в процессе трения тел, между ними возникают адгезионные связи. Благодаря адгезии могут образоваться прочные связи между металлами, металлами и неметаллами и между неметаллами. Связи возникают на участках фактического контакта, освободившихся от инородных пленок, и происходит относительно легко у мягких материалов, имеющих химическое сродство или взаимно растворимых. Особо явно адгезионное изнашивание наблюдается у пар трения, состоящих из однородных металлов. Причиной разницы адгезии между металлами заключается в степени переноса электронов между контактирующими металлами. Свободные электроны в двух контактирующих металлах меняются друг с другом и образуют металлическую связь.

По Ф.П. Боудену характер разрушения адгезионных связей сводится к четырем случаям:

1. Прочность связи меньше прочности металлов пары трения. Срез происходит по самому соединению.
2. Соединение прочнее, чем один из металлов пары трения. Срез происходит в объеме менее прочного металла. При этом его частицы будут налипать на более твердую поверхность.
3. Соединение прочнее обоих металлов. Основные разрушения связи происходят в толще менее прочного металла.
4. Соединение одинаковых металлов. Соединение подвергается наклепу, и при перемещении его сопротивление срезу увеличивается. Поэтому срез реже возникает по соединению, а чаще по глубине основной массы металла, при этом поверхностные повреждения оказываются значительными.

Для оценки объема износа пар трения, составленных из одного относительно мягкого материала, хорошо работает модель Арчарда. Арчард

установил, что объем уносимого материала V пропорционален нормальной нагрузке F_N и пройденному пути L и обратно пропорционален твердости материала H в соприкасающихся микровыступах:

$$V = k_A \frac{F_N \cdot L}{H}. \quad (1.1)$$

Эксперименты, проведенные Арчардом, показали, что коэффициент k_A изменяется в пределах от 10^{-2} до 10^{-7} .

Средством борьбы со схватыванием является применение смазочных материалов (жидких, пластичных и твердых), при этом необходимо, чтобы сопротивление деформированию пленки было ниже сопротивления деформированию материала пары трения, в противном случае при приложении достаточной нормальной нагрузки материал будет пластически деформироваться. Пленка при этом разорвется на отдельные участки, связанные с металлом, почти не изменяя общую площадь. В этот момент произойдет выход основного материала в промежутках между частями пленки, и произойдет схватывание на чистых вновь образованных поверхностях материала.

Усталостное изнашивание протекает, сопровождая все виды изнашивания. К нему относят случаи, когда при работе узлов трения отсутствуют аномальные повреждения, такие как задиры, схватывание, микрорезание и т.д. В процессе трения каждый выступ поверхности тела гонит перед собой волну на поверхности контртела, деформируя материал. Он сжимает его перед индентором (микронеровностью), значительно растягивая за индентором за счёт силы трения. Таким образом, каждое сечение истираемого тела последовательно подвергается сжимающим и растягивающим напряжениям.

Снижение количества циклов нагружения до появления разрушений поверхностного слоя обуславливается сжимающим и особенно растягивающим напряжением. Процесс усталостного разрушения поверхностного слоя протекает при номинальных напряжениях, не превышающих предел упругости, и всегда имеет скрытый период, в пределах которого происходит накопление повреждений. В этот период видимых физических изменений ни на поверхности, ни в поверхностном слое не происходит.

Усталостное изнашивание протекает даже в отсутствие прямого физического контакта тел при наличии смазывающей пленки.

Несмотря на снижение силы трения при смазывании и соответствующее уменьшение контактных напряжений, все равно происходит усталостное изнашивание, а число циклов, необходимое для повреждения поверхности, возрастает. Плёнка защищает основной материал от глубинного вырывания, однако не защищает основной материал от деформации, которую он испытывает при скольжении по нему внедрившихся выступов. Усталостное изнашивание при многократном деформировании микрообъемов материала приводит к их выкрашиванию и отслаиванию (питтинг).

Окислительное изнашивание происходит в случае, когда на соприкасающихся поверхностях образуются пленки окислов, которые в процессе трения разрушаются и образуются вновь, при этом продукты износа состоят из окислов. Интенсивность изнашивания может быть значительной, но поверхность трения сохраняет малую шероховатость, вследствие препятствования схватыванию поверхностей окислами.

Для окислительного изнашивания необходимо, чтобы промежуток времени между последовательными разрушениями пленки был достаточен для образования оксидной пленки определенной толщины. Когда пленка окислов тонкая и эластичная, она играет положительную роль и предохраняет поверхности от повреждений, препятствуя свариванию ювенильных участков поверхностей, которое происходит в вакууме. Но по мере роста окисная плёнка утолщается, становится хрупкой и разрушается. Продукты износа могут выходить из зоны трения со смазкой. А в некоторых случаях, они вызывают абразивное изнашивание, так как имеют большую твердость. В процессе окислительного изнашивания одновременно протекают деформация, адсорбция и химические реакции, и они являются взаимосвязанными. Деформирование активизирует тончайшие поверхностные слои, повышая их чувствительность к адсорбции, диффузии и химическим реакциям. Образовавшийся в результате локального пластического деформирования слой содержит многочисленные дефекты

микроструктуры и области с высокой плотностью дислокаций. Этот слой может взаимодействовать с кислородом, растворенным в смазке.

1.3 Триботехнические свойства меди

Особенностью меди является высокая склонность к схватыванию и перенос металла при трении в паре с практически любыми материалами. Однако степень износа меди сильно зависит от материала контртела. Для пары из одинаковых металлов перенос в 50-100 раз выше, чем для разных металлов. Это объясняется размерным фактором Юма-Розери [16]. Большое влияние на процесс изнашивания меди влияют режимы трения, такие как нагрузка, скорость относительного скольжения и окружающая среда. В работах [19, 20] изучались трение и износ меди в паре с малоуглеродистой сталью по схеме «палец–диск» при различных скоростях и нагрузках. Авторы установили, что с увеличением скорости относительного скольжения и нагрузки уменьшается период приработки, но износ повышается. Коэффициент трения увеличивается с увеличением скорости скольжения и уменьшается при повышении нагрузки. С увеличением скорости скольжения на контактных поверхностях увеличивается температура, что приводит к увеличению адгезионного взаимодействия и повышению коэффициента трения. Увеличение износа с повышением нагрузки, несмотря на уменьшение коэффициента трения, авторы работ связывают с увеличением фактической площади контакта.

В работе [22] исследовалось сухое трение меди в паре с различными металлами, такими как Al, Mo, Nb, Ta, Ti, W, Cu и нержавеющей сталь по схеме «палец–диск», где в качестве материала пальца выступали исследуемые металлы, материала диска – медь. Испытания на трение и износ проходили при различных скоростях с нагрузками 1, 2 и 3 Н. Авторы работы установили, что скорость относительного скольжения имеет большую роль в появлении адгезионного изнашивания. При низких скоростях скольжения оксидная пленка на металлах может играть роль твердой смазки и защищает контактирующие поверхности от схватывания. Повышение скорости скольжения ведет к разрушению оксидной

пленки и появлению адгезионного изнашивания. Наихудшие показатели износостойкости из исследуемых металлов показал алюминий из-за высокой растворимости алюминия в меди, высокой пластичности и низкой сдвиговой прочности. Титан также обладает высокой растворимостью с медью, но его высокие механические свойства защитили поверхность от интенсивного изнашивания. Молибден, тантал и нержавеющая сталь имели большой коэффициент трения из-за образования на их поверхности оксидных частиц износа, но интенсивному изнашиванию они также не подвергались благодаря высоким механическим свойствам.

Как видно из представленных выше результатов при трении меди имеет место адгезионный механизм изнашивания. В работах [23, 24] установлен механизм адгезионного изнашивания при трении меди по меди. В эксперименте исследовалось трение медного пальца с полусферическим концом в паре с медным барабаном большого диаметра при скорости скольжения 0,038 см/с и нагрузке 700 г. Контакт пальца и барабана наблюдался в микроскоп. Автор установил, что металлические фрагменты, вырванные с поверхности барабана, образовывали на передней кромке пальца нарост, и барабан скользил не по пальцу, а по наросту. Нарост периодически отрывался от пальца и уносился на поверхность барабана. Сразу после этого на поверхности пальца начинал образовываться новый нарост, и таким образом продолжался весь процесс. Нарост представлял собой агломерат из металлических фрагментов, некоторые из которых довольно слабо связаны, т.к. время от времени выбивались и отпадали как незакрепленные частицы. Многие другие фрагменты снова присоединялись к поверхности барабана и увлекались им, после чего снова могли быть увлечены наростом. Автор также сделал предположение, что смазка не только препятствует прямому контактированию трущихся поверхностей, но и может ограничивать рост нароста путем препятствования сцеплению между металлическими фрагментами.

Трение в электроконтактных парах трения сопровождается пропусканием электрического тока через контакты. Сила пропускаемого тока, как и полярность

изнашиваемых металлов и окружающая среда, может сильно влиять на поведение их изнашивания. Ряд работ посвящен исследованию этого влияния.

В работе [37] исследовалось влияние пропускания электрического тока при трении вращающегося медного кольца и серебряной проволоки в атмосфере углекислого газа путем исследования образующихся в результате трения при таких условиях частиц износа. Авторы установили, что при малых значениях силы тока (менее 100 мА) преобладающим механизмом изнашивания является пропахивание поверхности, при этом в преобладающем количестве присутствуют медные частицы износа. Молекулярный слой влажного углекислого газа на интерфейсе контактирующих поверхностей работает в качестве смазки, снижая долю частиц меди. В диапазоне тока 1,5-5 А эффект от теплоты нагрева I^2R вызывает десорбцию смазочного слоя, тем самым увеличивая относительную концентрацию медных частиц износа. При высоких значениях силы тока (более 10 А) высокие температуры на интерфейсе контактирующих поверхностей приводят к размягчению поверхности и частичному плавлению. С увеличением силы тока (от 10 до 40 А) преобладающими механизмами изнашивания являются размягчение и плавление, что приводит к появлению равных относительных долей медных и серебряных частиц износа. Кроме того быстро возрастает эффект переноса серебра от щетки на контактное кольцо. При значениях силы тока, превышающих 40А, преобладающим механизмом является плавление, и между контактными кольцом и щеткой возникает искрение, сопровождающееся быстрым изнашиванием.

В работе [39] исследовались химические, электрические и триботехнические свойства электроконтактных пар трения, состоящих из вращающегося кольца из меди и щеток из медных проволок при работе в условиях сверхвысокого вакуума и атмосфере углекислого газа. Сила тока, пропускаемая через щётки, составляла 50 мА, 5 А и 30 А. Авторы установили, что при трении в вакууме увеличение длины пробега приводило к очищению поверхностей от загрязнений окружающей среды (таких как оксидные пленки), снижению контактного сопротивления и увеличению коэффициента трения.

Испытания на трение в вакууме заканчивались свариванием проволоки и контактного кольца. Трение в атмосфере углекислого газа показало снижение контактного сопротивления в результате очищения поверхности трения от оксидных плёнок, а также снижение коэффициента трения. Коэффициент трения и контактное сопротивление снижаются до достижения устойчивой величины с увеличением длины пробега и остаются постоянными при проведении дальнейших испытаний. При этом контактное сопротивление снижается с увеличением силы давления щётки на кольцо. Трение очищенных ионами аргона поверхностей трения в атмосфере углекислого газа сопровождалось их некоторым загрязнением, главным образом углеродом и серой. Снижение контактного сопротивления и увеличение коэффициента трения в вакууме обуславливаются очищением поверхностей трения от оксидных плёнок и образованием чистых ювенильных поверхностей, предрасположенных к адгезионному схватыванию. При трении в атмосфере углекислого газа образуется молекулярный слой $\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O}$, защищающий от адгезионного схватывания. Увеличение контактного давления вызывает уменьшение толщины молекулярного слоя на интерфейсе поверхностей трения и, следовательно, снижение контактного сопротивления. Полное разрушение молекулярного слоя также приводит к адгезионному схватыванию поверхностей.

В работе [40] изучалось трение по возвратно-поступательной схеме медной проволоки по медной плите при нагрузке проволоки на плиту силой 1 Н, скорости скольжения 10 мм/с и пропускании электрического тока плотностью 180 А/см² в атмосфере углекислого газа. Авторы установили, что на столь низких скоростях скольжения сила тока не влияет на скорость изнашивания. В работе также установлено, что повышение температуры контртела выше температуры окружающей среды сопровождается повышением коэффициента трения и контактного сопротивления.

В работе [41] изучался износ сильноточных медных скользящих контактов в виде волоконной щетки в среде влажного углекислого газа. Две запараллеленные через вращающееся контртело щетки имели разную полярность.

Авторы работы установили различие в износе у щеток с положительным и отрицательным потенциалом. Исследования морфологии поверхности методом растровой электронной микроскопии показали, что на поверхности контактного кольца при подаче отрицательного потенциала на щетки имеются следы точечной коррозии, вызванной образованием микродуг. Шероховатость поверхности контактного кольца при подаче положительного потенциала на щетки оставалась сравнимой со средней шероховатостью поверхности кольца, не участвующей в трении, в то время как при подаче отрицательного потенциала на щетки, на поверхности кольца образуются ямки, размер которых превышает 10 мкм. Поверхность щеток, на которые подавался положительный потенциал, намного больше деформирована по сравнению с поверхностью щетки с отрицательной полярностью. Также установлено, что при плотности тока 120 A/cm^2 щетки с отрицательной полярностью меньше изнашиваются, чем щетка с положительной полярностью, в то время как при плотности тока 180 A/cm^2 износ щетки с положительной полярностью в два раза выше износа щетки с отрицательной полярностью, в то же время их износ ниже износа при испытании при плотности тока 120 A/cm^2 .

Разность в износе щеток с разной полярностью объясняется влиянием окружающей среды, благодаря повышению степени окисления меди при подаче на нее отрицательного потенциала. Так в работах [42, 43] изучался износ меди при трении в паре со сталью и пропускании через них электрического тока на воздухе и в атмосфере аргона. Авторы установили, что при трении в атмосфере аргона на стальную поверхность переносится медь, что приводит к скольжению меди по меди и повышению коэффициента трения. При трении в окислительной среде доминирующим становится окислительный износ с образованием на поверхности CuO . При подаче электрического тока степень окисления меди повышается, на поверхности образуется Cu_2O_3 , и к окислительному изнашиванию добавляется абразивное из-за образования оксидов железа и хрома на поверхности стали. Большую роль в изнашивании меди при пропускании тока также играет полярность контакта. Так, в случае, когда медь является катодом, ее

износ повышается, по сравнению со случаем, когда медь – анод при трении в окислительной среде. При изнашивании в атмосфере аргона полярность особого значения не имеет.

В работе [44] изучалось трение латунной волоконной щетки по серебру и покрытию из золота в вакууме и на воздухе по схеме «палец – диск» при пропускании постоянного тока силой 6 А. Авторы установили, что коэффициент трения в вакууме выше, чем на воздухе, однако, контактное сопротивление и электрический шум на воздухе намного выше, чем в вакууме. Скорость относительного скольжения влияет на величину контактного сопротивления и электрического шума. Трение на воздухе в паре латунь – серебро приводит к образованию оксидного слоя, увеличивающего контактное сопротивление и электрический шум. При трении латуни по покрытию из золота на поверхность латуни переносится слой золота, препятствующий окислению латуни, обеспечивая низкое контактное сопротивление и низкий электрический шум.

Таким образом, на основании приведенных в настоящем разделе результатов, можно выделить следующие основные закономерности изнашивания меди:

1. Преобладающим механизмом изнашивания меди при трении в паре практически с любыми металлами является адгезионное изнашивание, при котором идёт перенос металла с поверхности на сопрягаемый материал, что приводит к появлению трения медь по меди.
2. Окружающая среда в значительной степени влияет на механизм изнашивания меди. В условиях вакуума механизмом изнашивания является адгезионный, в то время как в окислительной среде может превалировать окислительное изнашивание.
3. Пропускание электрического тока при трении меди может влиять на характер ее изнашивания. При трении в окислительной среде электрический ток повышает уровень окислительного износа в следствия повышения степени окисления изнашиваемых материалов. Высокие значения

силы пропускаемого тока могут привести к появлению эрозии на поверхности изнашиваемого металла.

4. При пропускании электрического тока при трении меди большую роль играет полярность контакта. При трении в окислительной среде катод изнашивается быстрее, чем анод. При изнашивании в атмосфере аргона полярность особого значения не имеет.

1.4 Нанесение покрытия как метод повышения износостойкости

Согласно молекулярно-механической теории внешнего трения износостойкость материала можно повысить двумя способами: повысить твердость контактирующих поверхностей и снизить силу адгезионного взаимодействия между ними. Исходя из этого, износостойкость материала можно повысить, нанеся на его поверхность твердое покрытие или применить смазку для снижения силы адгезии между трущимися поверхностями.

В настоящее время получены сверхтвердые нанокompозитные покрытия на основе различных элементных систем с нанокристаллическими зернами в аморфных матричных системах [93-101]. Некоторые системы твердых покрытий рассматривались в качестве защитных покрытий в электроконтактных парах трения. Так, в работе [113] в качестве защитного покрытия для электроконтактной пары рассматривалось сверхтвердое покрытие NbB_x , осажденное с помощью магнетрона, оснащенного мишенью из NbB_2 . Покрытие осаждалось на стальной диск и испытывалось на трение в паре со стальным шариком по схеме «шар – диск». Твердость осажденного покрытия составила 42 ГПа, а коэффициент трения составил 0,16, благодаря окислению поверхности покрытия в процессе трения и образованию фазы B_2O_3 . Однако покрытия NbB_{2-x} обладают довольно высоким электрическим сопротивлением ~ 100 мкОм·см.

К сожалению разрушение твердого покрытия может привести к появлению твердых частиц износа из материала покрытия. В этом случае трение скольжения трибопары, изготовленной из мягких металлов, превратится в абразивное

изнашивание незакрепленными частицами разрушенного покрытия, что приведет к интенсивному изнашиванию мягкого металла трибопары [124-127].

Согласно молекулярно-механической теории трения для повышения износостойкости мягких металлов целесообразно снизить силу их адгезионного взаимодействия. Для снижения адгезионного взаимодействия между контактирующими во время трения поверхностями применяются различные смазки. Для смазки узлов, работающих в тяжелых условиях эксплуатации (таких как высокий вакуум, космическое пространство, высокая скорость, высокие нагрузки и очень низкие или высокие температуры), где жидкие смазочные материалы не могут обеспечить требуемую производительность или долговечность используются твердосмазочные материалы [128]. Существует четыре класса твердосмазочных материалов [129]:

1. материалы на основе углерода (например, графит, DLC и нанокристаллический алмаз);
2. дихалькогениды переходных металлов MX_2 (где $M - W, Mo, Nb, Ta, X - S, Se, Te$);
3. полимеры;
4. мягкие металлы, такие как серебро, олово, индий и золото.

Классическим примером твердосмазочного материала на основе углерода является графит. Графит, показанный на рисунке 1.5, представляет собой ламеллярное твердое тело с гексагональной решеткой [130]. Атомы углерода в его базисной плоскости удерживаются сильными ковалентными связями, а сами базисные плоскости удерживаются между собой слабыми силами Ван-дер-Ваальса, что обеспечивает слабое сопротивление на сдвиг между ламелями. Таким образом, под действием силы сдвига базисные плоскости скользят друг над другом. Присутствие водяного пара и кислорода в окружающей среде способствует межплоскостному сдвигу кристаллов графита. Плотные упакованные базисные плоскости обладают низкой поверхностной энергией и имеют несильную адгезию между собой [131, 132]. Если базисная плоскость повреждается, участки с сильной ковалентной связью плоскости связываются с

участками соседней плоскости, что приводит к повышению адгезии между слоями. Низкое трение сохраняется, когда краевые участки, способные к реакции, нейтрализуются (пассивируются) адсорбцией воды или других конденсированных паров [133]. Это справедливо для многих твердых смазочных материалов на основе углерода. В отличие от дихалькогенидов переходных металлов графит нуждается во влаге или адсорбированных газах в окружающей среде для пассивации обнажившихся ковалентных связей и краев базальных плоскостей для обеспечения смазывания [134]. В вакууме и в сухих средах графит без добавок показывает высокий коэффициент трения [135].

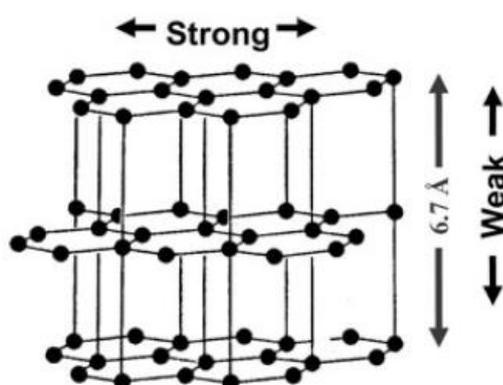


Рисунок 1.5 – Ламеллярная структура графита [130].

Среди различных дихалькогенидов переходных металлов наиболее известны MoS_2 и WS_2 , благодаря своим смазывающим свойствам. Наиболее часто эти твердые смазки применяются для смазывания узлов, эксплуатирующихся в условиях открытого космоса. Смазывание этими соединениями обеспечивается благодаря их кристаллической структуре. Подобно графиту, MoS_2 кристаллизуется в гексагональной структуре, в которой плоскость атомов молибдена зажата между двумя гексагонально заполненными слоями серы. Схема их кристаллической структуры представлена на рис. 1.6 [150].

Ламели S–Mo–S имеют сильную ковалентную связь, в то время как слабые силы Ван-дер-Ваальса удерживают ламели вместе, что приводит к слабому сопротивлению на сдвиг между ламелями. Таким образом, под действием силы сдвига базисные плоскости скользят друг над другом посредством внутрикристаллического скольжения, что приводит к образованию пленки переноса на контртеле. Таким образом, основными механизмами создания

низкого сопротивления на сдвиг являются [151]: создание базисных плоскостей (002) и последующая (повторная) ориентация параллельно направлению скольжения и образование пленки переноса.

Способность MoS_2 и WS_2 образовывать пленки переноса на контртеле означает, что нет необходимости покрывать обе контактные поверхности трибопары, покрытие одной контактной поверхности является достаточным для создания низкого трения после периода приработки. Кроме того, нет необходимости осаждать полностью кристаллические покрытия или покрытия с преимущественной ориентацией базисных плоскостей (002), параллельных направлению скольжения.

Ряд экспериментальных исследований подтвердили, что фрикционные напряжения могут вызвать кристаллизацию в покрытиях на основе MoS_2 , которые изначально не имели дальний порядок [152, 153] или приводить к переориентации плоскостей параллельно направлению скольжения в осажденных кристаллических покрытиях [154]. На рис. 1.7 показаны случаи, в которых покрытие имеет (а) кристаллическую (базисные плоскости перпендикулярно и/или параллельны подложке) или (б) аморфную структуру. В последовательности $a \rightarrow c \rightarrow d$, имеется сдвиговая переориентация перпендикулярных (или случайно ориентированных) базисных плоскостей, параллельных направлению скольжения, при трении случайно ориентированного кристаллического покрытия MoS_2/Au . В последовательности $b \rightarrow c \rightarrow e$ происходит превращение аморфного материала в кристаллические базисные плоскости, параллельные направлению скольжения, при трении аморфного покрытия $\text{MoS}_2/\text{Sb}_2\text{O}_3/\text{Au}$ [153].

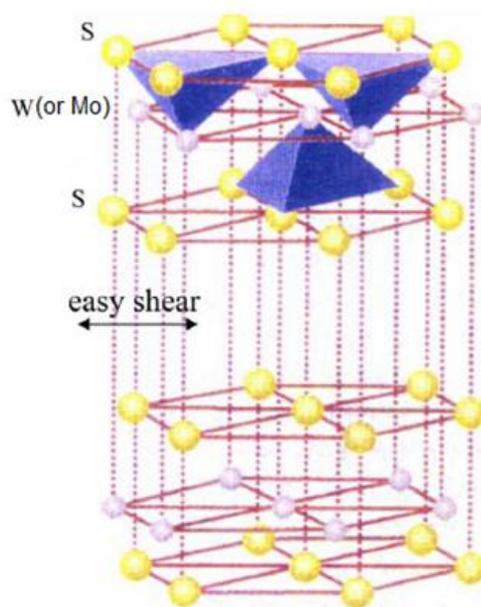


Рисунок 1.6 – Ламеллярная кристаллическая структура дисульфида молибдена (вольфрама) [150].

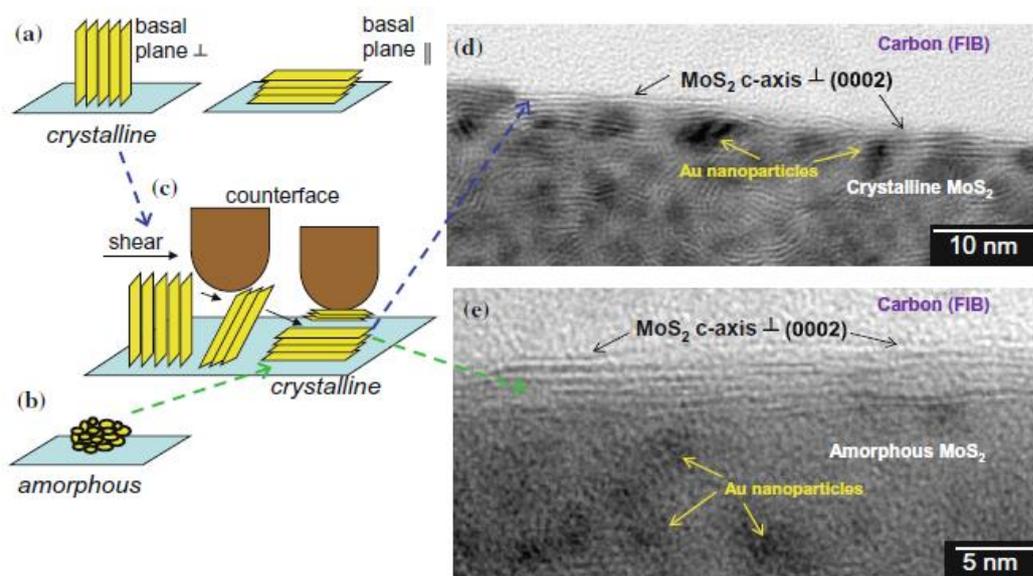


Рисунок 1.7 – Схематичное изображение двух кристаллографических текстур с базисными плоскостями (а), перпендикулярными или параллельными к подложке и (б) аморфной структурой. Процесс сдвиговой (а→с→d) переориентации при трении перпендикулярных (или случайно ориентированных) базисных плоскостей параллельно направлению скольжения, или (б→с→е) превращение аморфной структуры в кристаллическую. Соответствующие ПЭМ-изображения поперечных сечений дорожки износа кристаллического покрытия MoS₂/Au (1000 циклов скольжения при нагрузке 0,3 ГПа) (d) и е-аморфное покрытие MoS₂/Sb₂O₃/Au (10 000 циклов скольжения при нагрузке 0,7 ГПа) [129].

Большое влияние на трение дихалькогенидов переходных металлов оказывает окружающая среда. Покрытия MoS₂ и WS₂ показывают чрезвычайно

низкий коэффициент трения ($\sim 0,05$ или меньше) и длительный срок службы (несколько миллионов циклов скольжения) при трении в сухом инертном газе или в сверхвысоком вакууме, где покрытия не окисляются и не реагируют с молекулами водяного пара, сохраняя свою смазочную способность [151, 155]. Однако при скольжении во влажном воздухе наблюдается более высокий коэффициент трения (0,15-0,2) и чрезвычайно короткий срок службы (как правило, менее нескольких тысяч циклов). Характер влияния влажности на коэффициент трения можно объяснить следующим образом. Водяной пар сначала адсорбируется на поверхности покрытий, а затем проникает в покрытия MoS_2 . Пары воды в покрытиях будут влиять на кристаллическую структуру и физико-химические свойства и, таким образом, будут изменять триботехнические характеристики. В работе [156] сообщается, что жидкая вода может существовать в дефектах кристаллической структуры MoS_2 , и что эта вода оказывает влияние на прочность на сдвиг между базисными плоскостями. В работе [157] сообщается, что вода проникает в межслоевой зазор и вызывает увеличение адгезии между соседними ламелями. В работах [151, 155] сообщается что, ухудшение триботехнических характеристик при трении дихалькогенидов переходных металлов во влажной атмосфере связано с образованием валентных связей на краях базисных плоскостей, реагирующих с водой и кислородом в окружающей среде, что приводит к их окислению и образованию продуктов окисления, таких как MoO_3 или WO_3 .

1.5 Постановка цели и задач исследования

Анализ литературных данных показал, что адгезионный механизм изнашивания меди при трении в паре практически с любыми материалами является доминирующим механизмом изнашивания. При трении в паре с металлами происходит перенос меди на более твёрдый металл и далее трение протекает в паре медь – медь, что сопровождается интенсивным изнашиванием. Наиболее сильный износ наблюдается при трении в вакууме или инертной атмосфере, где невозможно образование оксидной пленки, снижающей силу

схватывания, однако, в окислительной среде окислительное изнашивание может превалировать над адгезионным.

Согласно молекулярно-механической теории внешнего трения износостойкость материала можно повысить либо повышением твердости контактирующих поверхностей, либо снижением силы адгезионного взаимодействия между ними. Исходя из этого, износостойкость материала можно повысить, нанеся на его поверхность твердое покрытие или применить смазку для снижения силы адгезии между трущимися поверхностями. Современные методы вакуумного напыления позволяют получить сверхтвердое покрытие практически на любом металле, однако, в рамках настоящей работы требуется повысить износостойкость медных образцов, работающих в паре с медным контртелом. Нанесение сверхтвердых покрытий на поверхность медного образца неизбежно приведет к повышенному износу контртела. Также в процессе трения частицы износа сверхтвердых покрытий будут представлять собой незакрепленные частицы абразива, что приведет к интенсивному абразивному изнашиванию мягкой меди. Исходя из этого, для повышения износостойкости мягких металлов целесообразно снизить силу их адгезионного взаимодействия путем осаждения на поверхность медного образца твердосмазочного покрытия. При трении в вакууме и атмосфере инертного газа дихалькогениды переходных металлов, в частности, дисульфид молибдена, обладают превосходными триботехническими характеристиками. При трении таких покрытий на поверхность контртела переносится пленка переноса, обладающая слабым сопротивлением на сдвиг. Способность дисульфида молибдена образовывать пленки переноса на контртеле означает, что нет необходимости покрывать обе контактные поверхности трибопары, покрытие одной контактной поверхности является достаточным для защиты контактных поверхностей от адгезионного взаимодействия и создания низкого трения. Однако, применение чистого дисульфида молибдена для смазывания электроконтактной пары трения невозможно из-за его высокого удельного электрического сопротивления (851 Ом·см [158]). Снижение удельного электрического сопротивления дисульфида молибдена представляется

возможным путем его легирования медью. Твердая смазка, обладающая с одной стороны металлической проводимостью и смазывающей способностью дисульфида молибдена с другой стороны, может быть перспективной для смазывания узлов электроконтактной пары трения в условиях эксплуатации в открытом космосе. Осаждение такого покрытия можно осуществить методом магнетронного распыления специальной композиционной мишени из меди и дисульфида молибдена. Испытание на износ медных материалов важно провести в сухой безкислородной среде для моделирования износных испытаний в вакууме и исключения влияния влаги и кислорода на триботехнические свойства исследуемых материалов. Это можно сделать при проведении трибоиспытаний в атмосфере инертного газа. Однако правильность такого подхода требуется доказать проведением сравнительных испытаний в разных атмосферах.

В связи с вышеизложенным целью данной работы является исследование влияние покрытия на основе Cu-Mo-S и окружающей среды на износ медной пары трения.

Для достижения цели поставленной работы необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать закономерности ионно-магнетронного формирования покрытий на основе системы Cu-Mo-S, их химический состав, структуру и электропроводность.

2. Исследовать закономерности изнашивания медных образцов без покрытия и с покрытием на основе системы Cu-Mo-S при работе в паре с медным контртелом в атмосфере аргона при давлении 1×10^5 Па и в вакууме при давлении остаточных газов, не превышающих 5×10^{-3} Па.

3. Изучить влияние толщины и состава покрытия на износостойкость медной пары трения.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Материалы для исследования

В настоящей работе в качестве экспериментальных образцов применялись параллелепипеды размером $5 \times 5 \times 15$ мм, вырезанные из листовой меди марки М1. Медь выбрана в качестве исследуемого материала для моделирования процесса изнашивания щеток вращающихся контактных устройств исходя из близких физических характеристик к реально применяемым материалам (пластичный электропроводящий металл) и доступности. В таблице 2.1 показан химический состав меди марки М1.

Таблица 2.1. Химический состав (вес. %) исследуемого материала (ГОСТ 859-2001)

Cu, не менее	Примеси, не более									
	Fe	Ni	S	As	Pb	Zn	O	Sb	Bi	Sn
99,9	0,004	0,002	0,003	0,002	0,004	0,004	0,05	0,002	0,001	0,002

Рабочая поверхность (грань 15×5) образцов механически шлифовалась и полировалась до зеркального блеска $R_a=0,32$ мкм с помощью набора шлифовальных бумаг и алмазных паст. После полировки образцы промывались в ультразвуковой ванне в спирте в течение 20 минут, после чего подвергались интенсивной сушке.

2.2 Магнетронное осаждение композитных покрытий на основе $Cu_xMo_yS_z$

Покрытия на основе системы $Cu_xMo_yS_z$ наносились на рабочую поверхность экспериментальных образцов в вакуумной камере установки магнетронного осаждения покрытий УВН-015МД КВАНТ (рис. 2.1).



Рисунок 2.1. Установка UVH-015MD КВАНТ.

Камера установки 015МД КВАНТ оснащена магнетронным распылительным устройством с композиционной мишенью Cu-Mo-S, поворотным столом и водяной рубашкой для нагрева и охлаждения в процессе вакуумирования камеры. Покрyтия системы Cu-Mo-S осаждали методом импульсного магнетронного распыления. Распыление – это процесс передачи импульса, в котором быстрая заряженная частица, например ион Ar^+ , под действием электрического поля выбивает атом с поверхности отрицательно заряженной мишени. В качестве рабочего газа применяется аргон из-за его инертности к распыляемым материалам и большой атомной массы.

Основными элементами магнетронного распылительного устройства являются катод – мишень, анод и магнитная система (рис. 2.2). Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется конфигурацией и величиной магнитного поля. При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или нулевой потенциал) возникает неоднородное электрическое поле, и возбуждается аномальный тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени.

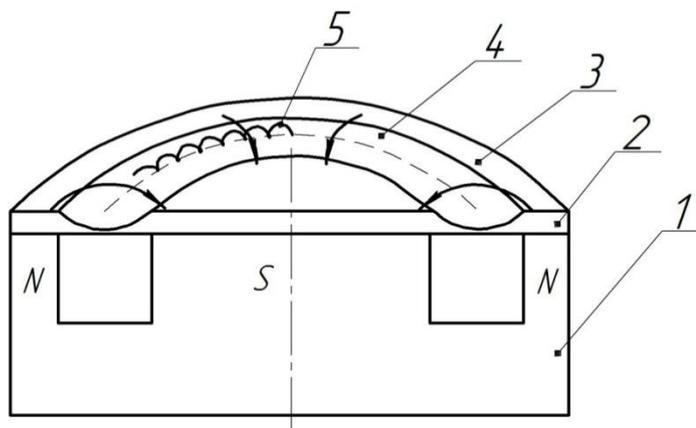


Рисунок 2.2. Схема магнетронной распылительной системы с плоской мишенью. 1 – магнитная система; 2 – катод – мишень; 3 – силовая линия магнитного поля; 4 – зона эрозии поверхности катода; 5 – траектория движения электрона.

Эмитированные с катода под действием бомбардировки ионов рабочего газа и ускоренные в электрическом поле электроны захватываются магнитным полем. Под действием его они совершают сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям у поверхности мишени. Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой с одной стороны магнитным полем, возвращающим электроны на катод, а с другой стороны – отрицательно заряженной поверхностью мишени, отталкивающей электроны. Электроны циклируют в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых электрон потеряет полученную от электрического поля энергию. Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадет на анод, используется на ионизацию и возбуждение атомов и молекул рабочего газа, что значительно увеличивает эффективность процесса их ионизации и приводит к резкому возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности катода. Это, в свою очередь, обуславливает увеличение интенсивности ионной бомбардировки поверхности мишени и значительный рост скорости ее распыления, а, следовательно, и скорости осаждения пленки.

Питание магнетрона на установке 015МД КВАНТ осуществляется с помощью импульсного биполярного источника питания с возможностью работы в режиме стабилизации по силе тока, напряжению или мощности. Диаграммы биполярных импульсов тока источника представлены на рисунке 2.3.

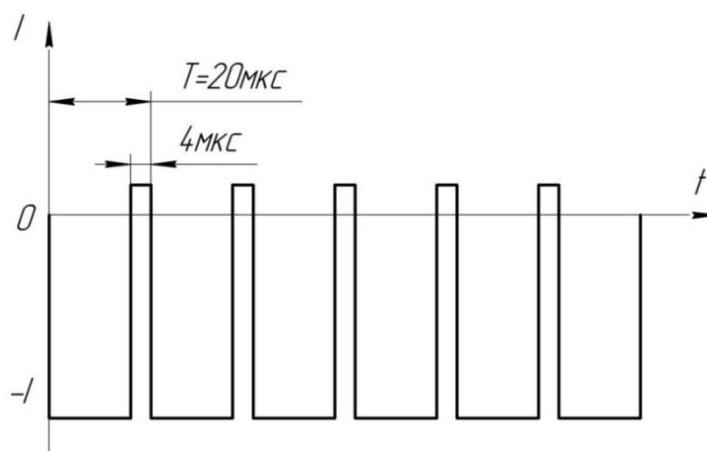


Рисунок 2.3. Диаграммы биполярных импульсов тока импульсного биполярного источника питания.

Откачка вакуумной камеры осуществляется по двухступенчатой схеме: низковакуумная с помощью агрегата в составе насосов ДВН-50 и 2НВР-5ДМ и высоковакуумная с помощью диффузионного паромасляного насоса НВДМ-250.

В установке предусмотрена система напуска реактивных или рабочего газов. Система напуска газов установки состоит из клапанов с электромагнитным приводом, клапана напускного регулируемого (автоматического) натекателя и электронного блока управления. Она может работать как в ручном, так и в автоматическом режимах. В автоматическом режиме расход газа изменяется таким образом, чтобы давление в камере поддерживалось на заданном уровне. В качестве прибора для измерения давления в вакуумной камере служит вакуумметр ВИТ-3.

Для получения однородного потока атомов требуемых элементов на магнетронное распылительное устройство устанавливалась специально разработанная композиционная мишень Cu-MoS_2 $\text{Ø}120$ мм. Фотография разработанной мишени представлена на рисунке 2.4.



Рисунок. 2.4. Композиционная мишень Cu-MoS_2 .

Мишень представляет собой медный диск из листовой меди марки М1 $\text{Ø}120$ мм с кольцевыми концентрическими пазами, в которые был запрессован порошок дисульфида молибдена. Магнитная система имела конфигурацию, позволяющую расположить зону распыления мишени вдоль концентрических пазов с дисульфидом молибдена. С помощью распыления ионами аргона такой

мишени можно эффективно получать однородный поток атомов Cu, Mo, S. Изменением конфигурации магнитного поля магнетрона и режимов распыления, а также количеством и шириной концентрических кольцевых пазов можно регулировать химический состав напыляемого с помощью магнетрона покрытия.

Технологический процесс магнетронного нанесения покрытия включал в себя следующие стадии:

1. промывка и сушка экспериментальных образцов;
2. Прогрев стенок вакуумной камеры до температуры 60 – 80°C для предотвращения конденсации и удаления паров воды с поверхности стенок камеры, а также для обезгаживания в процессе откачки.
3. загрузка образцов в вакуумную камеру с помощью технологической оснастки;
4. откачка камеры форвакуумным насосом до давления не более 6,65 Па;
5. откачка камеры до давления в камере $5 \cdot 10^{-3}$ Па паромасляным насосом высоковакуумной линии;
6. установка рабочего давления газа (аргона) в камере с помощью регуляторов расхода газа до давления 0,3 Па;
7. включение магнетрона и вывод его на рабочий режим распыления.
8. проведение процесса осаждения покрытия. Время процесса осаждения покрытия зависит от достижения требуемой толщины покрытия;
9. отключение магнетрона, отключение напуска рабочего газа, выдержка времени для остывания магнетрона, камеры, оснастки и образцов;
10. напуск воздуха в камеру и выгрузка образцов.

Покрyтия системы Cu–Mo–S осаждались на медные образцы по режиму, представленному в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Режимы осаждения покрытий системы Cu–Mo–S.

Параметр	Значение
Мощность	0,4 кВт
Сила тока	0,77 А
Напряжение	520 В
Режим стабилизации	по мощности
Частота	50 кГц
Длительность положительных импульсов	4 мкс
Давление аргона	0,3 Па
Расстояние от мишени до рабочей поверхности образцов	60 мм

Толщина осажденных покрытий линейно зависит от времени осаждения покрытия. Для определения скорости осаждения использовался образец-свидетель. На поперечном срезе образца-свидетеля с помощью сканирующего электронного микроскопа или оптического измерялась толщина осажденного покрытия и высчитывалась скорость осаждения. При толщинах менее 3-5 мкм использовался электронный микроскоп, при больших толщинах – оптический.

2.3 Триботехнические испытания

Испытания на износ проводили на специально сконструированном испытательном стенде в атмосфере аргона при давлении 1×10^5 Па или вакуума при давлении остаточных газов, не превышающих 5×10^{-3} Па (рис. 2.5). В первом случае установка помещалась в герметичный прозрачный бокс, заполненный аргоном, во втором случае – в вакуумную камеру. При построении кривых изнашивания использовались результаты испытания 4 - 6 образцов в каждой точке, после чего высчитывалось среднее значение и стандартное отклонение.

Испытания на износ ионно-имплантированных образцов и образцов с покрытием системы Cu–Mo–S протекали в паре с контртелом Ø40 мм из меди марки М1 при нормальной нагрузке 0,4 Н и скорости скольжения 0,5 м/с в условиях сухого скольжения при комнатной температуре по схеме «вал–колодка» с исследуемыми материалами в виде колодки (рис.2.6).

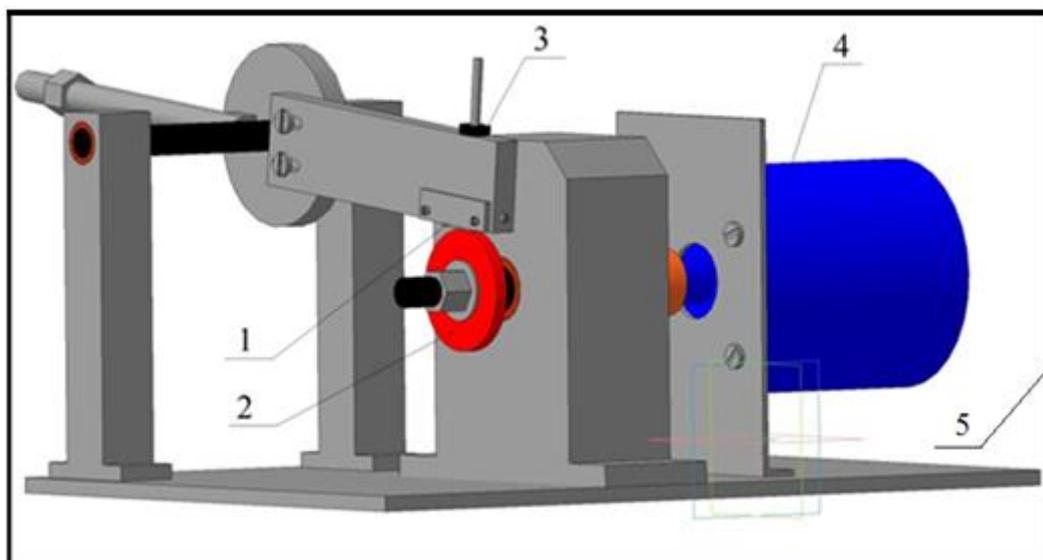


Рисунок 2.5. Схема стенда для испытания на износ. 1-образец; 2-контртело; 3-груз; 4-электродвигатель; 5-стенки резервуара с аргоном или вакуумной камеры.

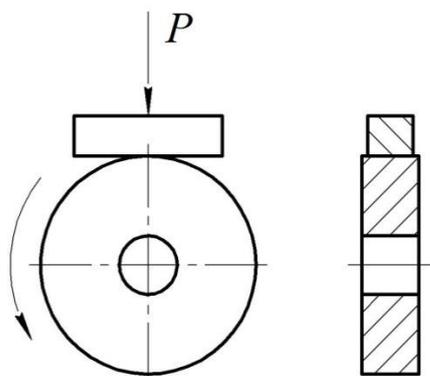


Рисунок 2.6. Схема испытание образцов на трение и износ по схеме «вращающийся вал–закрепленная колодка».

Режимы испытания на износ представляют собой методику реальных наземных ускоренных испытаний вращающихся контактных устройств, осуществляющих электрическую связь между космическим аппаратом и внешними вращающимися агрегатами типа сканеров-зондировщиков спутников дистанционного зондирования Земли [2].

Испытания на износ образцов с покрытием $Cu_xMo_yS_z$ продолжались в течение времени t в интервале от 0,5 до 140 час., до появления частиц износа медного цвета, свидетельствующих о начале разрушения покрытия, что соответствовало величине массового износа ~ 5 мг. Износ образцов определялся взвешиванием с помощью аналитических весов ВЛР-200 с точностью $\pm 0,1$ мг.

Определение условного срока службы покрытия определенной толщины выполняли при испытании на трибостенде (рис. 2.5) путем определения предельной длительности износа медного образца с покрытием при работе в паре трения с медным контртелом при указанных выше режимах испытания до момента отделения первых микрочастиц меди, предваряющего их массовое отделение при переходе от усталостного износа пары трения с покрытием к адгезионному без покрытия.

Испытания медной пары для определения величины коэффициента трения проводились на машине 2070СМТ-1 по схеме «вращающийся вал – закрепленная колодка». Контртелом служил диск Ø50 мм из меди марки М1, закрепленный на вращающемся валу. В качестве колодки служил образец в виде параллелепипеда 5x5x15 мм с рабочей поверхностью 5x15 мм. Процесс трения проводился в атмосфере воздуха с относительной влажностью не более 50% в условиях сухого скольжения вращающегося контртела по поверхности образца с линейной скоростью 0,1 м/с при нагрузке 49 Н. Результаты испытания на трение отображались с помощью самописца в виде кривых изменения момента трения со временем, который затем пересчитывался в коэффициент трения. Внешняя рабочая цилиндрическая поверхность контртела для испытаний на трение и износ на трибостенде и машине 2070СМТ-1 обрабатывалась тонким точением до достижения шероховатости $R_a = 0,32$ мкм.

2.4 Электрические характеристики покрытий

Удельное электрическое сопротивление осажденных покрытий измерялось четырехзондовым методом с использованием специально разработанной установки, включающей источник питания постоянного тока Б5-45А, цифровой мультиметр MASTECH MS8050 и датчик с четырьмя игловидными зондами. Схема испытательного стенда представлена на рисунке 2.10. Для измерения удельного электрического сопротивления покрытия осаждались на стеклянную пластину. После измерений делался поперечный срез стеклянной пластины с покрытием, и измерялась толщина осажденного покрытия с помощью растрового

электронного микроскопа. Удельное электрическое сопротивление покрытия ρ вычислялось по формуле [160]:

$$\rho = 4,53 \cdot \frac{U}{I} d, \quad 2.1)$$

где U – показания напряжения между внутренними зондами, I – сила пропускаемого через внешние зонды тока, d – толщина покрытия.

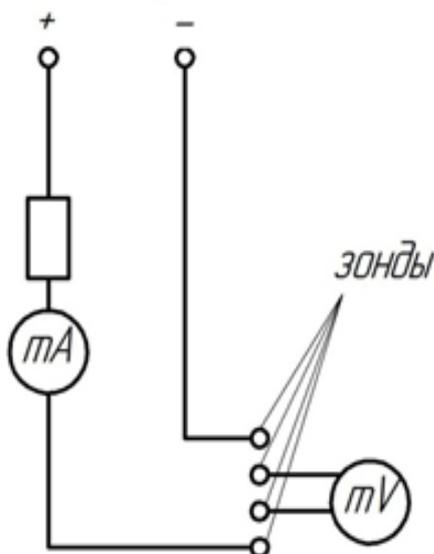


Рисунок 2.7. Схема стенда для измерения электрического сопротивления четырехзондным методом.

2.5 Микроструктура и химический состав покрытий

Исследования морфологии поверхности образцов, микроструктуры и химического состава покрытий выполнялись с использованием методик растровой электронной микроскопии (РЭМ) на сканирующем электронном микроскопе LEO EVO-50XVP (Carl Zeiss, Германия). С помощью РЭМ также измерялась толщина осажденных покрытий на поперечных шлифах образцов.

В базовую конфигурацию сканирующего микроскопа LEO EVO 50XVP входят:

1. колонна микроскопа с катодом из LaB₆;
2. камера с предметным столиком, обладающим 5 степенями свободы;
3. диффузионный форвакуумный насос;
4. управляющий компьютер с двумя мониторами;

5. джойстик управления предметным столом.

Для получения изображения растровым электронным микроскопом используются сигналы, произведенные вторичными электронами и обратно отраженными электронами.

Вторичная электронная эмиссия - это испускание электронов поверхностью твёрдого тела. Изменение уровня сигнала от эмиссии вторичных электронов связано как с изменениями в топографии поверхности образца, так и с вариациями состава материала образца, что делает их регистрацию чрезвычайно мощным способом наблюдения поверхности. Первичные электроны, проникающие в образец, взаимодействуют с электронами внешних оболочек атомов объекта, передавая им часть своей энергии. Происходит ионизация атомов образца, а высвобождающиеся в этом случае электроны могут покинуть образец в виде вторичных электронов. Это электроны внешней оболочки атомов, освобожденные в результате неупругого взаимодействия с электронами падающего пучка. Вторичные электроны обеспечивают максимальную в сравнении с другими сигналами разрешающую способность. Поэтому они являются в РЭМ главным источником информации для получения изображения поверхности объекта.

Другой наиболее широко используемый тип сигнала РЭМ – это обратно рассеянные (отраженные) электроны. В отличие от вторичных электронов, они не образуются в образце, а представляют собой электроны первичного пучка, рассеянные на большие ($> 90^\circ$) углы в результате однократного упругого отражения или в результате многократного рассеивания на малые углы. В конечном итоге первичные электроны, испытав ряд взаимодействий с атомами образца и теряя при этом энергию, изменяют траекторию своего движения и покидают поверхность образца. Доля обратно рассеянных электронов, покидающих образец, определяется коэффициентом обратного рассеяния η , который в свою очередь, является функцией атомного номера материала. Для элементов с высоким атомным номером существует относительно большая вероятность, что электрон будет отражен на большой угол при однократном

взаимодействии, при этом его энергия остается близкой к начальной энергии. Для мишеней с низкими атомными номерами преобладают отраженные электроны, претерпевшие многократные взаимодействия и имеющие большие энергетические потери.

Эффективность отражения возрастает с атомным номером, создавая основу для дифференциации между разными фазами. Сигнал отраженных электронов чувствителен также к локальной топографии, кристаллографии, а также к структуре магнитного поля материала.

Растровый электронный микроскоп также давал возможность получить сведения об элементном составе в локальных участках покрытий методом микрорентгеноспектрального анализа с использованием приставки энергодисперсионного анализа INCA Oxford Instruments. С его помощью измеряется энергия характеристического рентгеновского излучения образца, облученного электронным пучком. Энергия фотона рентгеновского излучения преобразуется в электрический сигнал в датчике. Этот сигнал обрабатывается электронной схемой системы, и данные по энергии передаются на персональный компьютер. Программное обеспечение SmartSEM персонального компьютера обрабатывает данные и преобразует их в спектр по энергиям. Положение каждого пика в спектре однозначно соответствует энергии элементов, содержащихся в образце. Специальное программное обеспечение на персональном компьютере идентифицирует пики, проводя качественный анализ. Другое программное обеспечение делает поправку на коэффициент поглощения, чтобы дать количественную информацию о присутствующих элементах.

В рентгеновском микроанализаторе используется характеристическое рентгеновское излучение, возникающее под действием электронной бомбардировки. Анализ характеристического рентгеновского излучения дает как качественную, так и количественную информацию об областях поверхностного слоя образца в несколько микрометров.

Применяемый для анализа микрозонд состоит из следующих основных частей:

1. электронно-оптической системы для получения электронного пучка небольшого диаметра (в неё входит электронная пушка и две электронные линзы);
2. двух рентгеновских спектрометров для измерения длин волн и интенсивности возбуждаемых характеристических рентгеновских линий;
3. светового микроскопа для выбора участка образца, предназначенного для исследования.

Химический анализ на рентгеновском микроанализаторе осуществляется путем измерения энергии и интенсивности рентгеновского излучения, генерируемого при бомбардировке образца сфокусированным электронным пучком. Взаимодействуя с атомами, пучок генерирует характеристическое рентгеновское излучение. Измеряя длину волны и интенсивность этого излучения, можно определить, какие элементы присутствуют в образце и каковы их концентрации. Информация об энергии характеристических рентгеновских пиков для каждого элемента имеется в виде табличных данных в форме «энергетической линейки» или графиков. В микроанализаторе эти данные зашиты в программном обеспечении.

3. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ $Cu_xMo_yS_z$, ОСАЖДЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

3.1 Микроструктура и химический состав покрытий $Cu_xMo_yS_z$

Для того чтобы разработать и исследовать твердосмазочное покрытие, обладающее с одной стороны металлической проводимостью, а с другой стороны, смазывающей способностью дисульфида молибдена, была исследована возможность создания электропроводящего твердосмазочного покрытия на основе композиций дисульфида молибдена и меди. Для решения этой задачи была разработана композиционная мишень специальной конструкции, позволяющая равномерно распылять с помощью импульсного магнетронного разряда разнородные материалы – поликристаллическую медь в твердом состоянии и микрокристаллический порошок дисульфида молибдена. Она представляет собой медный диск из листовой меди марки М1 Ø 120 мм с кольцевыми концентрическими пазами, в которые запрессован порошок дисульфида молибдена (рис.2.5). После прожига и пропыления медью канавок с запрессованным порошком MoS_2 при работе магнетрона на холостом ходу в течение 3-4 часов порошок спекается и мишень готова к эксплуатации. Магнитная система имела конфигурацию, позволяющую расположить зону распыления мишени вдоль концентрических пазов с дисульфидом молибдена. С помощью импульсного распыления ионами аргона такой мишени можно эффективно получать однородный поток атомов Cu, Mo, S в пределах площади круга диаметром до 100мм на дистанции 60 мм. Изменяя конфигурацию магнитной системы и режимы работы магнетрона можно в определенных пределах изменять соотношение элементов Cu, Mo и S в покрытии. Соответственно, изменяется его структурно-фазовое состояние и трибо-механические свойства.

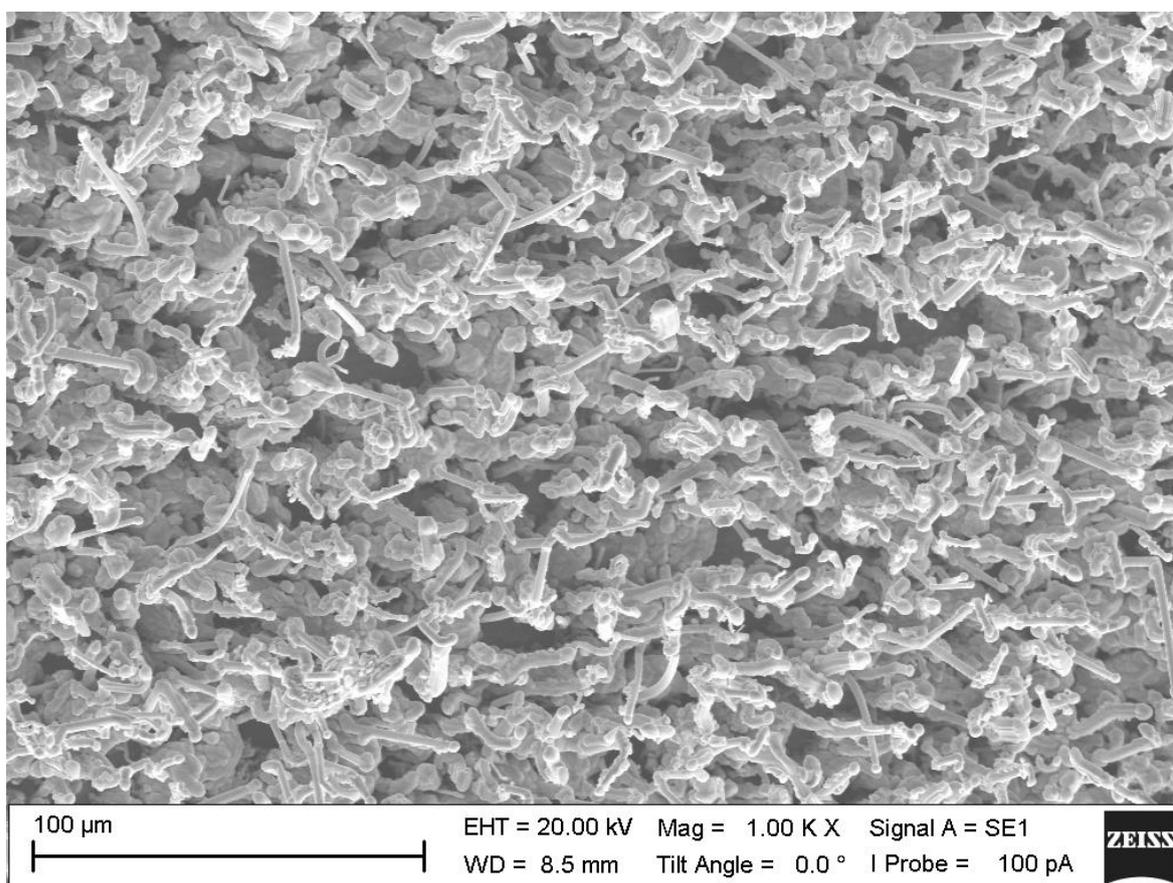
Исследование морфологии поверхности осажденных покрытий на основе системы $Cu_xMo_yS_z$ методом РЭМ показали, что покрытия имеют сложную волокнисто-глобулярную структуру (рис. 3.1 а). Покрытие состоит из

переплетенных волокон с поперечным размером от 0,5 мкм до 3 мкм и длиной до 30 мкм (рис. 3.1 б). Между волокнами в глубине покрытия видны объемные выделения материала, состоящие из глобул со средним поперечным размером 2 - 8 мкм (рис. 3.1 в). На боковой поверхности волокон покрытия, особенно в местах изгиба, могут также присутствовать небольшие глобулы с поперечным размером до 2 – 3 мкм в виде отдельных наростов. Анализ микрофотографий РЭМ показал, что доля волокон на площади поверхности покрытия толщиной 15 мкм составляет 65-75 %, глобул – 25-35%. При средней толщине покрытий более 25-30 мкм начинает проявляться различие в скорости роста волокон и глобул. Рост глобул начинает отставать от роста волокон, что приводит к постепенному переходу от плотной структуры покрытия к все менее плотной. Эта тенденция в изменении скорости роста элементов покрытия продолжается до толщины 50-60 мкм. Последние 10-15 мкм толщины пространство между волокнами перестает заполняться глобулами, вследствие этого происходит разрушение наиболее длинных волокон при их росте, так что дальнейший рост покрытия прекращается.

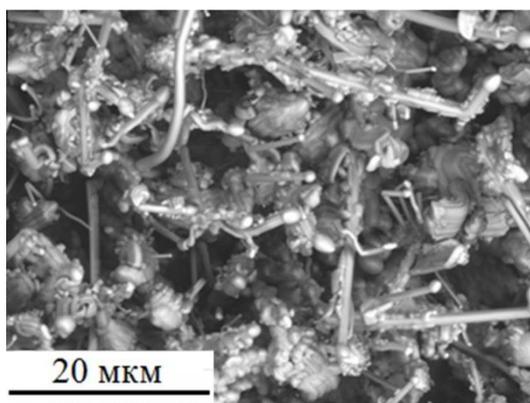
Элементный состав покрытия на основе $Cu_xMo_yS_z$ толщиной 15 мкм, определенный с помощью рентгеноспектрального анализа поверхности площадью $\sim 16 \text{ мм}^2$, показал следующее содержание элементов в нем: медь – 52 ат.%, молибден – 19 ат.%, сера – 29 ат.%. При проведении уточненного элементного состава волокон покрытия, измеренного методом микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе установлено, что они содержат в среднем: медь – 15 ± 3 ат.%, молибден – 38 ± 3 ат.%, сера – 47 ± 4 ат.% (S), тогда как в составе глобул имеется следующее соотношение элементов: $99,1 \pm 0,6$ ат.% (Cu) : $0,2 \pm 0,1$ ат.% (Mo) : $0,7 \pm 0,3$ ат.% (S).

Видно, что химический состав глобул представляет собой почти чистую медь с содержанием примесей менее ~ 1 ат.%. Состав волокон покрытия можно представить в виде химической формулы $Cu_{2,4}Mo_{6,1}S_{7,5}$. Этот состав близок в пределах экспериментальной погрешности к химическому соединению $Cu_2Mo_6S_8$, входящему в группу фаз Шевреля. Экспериментально выявленное более высокое

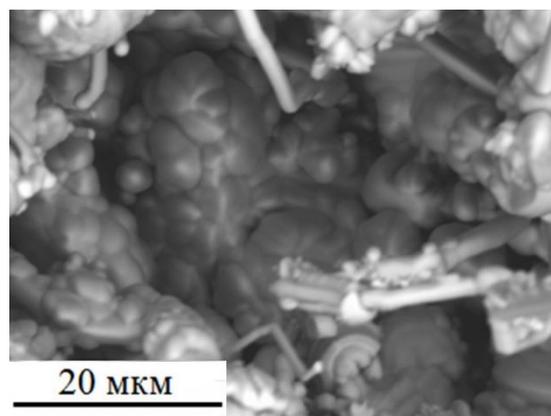
содержание меди ~15 ат.% в наблюдаемой нами фазе Шевреля вместо известного из литературы 12,5 ат.% вызвано погрешностью методики измерения при микрорентгеноспектральном анализе – в анализируемый объем покрытия кроме тонких волокон попадает небольшая часть глобул. Фаза Шевреля – тройной молибденовый халькогенид, общая формула которого в общем виде представляется как $M_xMo_6X_8$ (где M – катион металла, входящего в группу 1Б периодической таблицы элементов Менделеева (в нашем случае медь), X – сера, селен, телур) [1]. Фазы Шевреля это особая группа соединений, которая в настоящее время активно изучается вследствие необычных свойств, таких как сверхпроводимость и высокое магнетосопротивление [2]. Фаза $Cu_2Mo_6S_8$ тоже проявляет сверхпроводящие свойства в интервале температур 9,5 – 10,3 К [3].



a



б



в

Рисунок 3.1. Изображения поверхности осажденных покрытий на основе системы $Cu_xMo_yS_z$, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа: (а) – морфология поверхности покрытия при увеличении $500\times$, (б) – волокна и (в) – глобулы при увеличении $1300\times$

3.2 Триботехнические свойства покрытий системы Cu–Mo–S при испытании в атмосфере аргона и воздуха

Медные образцы с покрытием на основе $Cu_xMo_yS_z$, нанесенным методом магнетронного распыления на поверхность, подвергали изнашиванию в процессе трения скольжения в паре с медным контртелом по схеме «вал–колодка» в атмосфере аргона при скорости относительного скольжения 0,5 м/с и приложенной нормально нагрузке от контртела к образцу – 0,4 Н. При этих испытаниях трибостенд находился в камере из оргстекла из которой откачивался воздух и напускался аргон. Режимы и схема испытания на износ представляли собой методику реальных наземных ускоренных испытаний вращающихся контактных устройств, осуществляющих электрическую связь между космическим аппаратом и внешними вращающимися агрегатами типа сканеров-зондировщиков спутников дистанционного зондирования Земли [4].

Для определения толщины покрытий, обладающих наибольшим сроком службы, покрытия системы $Cu_xMo_yS_z$ осаждались на медную подложку при разной длительности напыления. Толщина осаждаемых покрытий линейно зависит от времени распыления мишени и измерялась на поперечном срезе контрольных образцов с помощью растрового электронного микроскопа. На

рисунке 3.2 представлен пример измерения толщины осажденного покрытия на сканирующем электронном микроскопе. Толщина покрытия, представленного на рисунке 3.2, составляет $\sim 5,6$ мкм. Видно, что структура является плотной, пространство между волокнами заполнено глобулами, микропор при наблюдаемой толщине покрытия не наблюдается.

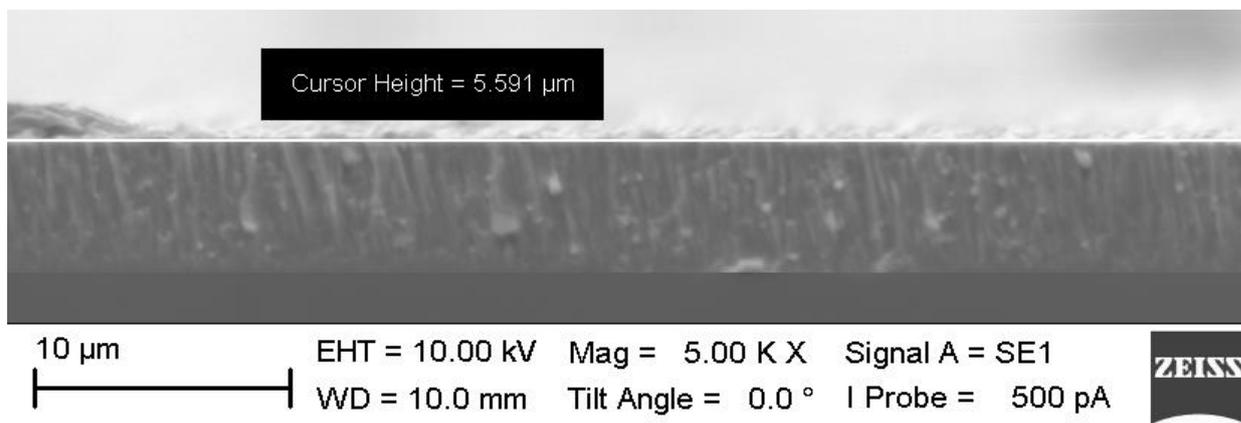


Рисунок 3.2. Изображение поперечного слоя покрытия $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$, полученное с помощью растрового электронного микроскопа

Триботехнические испытания в атмосфере аргона показали многократное повышение износостойкости медной пары с покрытием $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ толщиной ~ 15 мкм, по сравнению с медной парой без покрытия. На рисунке 3.3 показаны зависимости уменьшения массы медных образцов от времени изнашивания. Обе зависимости можно экстраполировать линейными графиками. Путем измерения тангенсов угла наклона полученных линейных зависимостей установлено, что покрытие системы $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ снижает скорость изнашивания медной пары трения в атмосфере аргона в ~ 300 раз:

$$\Delta m_0 / \Delta t \approx 3,123, \quad (1)$$

$$\Delta m_{\text{покр}} / \Delta t \approx 0,0107, \quad (2)$$

где $\Delta m_{\text{покр}}$ и Δm_0 – уменьшение массы образца с покрытием $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ и без покрытия за промежуток времени Δt .

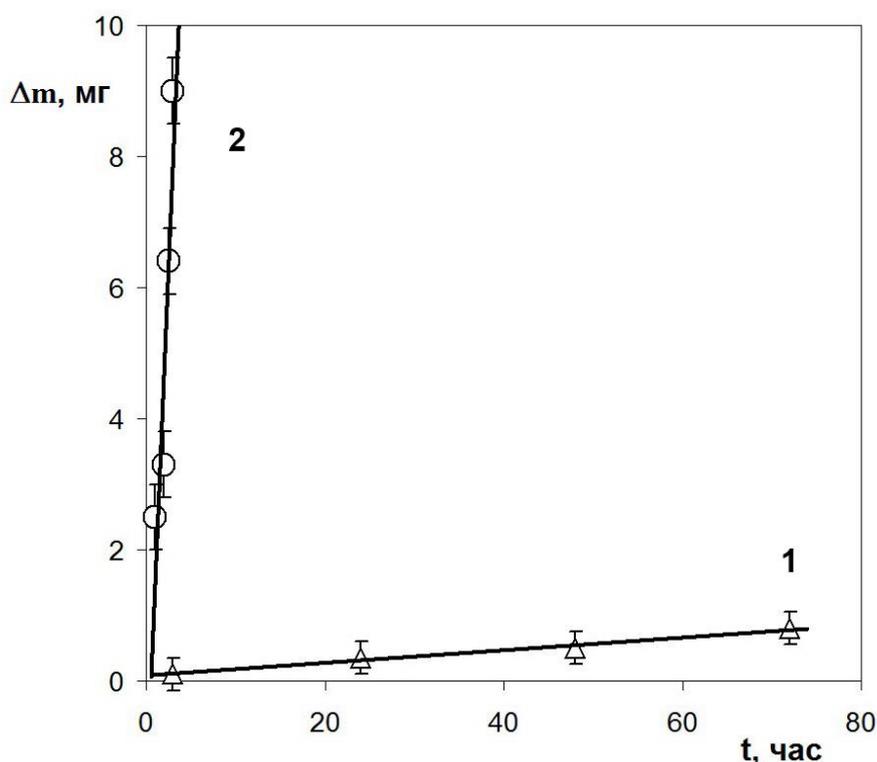


Рисунок 3.3. Кинетика изнашивания медного образца с покрытием $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ (1) и без покрытия (2) при работе в паре с медным контртелом в атмосфере аргона

На рисунке 3.4 показаны графики зависимости условного срока службы покрытий до разрушения от толщины осаждённых покрытий. Видно, что ресурс работы покрытий $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ линейно возрастает с увеличением толщины. Осаждение покрытий толщиной более 60-65 мкм практически невозможно, т.к. в этом случае наблюдается частичное разрушение покрытий (отшелушивание с поверхностного слоя покрытия мелких частиц, при этом поверхность медного образца не наблюдается). По-видимому, такое разрушение связано с отколами верхних частей чрезмерно длинных и толстых волокон покрытия, не обладающих высокой пластичностью. Таким образом, можно полагать, что покрытия толщиной 60 мкм являются наиболее износостойкими при испытании в заданных условиях. С другой стороны, толщину покрытия можно увеличить без разрушения покрытия путем осаждения многослойного покрытия $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z/\text{Cu}$. Так, с помощью нанесения нескольких слоев покрытия на основе $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ с

промежуточными тонкими прослойками меди не более 1 мкм можно увеличить ресурс работы покрытия в 1,5 – 2 раза по сравнению с однослойными покрытиями толщиной 60 мкм.

На рис. 3.4 можно видеть также, что при изнашивании образцов с покрытием в атмосфере аргона по сравнению с воздушной атмосферой зависимость срока службы покрытий с ростом толщины покрытия увеличивается интенсивнее. Если измерить тангенсы углов наклона полученных линейных зависимостей, то можно видеть, что темпы увеличения срока службы покрытия с ростом толщины в атмосфере аргона по сравнению с воздушной атмосферой в 2,3 раза выше.

$$\Delta T_{\text{Ar}} / \Delta h \approx 2,32, \quad (3)$$

$$\Delta T_{\text{Ar}} / \Delta h \approx 1,02, \quad (4)$$

где ΔT_{Ar} и ΔT_{Ar} – условный срок службы покрытия $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ в атмосфере аргона и воздуха, соответственно, при одинаковой толщине покрытия Δh . Более интенсивный износ образцов с покрытием в воздушной атмосфере связан с дополнительным действием механизма окислительного износа кроме основного действующего в инертной атмосфере механизма усталостного износа покрытия.

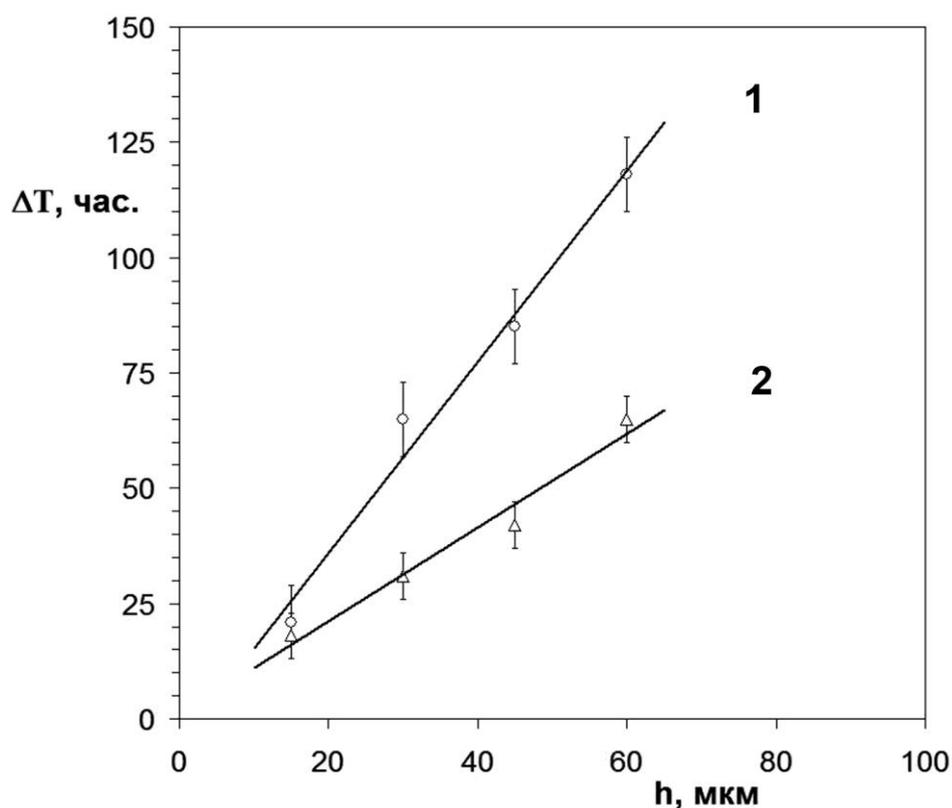


Рисунок 3.4. Графики зависимости условного срока службы ΔT покрытий на основе $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ до разрушения от толщины h осаждённых покрытий при работе в паре с медным контртелом в атмосферах аргона (1) и воздуха (2)

Полная кинетическая кривая изнашивания медного образца с покрытием $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ представлена на рисунке 3.5. Видно, что полученная кинетическая зависимость имеет вид кривой с двумя стадиями изнашивания [5].

За первые часы износа на поверхность контртела переносится тонкий слой покрытия в виде твердой смазки и далее протекает стадия **I** в течение длительности 120-130 час. Эта стадия характеризуется низкой скоростью износа. За время протекания стадии **I** в поверхностном слое образца накапливаются усталостные напряжения, вызванные пластическим деформированием медного глобулярного слоя покрытия микровыступами контртела. Материал глобул претерпевает сильную пластическую деформацию. Смазывание контактирующих тел при трении покрытия на основе системы $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ обеспечивается, по-видимому, микрочастицами фазы $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$, из которых состоят волокна. Смазывающая пленка из $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$ на поверхности образца и контртела

предохраняет поверхность от адгезионного взаимодействия и локализует некоторую часть сдвиговой деформации. Другая часть сдвиговой деформации из-за взаимодействия микронеровностей контактирующих поверхностей приводит к деформации медного глобулярного слоя покрытия (над поверхностью подложки) и зарождению в нем микротрещин. Зарождение трещин может инициироваться на включениях на границах образующихся зерен. Объединение нескольких трещин вызывает разрушение материала с выносом частиц износа. При отделении частиц износа вместе с ними из зоны трения постепенно выносятся смазывающий материал покрытия. Пленка со смазывающим материалом покрытия во время изнашивания частично пополняется за счет поступления микрочастиц $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$ из объема покрытия. Обнаженные новые ювенильные участки поверхности, образовавшиеся в результате отрыва частиц износа, адсорбируют пленку переноса с поверхности контртела, тем самым вызывая уменьшение толщины пленки переноса на контртеле.

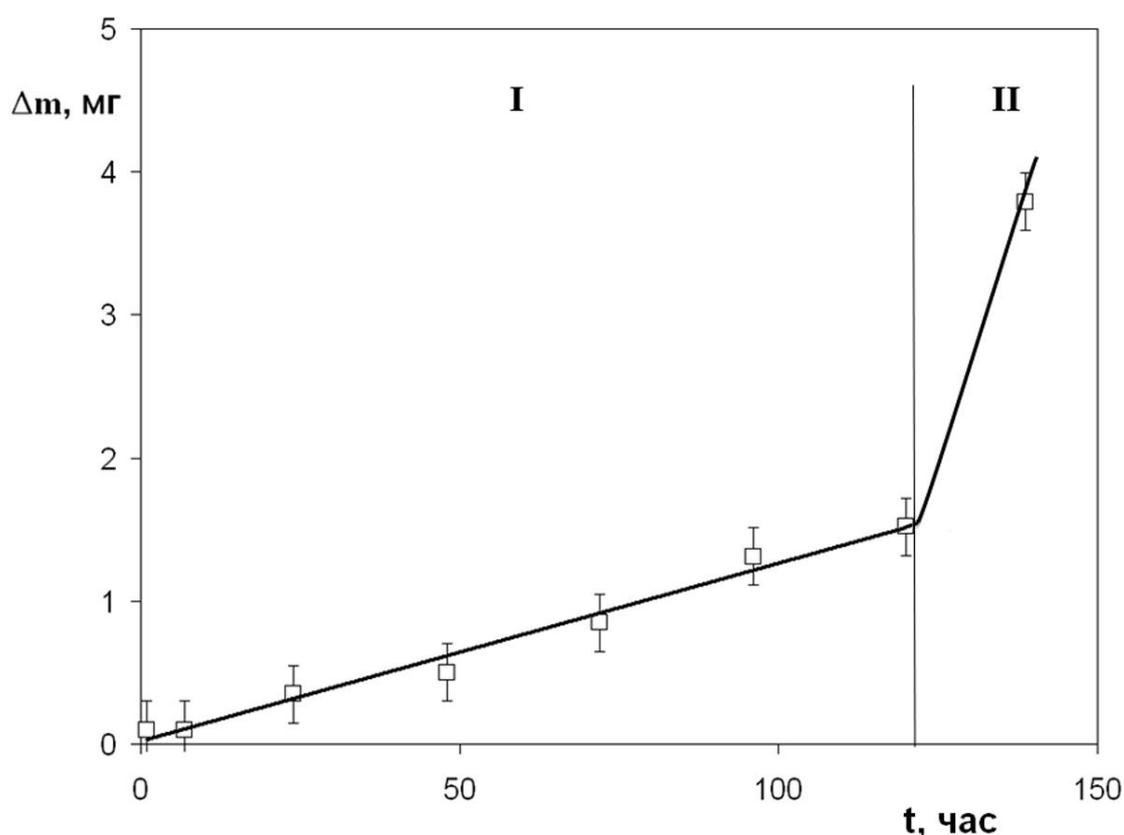


Рисунок 3.5 Кинетическая кривая изнашивания медного образца с покрытием $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ при работе в паре с медным контртелом в атмосфере аргона.

В тот момент, когда разрушение граничного слоя из материала покрытия начинает превалировать над его новым образованием, начинается постепенный переход от усталостного изнашивания к адгезионному – стадия **II**. По завершению стадии **II** граничные слои полностью разрушаются, и наступает стадия адгезионного изнашивания **III**, аналогичная кривой изнашивания 2 с тангенсом угла наклона близким к изображенному на рис.3.5.

Измерение коэффициента трения (рис. 3.6), также свидетельствуют о том, что покрытие на основе элементов Cu, Mo, S препятствует возникновению адгезионного изнашивания. Средняя величина коэффициента трения медной пары с покрытием $Cu_xMo_yS_z$ на воздухе при испытании на машине 2070 СМТ-1 составил 0,27, в то время как коэффициент трения медной пары без покрытия составляет $\sim 0,59$ при тех же условиях, т.е. покрытие на основе системы $Cu_xMo_yS_z$ понижает коэффициент трения медной пары в $\sim 2,2$ раза. Измерения коэффициента трения производились на воздухе, а не в атмосфере аргона, как при износных испытаниях и при более тяжелых режимах (нагрузка 49 Н, скорость скольжения 0,1 м/с). Изменения условий окружающей среды и режимов трения может существенно влиять на процесс изнашивания. Известно, что влажный кислород негативно сказывается на триботехнических свойствах покрытий, на основе дисульфида молибдена [6-9]. Однако по полученным кривым изменения коэффициента трения можно сделать вывод о принципиальной разнице в процессе трения медной пары с покрытием системы $Cu_xMo_yS_z$ и без покрытия.

На рисунке 3.6 видно, что кривая изменения коэффициента трения медной пары трения имеет скачкообразный характер, характерный для отрыва мостиков сварки, образующихся при трении тел, имеющих тенденцию к адгезионному схватыванию. В тоже время трение медной пары с покрытием $Cu_xMo_yS_z$ представляет собой более стабильный процесс. В этом случае кривая изменения коэффициента трения имеет плавный характер, характерный для трения смазывающихся тел. Таким образом, на основании данных исследования

поверхности дорожек износа и измерения коэффициента трения, можно сделать вывод о том, что покрытие на основе $Cu_xMo_yS_z$ работает как твердая смазка.

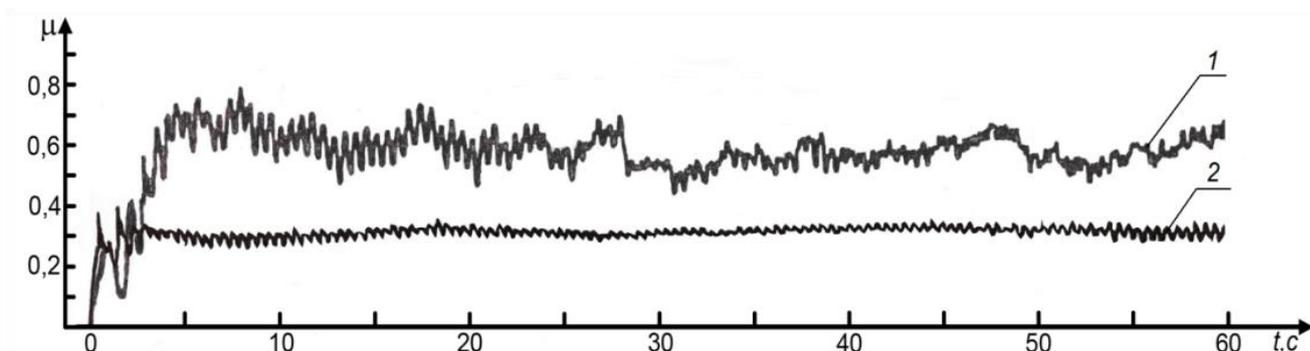


Рисунок 3.6. Зависимости изменения коэффициента трения со временем испытания на воздухе: 1– кривая для медной пары трения без покрытия, 2 – кривая для медной пары трения с покрытием $Cu_xMo_yS_z$

Исследование геометрии поверхности следа износа образцов с покрытием $Cu_xMo_yS_z$ методом РЭМ (рис. 3.7) показало, что защитная пленка на поверхности образца представляет собой не сплошную гладкую поверхность, а «островковую» поверхность, «островки» которой представляют собой мелкие и относительно крупные участки - конгломераты с материалом покрытия (обведены кружками).

Возможный механизм повышения износостойкости медной пары трения в результате нанесения покрытия можно представить следующим образом. Каждый конгломерат представляет собой третье тело. Контртело контактирует с одним или несколькими конгломератами, сдвигая их, деформируя и часть «захватывая» с собой. При этом часть сдвиговой деформации локализуется в отделении конгломератов от основной массы, а часть на деформирование нижележащих медных глобул. Захваченный контртелом конгломерат может испытать такое же воздействие со стороны образца и «переместиться» по подобному механизму на его поверхность, или «размазаться» по поверхности контртела. Таким образом, слабое сопротивление на сдвиг достигается не путем легкого скольжения целых слоев со слабой силой связи между слоями, а путем перемещения дискретных

конгломератов, образующихся из материала покрытия в процессе трения, с поверхности образца на контртело и обратно.

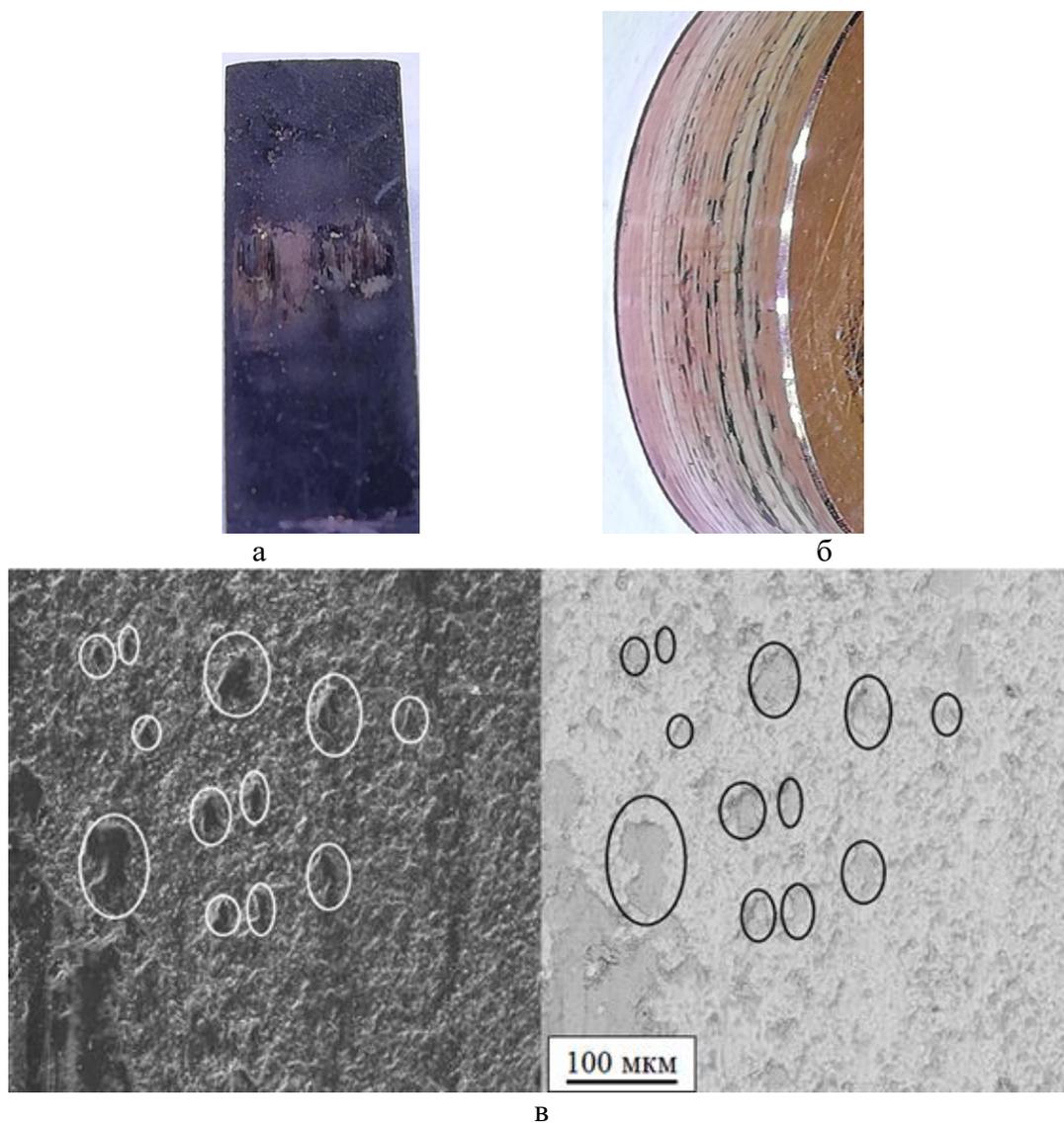


Рисунок 3.7. Фотоснимки поверхности образца с покрытием (а) и контртела (б) и изображение, полученное с помощью РЭМ, поверхности следа износа медного образца с покрытием $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ (в) после 24-часового износа.

3.3 Триботехнические свойства покрытий $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ при испытании в вакууме

Испытания в условиях вакуума проводили на трибостенде (рис. 2.6), который размещался в вакуумной камере, откачиваемой перед испытаниями до давления остаточных газов не более 1×10^{-3} Па. Режимы испытаний были такими же, как при испытаниях в атмосфере аргона. На рис. 3.7 приведена кинетическая

кривая изнашивания медного образца с покрытием $Cu_xMo_yS_z$ при работе в паре с медным контртелом в условиях вакуума (2) в сравнении аналогичной кривой, полученной в атмосфере аргона (1). Обе кривые хорошо аппроксимируются линейными зависимостями. С помощью определения тангенса угла наклона можно оценить скорость износа покрытия при испытаниях в условиях атмосферы аргона и вакуума:

$$\Delta m_{Ar} / \Delta t \approx 0,012 \text{ мг/час} \approx 3,3 \times 10^{-6} \text{ мг/с}, \quad (1)$$

$$\Delta m_{\text{вак}} / \Delta t \approx 0,0065 \text{ мг/час} \approx 1,8 \times 10^{-6} \text{ мг/с}, \quad (2)$$

где Δm_{Ar} и $\Delta m_{\text{вак}}$ – уменьшение массы образца с покрытием $Cu_xMo_yS_z$ при изнашивании в течение интервала времени Δt , соответственно, в атмосфере аргона и вакуума.

Видно, что в вакууме скорость износа покрытия в $\sim 1,8$ раза меньше, чем в аргоне. Это можно объяснить присутствием в аргоне небольшой примеси воздуха, которая, по-видимому, приводит к дополнительному окислительному изнашиванию покрытия.

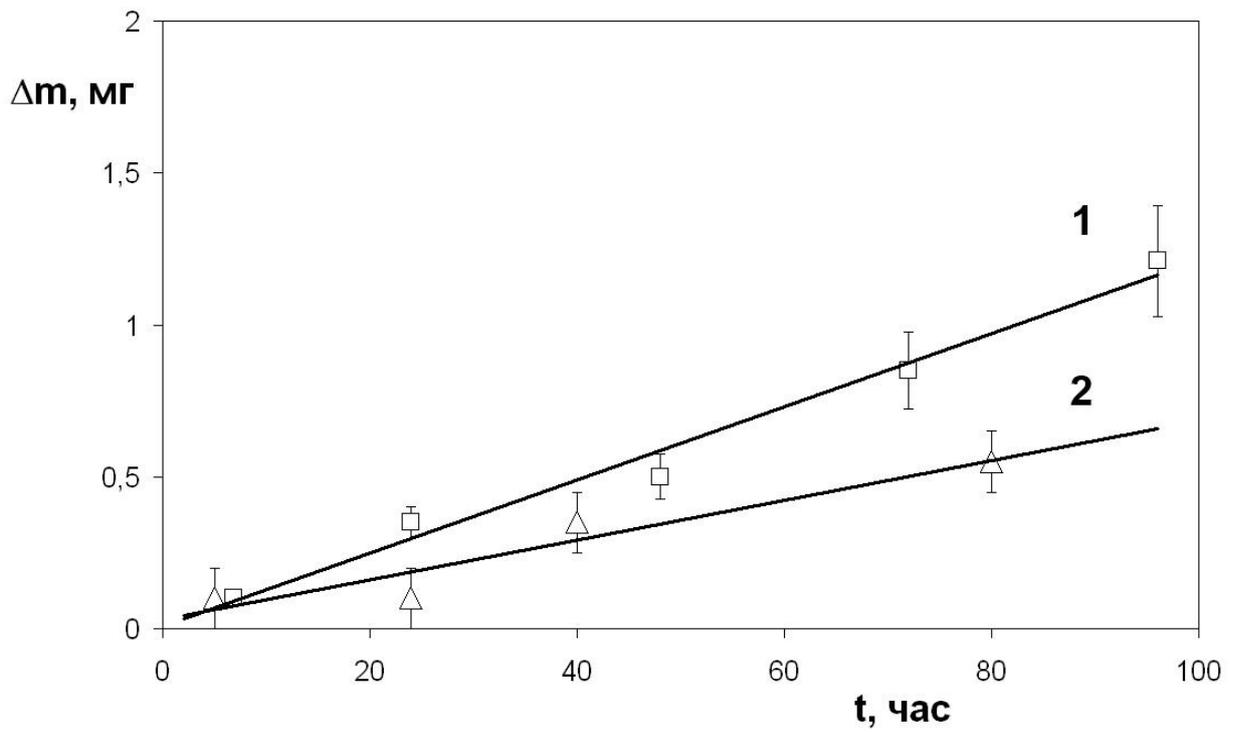


Рисунок 3.7 – Кривая изнашивания медного образца с покрытием $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ при работе в паре с медным контролем в условиях вакуума 1×10^{-3} Па (2) в сравнении аналогичной кривой, полученной в атмосфере аргона (1)

3.4 Электрические характеристики покрытий $Cu_xMo_yS_z$

Для применения покрытий $Cu_xMo_yS_z$ в качестве смазки в скользящих контактах, в частности вращающихся электроконтактных устройств, кроме антифрикционных свойств не менее важна достаточно высокая электропроводность. В таблице 3.1. представлено значение удельного электрического сопротивления этого покрытия, измеренное четырёхзондовым методом, а также справочные данные об удельном сопротивлении чистой меди и дисульфида молибдена. Из таблицы 3.1. видно, что формирование покрытия на основе соединения меди, молибдена и серы значительно повышает его электропроводность по сравнению с электропроводностью дисульфида молибдена, который обладает полупроводниковой проводимостью.

Таблица 3.1. Значения удельного электрического сопротивления покрытия $Cu_xMo_yS_z$ меди [158] и дисульфида молибдена [127].

покрытие $Cu_xMo_yS_z$, Ом·м	Cu, Ом·м	MoS ₂ , Ом·м
$(22,8 \pm 3,1) \cdot 10^{-8}$	$1,78 \cdot 10^{-8}$	8,51

Из представленных электрических характеристик видно, что материал исследованного покрытия $Cu_xMo_yS_z$ обладает металлической проводимостью, отличающейся по величине от проводимости чистой меди в меньшую сторону в ~12 раз, тогда как проводимость дисульфида молибдена меньше проводимости меди в $\sim 5 \times 10^8$ раз.

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

Студенту:

Группа	ФИО
4AM81	Чукареву Богдану Андреевичу

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	Материаловедение
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.01 Машиностроение

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	- стоимость выполняемых работ, материальных ресурсов, согласно применяемой техники и технологии, в соответствии с рыночными ценами по городу Томску; - ресурсы лаборатории упрочнения материалов ИФПМ СО РАН - в работе над проектом задействованы три человека: руководитель, студент-дипломник, ведущий технолог
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ 31532-2012 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	- Система налогообложения, принятая для образовательных учреждений (30,2% отчисления на социальные нужды).

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Анализ потенциальных потребителей, анализ конкурентных технических решений, оценка готовности проекта к коммерциализации
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Определение целей и результатов проекта, организационной структуры проекта
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование плана и графика проекта: - Определение структур работ; - Определение трудоемкости работ; - Разработка диаграммы Ганта. Формирование бюджета затрат научно-технического проекта.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Определение экономической эффективности проекта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	31.01.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рыжакина Татьяна Гавриловна	к.э.н		31.01.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM81	Чукарев Богдан Андреевич		31.01.2020

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

4.1 Предпроектный анализ. Потенциальные потребители исследования

В современном производстве находит широкое применение повышение эксплуатационных характеристик деталей за счет обработки поверхности. Методы нанесения упрочняющих и защитных покрытий позволяют достаточно успешно решать проблемы повышения надежности и увеличения срока службы деталей, работающих в самых разных условиях. Этому способствует широкий спектр материалов, используемых для нанесения покрытий, таких как металлы, сплавы с особыми свойствами, керамики и эмали. А также создание различных композиций на поверхности, т.е. получение покрытий из композиционных материалов.

При упрочнении поверхности без образования покрытия требуемые свойства модифицированной поверхности получают за счет изменения структуры, фазового состояния и химического состава поверхностного слоя деталей. Многолетний опыт показал, что практически нет каких-либо ограничений при выборе дополнительных элементов, вводимых в поверхностный слой (ХТО, диффузионная металлизация, ионная имплантация). Это позволяет либо проводить целенаправленное легирование материала поверхностного слоя, либо формировать в поверхностном слое структурное изменение материала (вводить дефекты кристаллической решетки, обеспечивать выделение второй фазы в т.ч. карбиды, нитриды и т.д.).

В поиске источников финансирования для проведения научного исследования и реализации его результатов, необходима оценка коммерческой ценности работы. При этом разработчики должны представлять реальное состояние и перспективы проводимых ими научных исследований. Помимо улучшения технических параметров по сравнению с предыдущими разработками необходимо оценить научное исследование с точки зрения коммерческой привлекательности для конечного потребителя.

Целью выполнения данного раздела выпускной квалификационной работы является определение перспективности и успешности научно-исследовательского

проекта по влиянию электропроводящего твердосмазочного покрытия на основе Cu–Mo–Si окружающей среды на износ медной пары трения.

Для достижения цели в данном разделе представлены результаты расчётов бюджета научного исследования, оценочная карта сравнения конкурентных технических решений, оценка сравнительной эффективности исследования, рассмотрены различные варианты рисков, связанных с реализацией продукции на потребительском рынке.

Полученные результаты могут быть полезны и использованы в космической отрасли с целью разработки высокоресурсных электроконтактных пар трения для космических спутников типа «Метеор» и других сканеров-зондировщиков, осуществляющих непрерывное зондирование Земли из космоса.

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

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Одним из основных требований, предъявляемых к космическим аппаратам, является обеспечение надежного функционирования и повышение длительности эксплуатации на орбите. Важнейшим конструктивным узлом, определяющим срок службы на орбите сканеров-зондировщиков спутников дистанционного зондирования Земли, является токосъемник, непрерывно вращающийся в процессе эксплуатации и работающий как электроконтактная пара трения [1]. Токосъемник представляет собой контактную пару «металлическая щетка – металлическое контактное кольцо» во вращающихся контактных устройствах, осуществляющих электрическую связь между космическим аппаратом и внешними вращающимися агрегатами типа сканеров-зондировщиков [2]. Для увеличения ресурса токосъемников актуальной является разработка способов повышения износостойкости применяемых для изготовления пар трения конструкционных материалов. Однако в этом случае обязательным условием является не только

сохранение низкого коэффициента трения и высокой износостойкости, но и высоких значений электропроводности.

Трение в условиях космического пространства осложняется бескислородной средой, обуславливающей адгезионное схватывание контактирующих поверхностей, и низкими температурами, обуславливающими невозможность использования жидких смазок. Основным направлением для повышения ресурса работы слаботочных токосъемников в литературных источниках является поиск оптимального состава материала щетки методом порошковой металлургии. В России на сегодняшний день в качестве щеток токосъемников используются серебряные и медные сплавы [3]. Для снижения коэффициента трения и повышения износостойкости в сплавы в процессе плавления добавляют дисульфид молибдена и углерод. Контртела – кольца изготавливают из чистых металлов при содержании основного металла не менее, 9,999 вес.%. Тем не менее, имеющиеся сегодня в промышленности сплавы не могут обеспечить необходимый срок эксплуатации токосъемников для перспективных космических аппаратов, и поиск путей повышения их износостойкости является на сегодня актуальной задачей.

Повысить срок эксплуатации электроконтактной пары трения может поверхностная модификация уже разработанных или разрабатываемых для применения в будущем материалов, однако в литературных источниках представлено мало сообщений об износостойком покрытии, обладающим высокой электропроводностью. За рубежом (NASA, USA, ESA, Europe) для повышения ресурса работы пар трения в космических аппаратах идут по пути разработки износостойких антифрикционных трех- и четырехслойных покрытий типа «хамелеон» на основе композиций типа WC/DLC/WS₂ или ZrYO/Au/DLC/WS₂, имеющих низкий коэффициент трения не только в сухой и влажной атмосфере, но и в вакууме [4-6]. Однако, главное требование, предъявляемое к используемым материалам, помимо высокой износостойкости, является высокая электропроводность. Поэтому указанные выше покрытия типа «хамелеон», которые не являются электропроводными, не могут быть применены в токосъемниках.

Требуется разработка износостойких и электропроводящих покрытий и способов их нанесения.

Для смазывания узлов, работающих в космическом пространстве, традиционно используется дисульфид молибдена, однако применение чистого дисульфида молибдена для смазывания слаботочной электроконтактной пары трения невозможно из-за его высокого удельного электрического сопротивления. Снижение удельного электрического сопротивления дисульфида молибдена представляется возможным путем его легирования медью. Твердая смазка, обладающая с одной стороны металлической проводимостью и смазывающей способностью дисульфида молибдена с другой стороны, может быть перспективной для смазывания узлов электроконтактной пары трения в условиях эксплуатации в открытом космосе.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы является исследование влияния нанесения покрытия на основе Cu-Mo-S и окружающей среды на износ медной пары трения

Целевой рынок – определённая группа людей, которым будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование- это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар(услуга).

Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка

		Потенциальные отрасли использования твердосмазочного покрытия на основе Cu-Mo-S		
		Космическое машиностроение	Авиастроение	Машиностроение
Характеристики	Высокий КПД (малые потери)	+		
	Материалоёмкость (компактность)	+	+	+
	Надёжность, Долговечность	+	+	
	Цена	+	+	+

Как видно из карты сегментирования, основным сегментом данного рынка является космическое машиностроение, где требуются высокая износостойкость и малые потери. Однако помимо космического машиностроения характеристиками данного твердосмазочного покрытия могут пользоваться и другие машиностроительные отрасли.

Проведем конкурентную оценку получения твердосмазочного покрытия на основе Cu-Mo-S (K_{ϕ}) и получение таких покрытий импульсным магнетронным распылением композиционной мишени в атмосфере аргона при давлении 1×10^5 Па (K_{κ}).

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок).

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		B_{ϕ}	B_{κ}	K_{ϕ}	K_{κ}
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности труда Пользователя	0,2	4	3	0,8	0,6
2. Простота технологии получения сплава	0,1	3	2	0,3	0,2
3. Энергоэкономичность	0,2	5	3	0,8	0,6
4. Надежность	0,05	4	4	0,20	0,20

5. Уровень шума	0,05	3	3	0,15	0,15
6. Экологичность материала	0,10	4	3	0,4	0,3
7. Область применения композиционного материала	0,10	3	2	0,3	0,2
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность	0,1	4	2	0,4	0,2
2. Цена	0,05	3	3	0,4	0,45
3. Финансирование научной разработки	0,05	4	2	0,2	0,1
Итого	1	37	27	3,95	3,0

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \times B_i \quad (4.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Получение электропроводящего твердосплавного покрытия на основе Cu-Mo-S при проведении трибологических испытаний на трибомашине в атмосфере аргона при давлении 1×10^5 Па позволяет получить увеличение производительности при значительно более низких затратах, имея значительное преимущество по следующим параметрам:

- Надежное функционирование;
- Повышенная длительность эксплуатации;
- Низкий коэффициент трения;
- Высокое значение электропроводности;
- Высокая износостойкость.

4.2 SWOT-анализ

Одним из эффективных средств сокращения расходов металлов на характер износа и величину износостойкости является применение электропроводящих деталей и механизмов с износостойкими твердосмазочными покрытиями.

Основные преимущества данного проекта - универсальность, высокая производительность и возможность создания оптимальных условий формирования упрочнённых слоев с улучшенными характеристиками, увеличение срока службы деталей и механизмов, эффективное использование оборудования, снижение себестоимости изделия.

Но, не смотря на все преимущества проекта, есть и слабые стороны. На данном этапе не до конца разработаны оптимальные условия нанесения покрытия, исследованы не все технологические параметры процесса комбинированной обработки деталей и механизмов.

Таблица 4.3 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научно исследовательского проекта: С1. Возможность варьировать технологические факторы эксперимента (температуру, давление, легирующие материалы; С2. Высокая производительность; С3. Снижение себестоимости изделия; С4. Увеличение срока службы деталей и механизмов	Слабые стороны научно исследовательского проекта: Сл1. Не отработана до конца технология комбинированной обработки деталей и механизмов; Сл3. Вероятность получения брака
--	---	--

Продолжение таблицы 4.3

<p>Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ и ИФПМ СО РАН (т.е. использование научного оборудования) В2. В связи с непостоянными условиями зарубежного рынка наблюдается тенденция на импортозамещение в данной отрасли В3. Возможность внедрения технологии в производство В4. Участие в грантах В5. Так как группа имеет знания и опыт в данном направлении, то есть возможность расширить номенклатуру обрабатываемых изделий</p>	<p>С1В2-вероятность расширения количества поставщиков (снижение себестоимости изделия) С1В3-улучшение технологии в производство за счет изменения параметров и режимов обработки образцов С2В2- позволяют при наличии спроса быстро нарастить объемы производства С3В2, С4В2-качество и стоимость изделия с упрочненным поверхностным слоем в результате комбинированной обработки, будет являться конкурентоспособным на российском рынке</p>	<p>В1Сл4 – новейшее оборудование, позволит на ранних стадиях исследование, выявить и предотвратить появление брака</p>
<p>Угрозы: У1. Вероятность появления более выгодных предложений на рынке, так как в данном направлении ведется большое количество исследований У3. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе над научной разработкой</p>	<p>С1У1- возможность изменения параметров и режимов комбинированной обработки, что позволит создавать новые и более качественные конкурентоспособные изделия</p>	

Из вышеприведенных примеров мы можем прийти к выводу, что исследуемый научный проект имеет множество сильных сторон, которые считаются наиважнейшим для его выполнения. На данном этапе старт продукции на рынке

сложно предугадать. Велика вероятность слабого старта продукции на потребительском рынке из-за низкого спроса. Однако при наличии хорошего спроса можно быстро нарастить объёмы продукции.

Возможно, продукция будет долго захватывать рынок потребителей, однако с большой вероятностью можно заявить, что рано или поздно данные электропроводящие твердосмазочные покрытия завоюют целевой рынок особенно в сферах в которых необходимы высокие износостойкость, надёжность, малые потери и высокий уровень электропроводимости.

4.3 Инициация проекта

4.3.1 Цели и результаты проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

В получении результата заинтересованы следующие стороны, представленные в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Университет	Наличие НИОКР
Магистрант	Защита магистерской диссертации с присвоением степени магистра.
Потребители	Низкая стоимость изделий по сравнению, с изделиями полученными стандартными методами. Качество покрытий
Государство	Возможность импортозамещения

В таблице 4.5 представлена информация о иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 4.5 – Цели и результаты проекта.

<p>Цели проекта:</p>	<p>4. Исследовать закономерности ионно-магнетронного формирования покрытий на основе системы Cu–Mo–S, их химический состав, структуру и электропроводность.</p> <p>5. Исследовать закономерности изнашивания медных образцов без покрытия и с покрытием на основе системы Cu–Mo–S при работе в паре с медным контртелом в атмосфере аргона при давлении 1×10^5 Па и в вакууме при давлении остаточных газов, не превышающих 5×10^{-3} Па.</p> <p>6. Изучить влияние толщины и состава покрытия на износостойкость медной пары трения.</p>
<p>Ожидаемые результаты проекта:</p>	<p>Получение высокоресурсных электроконтактных пар трения с необходимым покрытием для космических спутников типа «Метеор» и других сканеров-зондировщиков, осуществляющих непрерывное зондирование Земли из космоса.</p>
<p>Критерии приемки результата проекта:</p>	<p>Законченная научно-исследовательская работа, авторы которой имеют список публикаций и участие на международных конференциях.</p>
<p>Требования к результату проекта:</p>	<p>Требование:</p>
	<p>Результат проекта должен иметь актуальное теоретическое и практическое значение</p> <p>Выполнение проекта произведено в срок</p>

4.3.2 Организационная структура проекта

На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте.

Таблица 3.6 – Рабочая группа проекта

ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, час.
Сергеев Виктор Петрович	Заказчик проекта	Укрупненный анализ проектов по показателям сроков, освоению затрат и финансированию	-
Сергеев Виктор Петрович	Руководитель проекта	отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта	1024
Чукарев Богдан Андреевич	Исполнитель по проекту	выполняет отдельные работы по проекту	1624
Сунгатулин Альфред Рашидович	Инженер-технолог	Отвечает за работу оборудования, выполняет технологические работы	224

4.3.3 Ограничения и допущения проекта

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

Таблица 4.7 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
Бюджет проекта	5 482 132,9 рублей
Источник финансирования	ИФПМ СО РАН
Сроки проекта:	
Дата утверждения плана управления Проектом	11.12.2018
Дата завершения проекта	20.05.2020

4.4 Планирование управления научно-техническим проектом

4.4.1 Иерархическая структура работ проекта

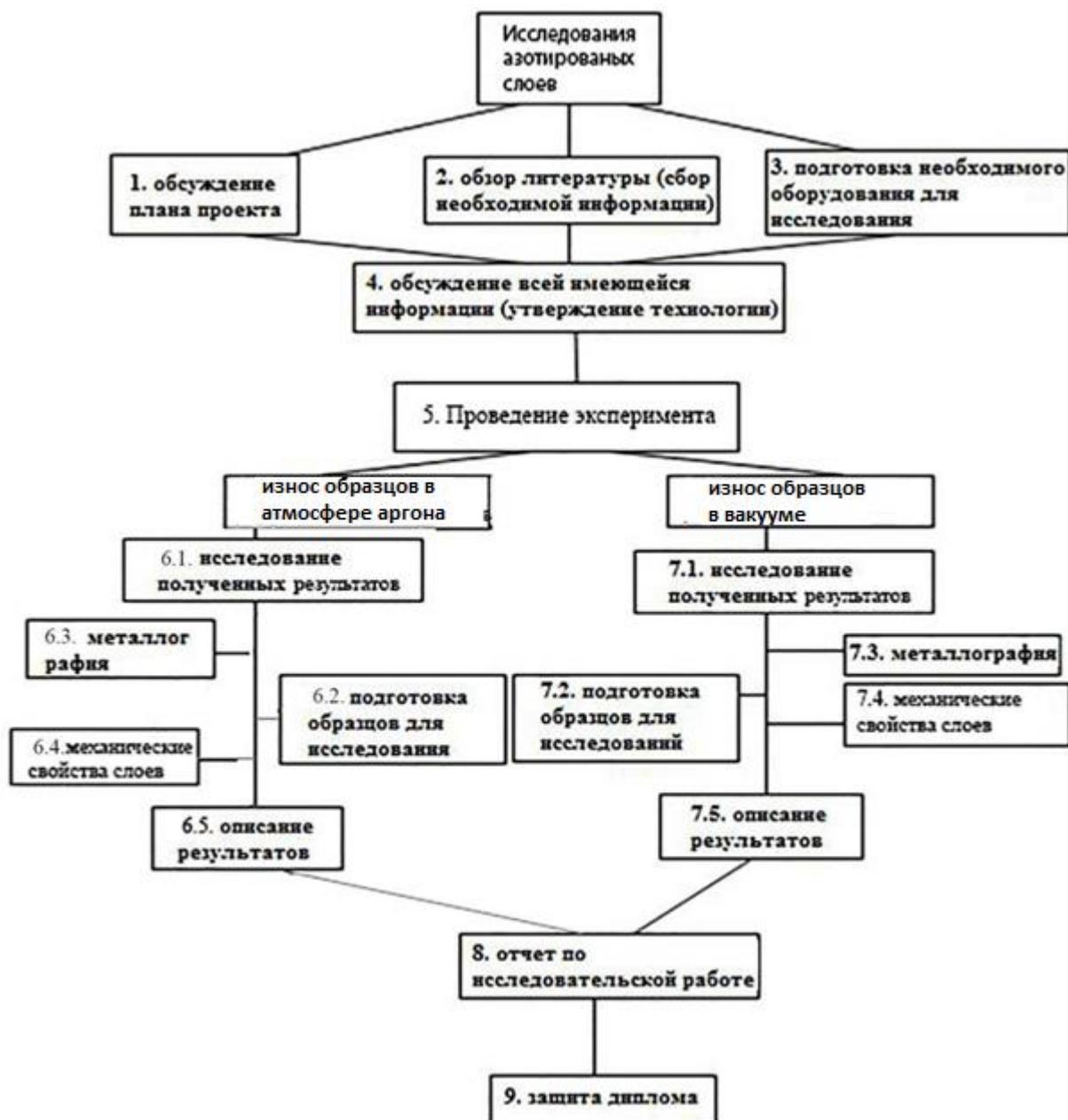


Рисунок 4.1 – Иерархическая структура работ проекта

4.4.2 Контрольные события проекта

Таблица 4.8 – Контрольные события проекта

Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
Обсуждение плана проекта	11.12.18	Утверждение участников Исследования
Обзор литературы (сбор необходимой информации)	12.03.19	Отчет по изученной литературе.
Получение напыленных образцов (медь М1)	17.09.19	Обработанные образцы
Исследование полученных материалов	22.10.19	Исследуемые образцы, иллюстрации (графики, картинки)
Описание результатов	26.11.19	Отчет
Получение покрытий материалов	17.12.19	Обработанные образцы
Исследование	14.01.20	Исследуемые образцы, иллюстрации (графики, картинки)
Описание результатов	10.03.20	Отчет
Отчет по исследовательской Работе	21.04.20	Отчет
Защита диплома	22.06.20	Диплом

4.5 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится последующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- основное оборудование;
- заработная плата;
- отчисления во внебюджетные фонды
- расходы на электроэнергию (без освещения);

- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

4.5.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены).

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Медь (Лист 6,0x600x1500 М1Т)		1 кг	600	600
Катод		1 шт.		400
Титановый катод		1 шт.		600
Баллон аргона		20 л		750
Баллон азота		20 л		460
Алмазная паста		3	1200	3600
Наждачная бумага		20	45	900
Всего за материалы				7310

Продолжение таблицы 4.9

Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)	293
Итого	7603

Таблица 4.9 – расчет сырья, материалов, комплектующих изделий и покупных полуфабрикатов

4.5.2 Расчет затрат на оборудование

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме.

Таблица 4.10 - Список оборудования для исследования

№ п/п	Наименование оборудования	Количество, шт	Стоимость
1	Вакуумная камера установки магнетронного осаждения покрытий УВН-015МД КВАНТ	1	1 300 000
2	Насос ДВН-50 (для создания низковакуумной откачки)	1	120 000
3	Насос 2НВР-5ДМ (для создания низковакуумной откачки)	1	39 000
4	Диффузионный паромасляной насос НВДМ-250 (для создания высоковакуумной откачки)	1	114 480
5	Аналитические весы ВЛР-200	1	36 000
6	Машина 2070СМТ-1	1	500 000
7	Электронный микроскоп LEO EVO 0XVP	1	2 800 000
8	Персональный компьютер	1	55 000
Итого:		4	964 480

4.5.3 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера (в его роли выступает исполнитель проекта), а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Таблица 4.11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель	Инженер-технолог
Календарное число дней	202	330	63
Количество нерабочих дней			
- выходные дни	50	80	10
- праздничные дни	5	8	1
Потери рабочего времени			
- отпуск	24	24	24
- невыходы по болезни	-	15	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	128	203	28

Расчет затрат на полную заработную плату приведен в таблице 3.12. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{ПР} = 1,1$; $K_{доп.ЗП} = 1,113$ (при пятидневной рабочей неделе); $K_r = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент $K_{и} = 1,1 * 1,113 * 1,3 = 1,62$.

Таблица 4.12 – Расчет затрат на полную заработную плату

Исполнители	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
Руководитель	33600	2940	128	1,62	172260
Исполнитель	9800	540	203	1,62	116400
Инженер- технолог	26300	1460	28	1,62	66270
ИТОГО:					354930

4.5.4 Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 \times 354930 = 106479 \text{ руб.}$$

где 0.3 – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

4.5.5 Расчет затрат на электроэнергию

Затраты на электроэнергию, потраченную по ходу работы рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = \text{Роб} \cdot t_{\text{об}} \cdot \text{ЦЭ}$$

Таблица 4.13 - Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования <i>t</i> ОБ, час	Потребляемая мощность <i>P</i> ОБ, кВт	Затраты ЭОБ, руб.
Насос ДВН-50 (для сознания откачки низковакуумной)	9,6	1,5	84,5
Вакуумная камера установки магнетронного осаждения покрытий УВН-015МД КВАНТ	10,9	18	1158,8
Насос 2НВР-5ДМ (для сознания откачки низковакуумной)	6,8	3,2	128,8
Диффузионный паромасляной насос НВДМ-250 (для сознания откачки высоковакуумной)	7,8	0,1	4,42
Аналитические весы ВЛР-200	7,7	0,1	4,41
Машина 2070СМТ-1	8,0	1,6	73,58
Электронный микроскоп LEO EVO 0XVP	8,5	1,4	68,4
Персональный компьютер	34	0,3	58,63
ИТОГО:			1581,54

4.5.6 Расчет прочих расходов

В пункте «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих пунктах, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$\text{Спроч.}=(7603+354930+106479+1581,54) \times 0,1 = 47\,059,35 \text{ руб.}$$

4.5.7 Расчет общей себестоимости затрат разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Влияние покрытия на основе Cu-Mo-S и окружающей среды на износ медной пары трения».

Таблица 4.14 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	Смат	7 603
Основная заработная плата	Сзп	354 930
Отчисления в социальные фонды	Ссоц	106 479
Расходы на электроэнергию	Сэл	1 581,54
Прочие расходы	Спроч	47 059,35
Оборудование	Соб	4 964 480
Итого:		5482132,9

Таким образом, общая себестоимость НИР равняется = **5 482 132,9** руб.

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

4.6.1 Оценка абсолютной эффективности исследования

Расчёт NPV осуществляется по следующей формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{ont}}{(1+i)^t} - I_0$$

где: $ЧДП_{ont}$ – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

I_0 – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

t – номер шага расчета ($t= 0, 1, 2 \dots n$)

n – горизонт расчета;

i – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Таблица 4.16 - Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Выручка от реализации, руб.	0	6 600 000	6 600 000	6 600 000	6 600 000
2	Итого приток, руб.	0	6 600 000	6 600 000	6 600 000	6 600 000
3	Инвестиционные издержки, руб.	-5 500 000	0	0	0	0
4	Операционные затраты, руб.	0	872 582,89	872 582,89	872 582,89	872 582,89
5	Налогооблагаемая прибыль	0	5 727 417,11	5 727 417,11	5 727 417,11	5 727 417,11
6	Налоги 20 %, руб.	0	1 145 483,42	1 145 483,42	1 145 483,42	1 145 483,42
7	Итого отток, руб.	-5 500 000	2 018 066,31	2 018 066,31	2 018 066,31	2 018 066,31
8	Чистая прибыль, руб.	0	4 581 933,69	4 581 933,69	4 581 933,69	4 581 933,69
9	Чистый денежный поток (ЧДП), руб.	-5 500 000	5 078 381,69	5 078 381,69	5 078 381,69	5 078 381,69
10	Коэффициент дисконтирования (КД)	1	0,833333	0,694444	0,578704	0,482253
11	Чистый дисконтированный доход (ЧДД), руб.	-5 500 000	4 231 983,05	3 526 651,69	2 938 879,80	2 449 064,81
12	\sum ЧДД		13 146 579,35			
12	Итого NPV, руб.		7 646 479,35			

Коэффициент дисконтирования рассчитан по формуле:

$$КД = \frac{1}{(1 + i)^t}$$

где: i – ставка дисконтирования, 20 %;

t – шаг расчета.

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 7 646 479,35 млн. рублей, что позволяет судить об его эффективности.

Индекс доходности (PI) – показатель эффективности инвестиции, представляющий собой отношение дисконтированных доходов к размеру инвестиционного капитала. Данный показатель позволяет определить инвестиционную эффективность вложений в данный проект. Индекс доходности рассчитывается по формуле:

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_t}{(1+i)^t} / I_0$$

где: ЧДД - чистый денежный поток, млн. руб.;

I_0 – начальный инвестиционный капитал, млн. руб.

$$PI = 13\,146\,579,35 / 5\,500\,000 = 2,4$$

Так как $PI > 1$, то проект является эффективным

Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или IRR. Формальное определение «внутренней ставки доходности» заключается в том, что это та ставка дисконтирования, при которой суммы дисконтированных притоков денежных средств равны сумме дисконтированных оттоков или $NPV = 0$. По разности между IRR и ставкой дисконтирования i можно судить о запасе экономической прочности инвестиционного проекта. Чем ближе IRR к ставке дисконтирования i , тем больше риск от инвестирования в данный проект.

$$\sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{опt}}{(1+IRR)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{I_t}{(1+IRR)^t}$$

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования (i) существует обратная зависимость. Эта зависимость представлена в таблице 3.17 и на рисунке 3.

Таблица 4.17 - Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№	Наименование показателя	0	1	2	3	4	NPV, млн. руб.
1	Чистые денежные потоки, млн. руб.	-5500000	5078381,69	5078381,69	5078381,69	5078381,69	
2	Коэффициент дисконтирования						
	0,1	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	0,2	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	0,3	1	0,769	0,592	0,455	0,350	
	0,4	1	0,714	0,510	0,364	0,260	
	0,5	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	0,6	1	0,625	0,390	0,244	0,153	
	0,7	1	0,588	0,335	0,203	0,112	
	0,8	1	0,556	0,309	0,171	0,095	
	0,9	1	0,526	0,277	0,146	0,077	
	1	1	0,500	0,250	0,125	0,062	
3	Дисконтированный денежный доход, млн. руб.						
	0,1	-5500000	4616248,96	4194743,28	3813864,65	3468534,69	10593391,58
	0,2	-5500000	4230291,95	3524396,89	2935304,62	2447779,97	7637773,43
	0,3	-5500000	3905275,52	3006401,96	2310663,67	1777433,59	5499774,74
	0,4	-5500000	3625964,53	2589974,66	1848530,93	1320379,24	3884849,36
	0,5	-5500000	3387280,59	2254801,47	1498122,60	1005519,57	2645724,23
	0,6	-5500000	3173988,56	1980568,86	1239125,13	776992,40	1670674,95
	0,7	-5500000	2986088,43	1701257,87	1030911,48	568778,75	787036,53
	0,8	-5500000	2823580,22	1569219,94	868403,27	482474,76	243649,69
	0,9	-5500000	2671228,77	1406711,73	741487,53	391035,39	-289580,39
	1,0	-5500000	2539190,85	1269595,42	634797,71	314859,66	-741556,36

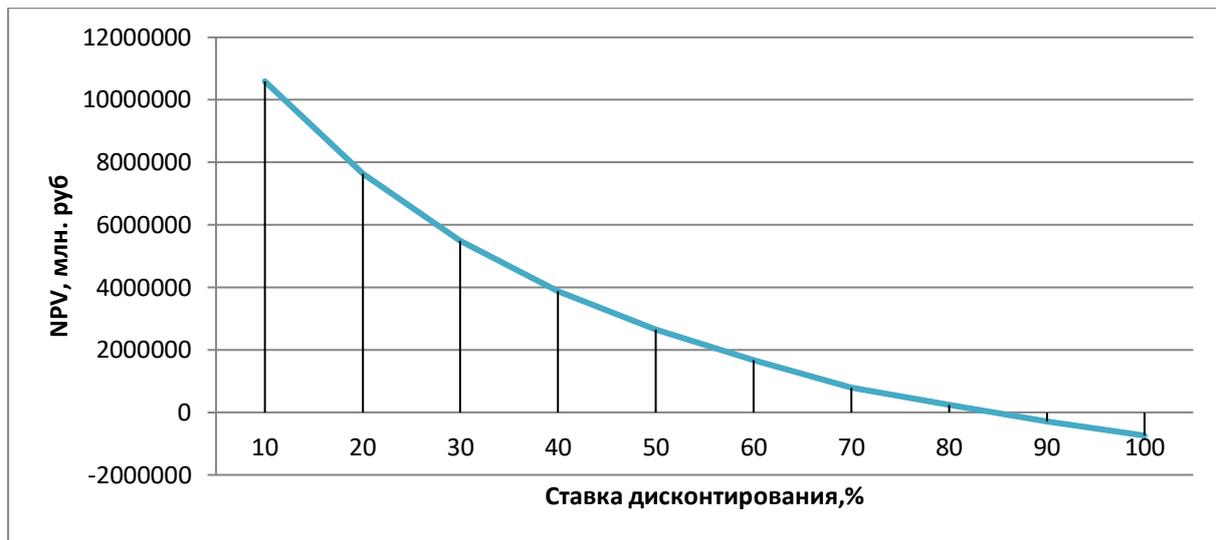


Рисунок 3 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,81.

Запас экономической прочности проекта: $81\% - 20\% = 61\%$

Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разной ценности денег во времени.

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости. То есть это время, за которое денежные средства должны совершить оборот.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (таблица 4.18).

Таблица 4.18 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Дисконтированный денежный доход ($i = 0,20$), млн. руб.	-5500000	4231983,05	3526615,69	2938879,80	2449064,81

2	То же нарастающим итогом, млн. руб.	-5 500 000	-1268016,95	2258598,74	5137478,54	7646543,35
3	Дисконтированный срок окупаемости	$PP_{диск} = 1 + (126801,95 / 3526615,69) = 1,04$ года				

Социальная эффективность научного проекта (таблица 3.19) учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населения или групп лиц, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты.

Таблица 4.19 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Короткий срок эксплуатации контактной пары	Значительное увеличение срока эксплуатации контактной пары при нанесение покрытия на основе Cu-Mo-S
Небольшая электропроводимость контактной пары трения	Повышение электропроводимости контактной пары трения при нанесение покрытия на основе Cu-Mo-S

4.6.2. Оценка сравнительной эффективности исследования

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по следующей формуле:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$$

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

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

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

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

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы (таблице 4.20).

	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
Способствует росту производительности труда пользователя	0,2	3	4
Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям)	0,1	4	4

потребителей)			
Помехоустойчивость	0,1	4	3
Энергосбережение	0,2	5	3
Надежность	0,2	4	3
Материалоемкость	0,2	4	4
ИТОГО:	1	4,4	3,5

$$I_{\text{ТП}} = 0,2 \times 5 + 0,1 \times 4 + 0,1 \times 4 + 0,2 \times 5 + 0,2 \times 4 + 0,2 \times 4 = 4,4;$$

$$I_{\text{Аналог}} = 0,2 \times 4 + 0,1 \times 4 + 0,1 \times 3 + 0,2 \times 3 + 0,2 \times 3 + 0,2 \times 4 = 3,5.$$

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

$$I_{\text{фин}}^p = I_m^p / I_{\text{ф}}^p; \quad I_{\text{фин}}^a = I_m^a / I_{\text{ф}}^a.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналога позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = I_{\text{фин}}^p / I_{\text{фин}}^a.$$

№ п/п	Показатели	Аналог	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель	1,14	0,92
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	3,5	4,4
3	Интегральный показатель эффективности	4,69	4,77
4	Сравнительная эффективность исполнения	1,01	1,26

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разы, т.к. значение меньше единицы, но больше нуля.

При сравнении значений интегральных показателей эффективности разработки и аналога, можно сказать, что более эффективным решением является получение электроконтактных пар трения путем нанесения покрытия на основе Cu-Mo-S.

4.7 Заключение по разделу

Описан целевой рынок, то есть кто является конечным потребителем продукта или, кто может стать им в будущем.

На основе метода SWOT – анализа можно сказать, что получение новых поверхностей с применением покрытий на основе Cu-Mo-S, а также повышение и улучшение свойств поверхностей изделий обеспечит актуальность этой темы на протяжении многих лет.

Рационально спланирована занятость каждого из участников и сроки проведения отдельных работ для организации процесса реализации исследовательской работы.

Вычислены полные денежные затраты на исследовательскую работу. В состав затрат на создание проекта включались величины всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание исследования. В итоге, общая себестоимость НИР по всем статьям затрат **5 482 132,9 руб.**

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4AM81	Чукареву Богдану Андреевичу

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	Материаловедение
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.01 «Машиностроение»

Тема ВКР:

Влияние покрытия на основе Si-Mo-S и окружающей среды на износ медной пары трения	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения.	<p><i>Объектом исследования являются электропроводящего твердосмазочного покрытия на основе Si-Mo-S.</i></p> <p><i>Исследование проводилось на базе лаборатории материаловедения покрытий и нанотехнологий ИФПМ СО РАН. Область применения: нанесение покрытий, упрочнение материала, материаловедение.</i></p>
<i>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</i>	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ; – Положение об организации работы по охране труда в ИФПМ СО РАН [Текст]. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2018. – 18с; – Требования к рабочим местам при выполнении работ в положении сидя устанавливаются в соответствии с ГОСТ 12.2.032-78; – Оптимальные параметры микроклимата на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ должны обеспечиваться в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03; – средства пожаротушения предусматриваются согласно требованиям противопожарной безопасности по СнИП 2.01.02. -85;

	– <i>Использование электрических приборов осуществляются в соответствии с ГОСТ Р 52084-2003.</i>
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	1. <i>Превышение уровня шума</i> 2. <i>Вредные вещества</i> 3. <i>Отклонение показателей микроклимата</i> 4. <i>Отсутствие или недостаток естественного света. Недостаточная освещенность рабочей зоны</i> 5. <i>Опасность поражения электрическим током</i>
3. Экологическая безопасность:	– <i>Воздействие на атмосферу в связи с использованием большого количества химикатов, взрывоопасностью и пожароопасностью некоторых материалов и газов;</i> – <i>Влияние на гидросферу посредством слива промывочных и сточных вод с содержанием ионов тяжелых металлов, кислот, щелочей, твердых высокотоксичных отходов в общую систему канализации..</i>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<i>Возможные чрезвычайные ситуации при выполнении проекта являются: поражение электрическим током, короткое замыкание электрической цепи, и как следствие, пожар. Для предотвращения ЧС необходимым является осуществление меры по технике безопасности на рабочем месте.</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Сечин Александр Иванович	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM81	Чукарев Богдан Андреевич		

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

В данном разделе дипломной работы рассмотрены вопросы по охране труда и окружающей среды. Работа была проведена в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН в лаборатории материаловедения покрытий и нанотехнологий.

Вопросы производственной и экологической безопасности рассматриваются на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований структуры, механических и трибологических свойств нанесенных электропроводящих твердосмазочных покрытий на основе Cu-Mo-S . Все исследования, связанные с данной работой, производились на базе НИ ТПУ. В ходе экспериментальных исследований использовалась вакуумная установка УВН-015 МД КВАНТ. Полученные результаты эксперимента обрабатывались на ПК.

Производственная среда, организация рабочего места должны соответствовать общепринятым и специальным требованиям техники безопасности, эргономики, экологической и пожарной санитарии.

Анализ условий труда на рабочем месте

Рабочее место располагается на 1 этаже корпуса ИФПМ СО РАН, помещение представляет собой комнату размером длиной 8 м на 6 м, высотой 3,5 м, 2 окнами, выходящими на север и восток. В помещении находится 2 технологического оборудования.

Работа производилась на вакуумной установке УВН-015 МД КВАНТ, при работе на котором существует ряд вредных и опасных производственных факторов. Использование в работе разных жидкостей (эфир, спирт, бензол и т.д.) также приводит к возникновению ряда вредных и опасных факторов.

Вредные производственные факторы в соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015:

- повышенный уровень вибрации;
- недостаточная освещенность рабочей зоны, наличие прямой и отраженной блескости, повышенная пульсация светового потока;
- пониженная влажность воздуха;
- абразивная пыль, мелкая стружка и аэрозоли смазочно-охлаждающей жидкости;
- высокий уровень электромагнитных излучений;
- статическое положение тела в течение длительного времени;
- монотонность работы.

Опасные производственные факторы в соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015:

- электрический ток
- короткое замыкание
- движущиеся машины и механизмы, передвигающиеся изделия, заготовки и материалы
- высокая температура поверхности обрабатываемых деталей и инструмента

Анализ показателей шума и вибрации

Предельно допустимый уровень (ПДУ) шума – это уровень фактора, который при ежедневной (кроме выходных дней) работе, но не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа, не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений. Соблюдение ПДУ шума не исключает нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц.

Допустимый уровень шума ограничен ГОСТ 12.1.003-83 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002. Максимальный уровень звука постоянного шума на рабочих местах не должно превышать 80 дБА. Уровень шума в лаборатории

составляет не более 30 дБА (данные взяты из технического паспорта к вакуумной установки -015 МД КВАНТ), что не превышает нормативных показателей.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть СКЗ и СИЗ.

СКЗ:

1. устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
2. изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения;
3. применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения.

СИЗ:

1. применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

Анализ показателей микроклимата

Микроклимат производственных помещений – это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температуры окружающих поверхностей. Оптимальные микроклиматические условия обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены, не вызывают отклонений в состоянии здоровья и создают предпосылки для высокой работоспособности.

Состояние микроклимата должно соответствовать допустимым нормам по ГОСТ 12.1.005-88.

Параметры микроклимата лаборатории следующие: категория работы – легкая 2а; в холодный период температура воздуха в помещении составляет 21–23°C, влажность воздуха 38–56 %, скорость движения воздуха – до 0,1 м/с. В теплый период температура воздуха в помещении составляет 22–25°C, влажность воздуха 42–62 %, скорость движения воздуха – до 0,2 м/с

Реальные параметры микроклимата соответствуют допустимым значениям СанПиН 2.2.4.548-96 для данного вида работ.

Для создания оптимальных параметров микроклимата в лаборатории, необходима установка в кабинете системы кондиционирования воздуха, которая обеспечит поддержание параметров микроклимата в необходимых пределах и обеспечит очистку воздуха от пыли. Для повышения температуры до необходимой нормы в холодное время года необходимо произвести очистку системы искусственного отопления для улучшения скорости теплообмена.

Анализ освещенности рабочей зоны

Создание комфортных световых условий труда улучшает условия зрительной работы, снижает утомляемость, способствует повышению производительности труда, благотворно влияет на производственную среду, оказывая положительное психологическое воздействие на работающего, повышает безопасность труда и снижает травматизм.

Недостаточность освещения приводит к напряжению зрения, ослабляет внимание, приводит к наступлению преждевременной утомленности. Неправильное направление света на рабочем месте может создавать резкие тени, блики, дезориентировать работающего.

В данном рабочем помещении используется смешанное освещение. Естественное освещение осуществляется через окно в наружной стене здания. В качестве искусственного освещения используется система общего освещения (освещение, светильники которого освещают всю площадь помещения). Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 лк. В данной работе использовались «Общие санитарно-гигиенические требования к показателям микроклимата рабочей зоны, который устанавливает стандарт СанПиН 2.2.4.3359–16».

Для организации такого освещения лучше выбрать люминесцентные лампы, так как они имеют ряд преимуществ перед лампами накаливания: их спектр ближе к естественному освещению; они имеют большую экономичность

(больше светоотдача) и срок службы (в 10–12 раз больше чем лампы накаливания). Для данного помещения, в котором будет эксплуатироваться информационная система, люминесцентные лампы подходят.

В настоящее время в лаборатории используются светильники ШОД (люминесцентный светильник, соответствующий широкому типу кривой силы света, относящийся классу отраженного света светильника по светораспределению).

Нормами для данных работ установлена необходимая освещенность рабочего места $E=300$ лк (так как работа очень высоко точности – наименьший размер объекта различия равен 0,15–0,3 мм разряд зрительной работы – Г, фон – светлый, контраст объекта с фоном – большой).

Произведем расчет освещения.

Помещение имеет площадь 48 м^2 , ширина составляет 6 м, длина – 8 м, высота – 3,5 м. Воспользуемся методом светового потока. В помещении лаборатории используются люминесцентные лампы ШОД, использование которых допускается при умеренной влажности и запыленности.

Величина освещенности корректируется с учетом коэффициента запаса, т.к. со временем за счет загрязнения светильников и уменьшения светового потока ламп снижается освещенность. Значение коэффициента запаса, выбираемого для помещения с малым выделением пыли, при люминесцентных лампах $KЗ = 1,5$.

Расположение светильников должно соответствовать двум критериям:

- обеспечение высокого качества освещения, ограничение ослепленности и необходимой направленности света на рабочие места.

- наиболее экономичное создание нормированной освещенности.

Расположим светильники параллельно стенам. Расстояние между светильниками рассчитаем по формуле:

$$\lambda=L/h ;$$

(5.1)

где L - расстояние между светильниками, м;

h - высота подвеса светильника над рабочей поверхностью, м.

Находим $\lambda = 1,2$ (при $h = 2,5$ м)

Отсюда следует, что $L = \lambda \cdot h = 1,2 \cdot 2,5 = 3$ (м).

Расстояние от стен помещения до крайних светильников $1/3L$.

Изобразим в соответствие с исходными данными план помещения, укажем на нем расположение светильников и определим их число.

Воспользуемся методом коэффициента использования светового потока. С его помощью можно рассчитать, как световой поток ламп, необходимый для создания заданной освещенности горизонтальной поверхности с учетом света, отраженного стенами и потолком, так и освещенность при известном потоке.

Для определения количества светильников определим световой поток, падающий на поверхность по формуле:

$$F = \frac{E \times K \times S \times Z}{\eta \times n}; \quad (5.2)$$

где, F - рассчитываемый световой поток, лм;

E - нормированная минимальная освещенность, лк (определяется по таблице). Работу специалиста, в соответствии с этой таблицей, можно отнести к разряду точных работ, следовательно, минимальная освещенность будет $E = 400$ лк;

S - площадь освещаемого помещения (в нашем случае $S = 48 \text{ м}^2$);

Z - отношение средней освещенности к минимальной (обычно принимается равным 1,1-1,2, пусть $Z = 1,1$);

K - коэффициент запаса, учитывающий уменьшение светового потока лампы в результате загрязнения светильников в процессе эксплуатации (его значение зависит от типа помещения и характера проводимых в нем работ и в нашем случае $K = 1,5$);

η - коэффициент использования, (выражается отношением светового потока, падающего на расчетную поверхность, к суммарному потоку всех ламп и исчисляется в долях единицы; зависит от характеристик светильника, размеров помещения, окраски стен и потолка, характеризуемых коэффициентами

отражения от стен (РС) и потолка (РП)). Их оценивают субъективно и определяют по таблице. Так, для свежепобеленного потолка и со свежепобеленными окнами без штор РС = 50% и РП = 70% соответственно.

Значение η определим по таблице коэффициентов использования различных светильников. Для этого вычислим индекс помещения по формуле:

$$I = \frac{S}{h \times (A+B)}; \quad (5.3)$$

Где, S - площадь помещения, S = 48 м²;

h - расчетная высота подвеса, h = 2,5 м;

A - ширина помещения, A = 6 м;

B - длина помещения, B = 8 м.

Подставив значения получим:

$$I = \frac{48}{2,5 \times (6 + 8)} = 1,37;$$

Зная индекс помещения I, по таблице находим $\eta = 0,6$

При выборе осветительных приборов используем светильники типа ОД. Каждый светильник комплектуется двумя лампами.

Размещаем светильники в два ряда. В каждом ряду можно установить 3 светильника типа ОДР. Длина одного светильника 1 м., ширина 0,5 м. При этом разрывы между светильниками в ряду составят 50 см. Изображаем в масштабе схему размещения на нем светильников (рисунок 5.1).

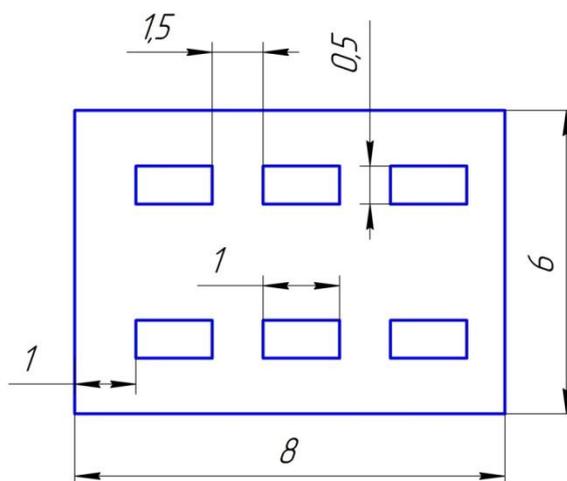


Рисунок 5.1 Схема расположения светильников

Подставим все значения в формулу для определения светового потока F:

$$F = \frac{400 \times 1,5 \times 48 \times 1,1}{0,6 \times 12} = 4400 \text{ (лм)}$$

В соответствии со световым потоком выбираем стандартную лампу – ЛБ - 80-4 с потоком 4960 лм.

Таким образом, система освещения лаборатории соответствует нормам.

Анализ электробезопасности

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статистического электричества. Лаборатория относится к классу электроопасности - помещению с повышенной опасностью, которая характеризуется наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность: сырость, токопроводящая пыль, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.), высокая температура, возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям, технологическим аппаратам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой. Вакуумная установка работает от трехфазной сети напряжением 380 В.

В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены.

Недоступность достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений (кожухов, крышек, сеток и т.д.), расположения токоведущих частей на недоступной высоте. Станки и оборудование оснащены заземлителями. Защитное заземление или зануление должно обеспечивать защиту людей от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим

нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции. $R_{зиз} < 4 \text{ Ом}$. А также должно быть соблюдено безопасное напряжение и безопасная величина тока для человека: $U = 36 \text{ В}$; $I = 0,1 \text{ А}$.

Средствами индивидуальной защиты от поражения электрическим током являются инструменты с ручками из изолирующего материала, специальные перчатки и обувь, а также дорожки и коврики.

Экологическая безопасность

Охрана окружающей среды – это комплексная проблема и наиболее активная форма её решения – это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства. Охрану природы можно представить как комплекс государственных, международных и общественных мероприятий, направленных на рациональное использование природы, восстановление, улучшение и охрану природных ресурсов.

Технический прогресс постоянно увеличивает возможности воздействия на окружающую среду и создает предпосылки для возникновения экологических кризисов. Поэтому в настоящее время вопросы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов имеют первостепенное значение.

Технологические процессы, осуществлявшиеся при написании, магистерской работы не представляют опасности для экологической обстановки, поскольку отсутствует использование токсичных материалов. Все операции являются сугубо механическими, без выделения вредных газов и веществ, однако, подложки, которые имеют дефекты, то есть не пригодные для дальнейшей работы, отправляются на переплавку. Утилизация отработанных картриджей, бумаги, кабелей начинается с их сбора и последующей транспортировкой на предприятия, которые занимаются их утилизацией.

Безопасность в чрезвычайных ситуациях

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

Производственное помещение находится в городе Томск с резко-континентальным климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т.д.) в данном городе отсутствуют. Возможными ЧС могут быть: природного характера – сильные морозы, техногенного характера – шпионаж, диверсия.

Критически низкие температуры могут привести к авариям систем теплоснабжения и жизнеобеспечения, приостановке работы, обморожениям и даже жертвам среди населения. В случае заморозки труб в помещении предусмотрены запасные электрообогреватели. Электропитание для обогревателей обеспечивает генератор. Данное оборудование хранится на складе и их техническое состояние постоянно проверяется.

ЧС, возникающие в результате диверсий, возникают все чаще. Зачастую такие угрозы оказываются ложными, однако, работы в данном случае все равно прекращаются. Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположений помещений и оборудования в помещениях, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица обязаны раз в полгода проводить тренировки по отработке действий на случай ЧС.

Пожарная безопасность

Пожарная безопасность предусматривает обеспечение безопасности людей и сохранения материальных ценностей предприятия на всех стадиях его жизненного цикла. Основными системами пожарной безопасности являются системы предотвращения пожара и противопожарной защиты, включая организационно-технические мероприятия.

Пожарная профилактика – комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращение пожара, ограничение его распространения, а также на создание условий для успешного тушения пожара. Успех борьбы с пожаром во многом зависит от его своевременного обнаружения и быстрого принятия мер по его ограничению и ликвидации.

Помещение, в котором осуществляется процесс изготовления изделия, по взрывопожарной и пожарной опасности относится к категории ВЗ.

Среди организационных и технических мероприятий, осуществляемых для устранения возможности пожара, выделяют следующие меры:

- использование только исправного оборудования;
- проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- назначение ответственного за пожарную безопасность помещения;
- отключение электрооборудования, освещения и электропитания по окончании работ;
- содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Согласно требованиям ГОСТ Р 12.3.047-2012 в помещении находятся два огнетушителя марки ОП-5, а также силовой щит, который позволяет обесточить помещение. Огнетушители должны всегда содержаться в исправном состоянии, периодически осматриваться, проверяться и своевременно перезаряжаться.

Рекомендуется помещать на стенах инструкции по пожарной безопасности и план эвакуации в случае пожара. В случаях, когда не удастся ликвидировать пожар

самостоятельно, необходимо вызвать пожарную охрану и покинуть помещение, руководствуясь разработанным и вывешенным планом эвакуации.

Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

1. ОСТ 54 30013-83. Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности.
2. ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
3. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ).
4. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
5. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
6. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
7. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
8. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
9. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
10. ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности.
11. СанПиН 2.1.6.1032-01. Гигиенические требования к качеству атмосферного воздуха.
12. ГОСТ 30775-2001. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов.
13. СНиП 21-01-97. Противопожарные нормы.

14. ТОИ Р-15-050-97. Типовая инструкция по охране труда для станочников металлообрабатывающих станков (токарные, фрезерные, сверлильные, строгальные, шлифовальные, заточные станки).

Выводы по разделу «Социальная ответственность»

При анализе производственного помещения, в которой выполнялись работы по использованию высокоскоростной обработке на станке с ЧПУ, было выявлено, что микроклимат в помещении соответствует нормам в теплое и холодное время года. В холодное время применяется водяное отопление, в теплый период – искусственная вентиляция. Значение светового потока составляет 4400 лм, что соответствует нормам. Также нормам соответствует уровень шума в помещении, который не превышает 80дБ. На участке концентрация загрязняющих элементов соответствует санитарным нормам ПДК про ГОСТ 12.1.005-88.

Были выявлены факторы производственной безопасности: повышенный уровень шума и вибрации, недостаточная освещенность рабочего места, пониженная влажность воздуха, наличие мелкой стружки и т.д.

Помещение, в котором осуществляется процесс изготовления изделия, по взрывопожарной и пожарной опасности относится к категории ВЗ. Помещение оборудовано пожарной сигнализацией, огнетушителем и планом эвакуации. Все электронные приборы подключены к сети питания, имеющей защитное заземление.

Разработаны методы утилизации производственных отходов, которые подвергаются утилизации в специальных контейнерах перерабатывающих компаний.

Используемое помещение учебного корпуса соответствует установленным нормам ГОСТов и СанПиНов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе выполнения данной работы можно сделать следующие выводы:

1. Методом импульсного магнетронного распыления композиционной мишени на основе меди и дисульфида молибдена на медных подложках получено триботехническое покрытие с волокнисто-глобулярную структурой толщиной до 60 мкм. Доля волокон на площади поверхности покрытия толщиной 15 мкм составляет 65-75 %, глобул – 25-35%. Усредненный по площади химический состав покрытия содержит: медь – 52 ат.%, молибден – 19 ат.%, сера – 29 ат.%. Глобулы состоят из почти чистой меди с содержанием примесей менее ~1 ат.%. Состав волокон покрытия можно представить в виде химической формулы $Cu_{2,4}Mo_{6,1}S_{7,5}$. Он близок в пределах экспериментальной погрешности к химическому соединению $Cu_2Mo_6S_8$, входящему в группу сверхпроводящих фаз Шевреля.

2. Экспериментально установлено, что покрытие на основе $Cu_xMo_yS_z$ повышает износостойкость меди при работе в паре с медным контртелом в атмосфере аргона в ~ 300 раз за счет смены адгезионного изнашивания на усталостное путем образования граничных слоев твердой смазки на контактирующих поверхностях. Граничные слои из твердой смазки состоят из частиц соединения $Cu_2Mo_6S_8$ и образуются путем «размазывания» волокон покрытия. В пользу твердосмазочного механизма повышения износостойкости свидетельствует понижение коэффициента трения в 2,2 раза при нанесении покрытия $Cu_xMo_yS_z$ на одно из тел пары трения, а также сглаживание скачкообразной кривой трения, указывающего на смену механизма от адгезионного к усталостному.

3. Обнаружено, что в вакууме скорость износа покрытия в ~ 1,8 раза меньше, чем в аргоне, что можно объяснить присутствием в аргоне небольшой концентрации воздуха, которая, по-видимому, приводит к дополнительному окислительному изнашиванию покрытия.

4. Показано, что ресурс работы покрытий $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ линейно возрастает с увеличением толщины вплоть до 50-60 мкм. При изнашивании образцов с покрытием в воздушной атмосфере по сравнению с инертной атмосферой аргона зависимость срока службы покрытий с ростом толщины покрытия увеличивается менее интенсивно (в 2,3 раза), что связано с дополнительным действием механизма окислительного износа кроме основного действующего в инертной атмосфере механизма усталостного износа покрытия.

5. Измерениями удельного электрического сопротивления показано, что полученное покрытие $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ обладает металлической проводимостью, отличающейся по величине от проводимости чистой меди в меньшую сторону в ~ 12 раз, тогда как проводимость дисульфида молибдена меньше проводимости меди в $\sim 5 \times 10^8$ раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мижев В.П., Сидоров О.А., Саля И.Л. Исследование и прогнозирование износа контактных пар устройств токосъема // Известия вузов. Электромеханика. – 2003. – №5. – С.74-79.
2. Буслова Е.В., Гамыгин К.А., Прохоров Ю.Н. Влияние окружающей среды на характеристики электрических контактных пар для вращающихся контактных устройств спутников дистанционного зондирования Земли // Электрические контакты и электроды. – Киев: ИПМ НАН Украины, 2010. – С. 250-255.
3. Авербух В.Я., Гамыгин К.А., Гнутов Е.М., Прохоров Ю.Н., Федоров В.В. Вращающиеся контактные устройства с длительным ресурсом работы // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2008. – Т.7. – С. 4-6.
4. Voevodin A.A., Zabinski J.S. Supertough wear-resistant coatings with “chameleon” surface adaptation // Thin Solid Films. – 2000. – V.370. – P. 223-231.
5. Baker C.C., Chromik R.R., Wahl K.J., Hu J.J., Voevodin A.A.. Preparation of ‘chameleon’ coatings for space and ambient environments // Thin Solid Films. – 2007. – V.515. – P. 6737–6743.
6. Li B., Zhang G., Zhang P., Liu G. Microstructure, mechanical and tribological properties gradient composite films // Thin Solid Films. – 2011. – V.519. – P. 6246–6251.
7. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса / Под ред. Д.Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1977. – 215 с.
8. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических ВУЗов. 2-е изд. переработ. и доп / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
9. Крагельский И.В. Трение и износ. 2-е изд. переработ. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. – 480с.
10. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безысность): Учебник. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Издательство МСХА, 2001. – 616 с.
11. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.

12. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов / Под ред. Д.Г. Громаковского – Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000. – 268 с.
13. ГОСТ 27674-88 Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.
14. Елагина О.Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин: учеб. пособие. – М.: Университетская книга; Логос, 2009. – 488 с.
15. Боуден Ф.П. Трение и смазка твердых тел. Ч.2 / Под ред. Ф.П. Боуден, Д.М. Тейбор. – М.: Машиностроение, 1968. – 544 с.
16. Finkin E.F. Adhesive wear: a general review of the state of experimental knowledge and theory // *Materials Engineering and Applications*. – 1979. – № 1. – P. 154–161.
17. Zhou K.C., Xiao J.K., Zhang L., Xie X.L., Li Z.Y. Tribological behavior of brass fiber brush against copper, brass, coin-silver and steel // *Wear*. – 2015. – V. s 326–327. – P. 48-57.
18. Yan X.D., Sun J.L., Xiong S., Hou Y.Q. Insights into the sliding wear behavior of a copper-steel pair with oils containing extreme-pressure additives // *Wear*. – 2017. – V. 386-387. – P. 211-217.
19. Nuruzzaman D.M., Chowdhury M.A. Friction coefficient and wear rate of copper and aluminum sliding against mild steel // *International Transaction Journal of Engineering, Management, and Applied Sciences and Technologies*. – 2013. – V. 4. – P. 29-40.
20. Chowdhury M.A., Nuruzzaman D.M., Roy B.K., Islam A., Hossain Z., Hasan M.R. Experimental investigation on friction and wear of stainless steel 304 sliding against different pin materials // *World Applied Science Journal*. – 2013. – V. 22. – №12. – P.1702–1710.
21. Emge A., Karthikeyan S., Kim H. J., Rigney D. A. The effect of sliding velocity on the tribological behavior of copper // *Wear*. – 2007. – V. 263. – P. 614–618.
22. Kovalchenko A.M., Blau P.J., Qu J., Danyluk S. Scuffing tendencies of different metals against copper under non-lubricated Conditions // *Wear*. – 2011. – V. 271. – P. 2998–3006.

23. Cocks M. Wear debris in the contact between sliding metals // *Journal of Applied Physics*. –1958. – V. 29. – P. 1609-1610.
24. Cocks M. Shearing of junctions between metal surfaces // *Wear*. – 1966. – V. 9. – P. 320-328.
25. Jeong D.H., Gonzalez F., Palumbo G., K.T. Aust, U. Erb, The effect of grain size on the wear properties of electrodeposited nanocrystalline nickel coatings // *Scripta Materialia*. – 2001. – V. 44. – P. 493–499.
26. Schuh C.A., Nieh T.G., Yamasaki T. Hall-Petch breakdown manifested in abrasive wear resistance of nanocrystalline nickel // *Scripta Materialia*. – 2002. – V. 46. – P. 735–740.
27. Wang L.P., Gao Y., Xu T., Xue Q.J. A comparative study on the tribological behavior of nanocrystalline nickel and cobalt coatings correlated with grain size and phase structure // *Materials Chemistry and Physics*. – 2006. – V. 99. – P. 96–103.
28. Farhat Z.N., Ding Y., Northwood D.O., Alpas A.T. Effect of grain size on friction and wear of nanocrystalline aluminum // *Materials Science and Engineering*. – 1996. – V. A 206. – P. 302–313.
29. Zhang Y.S., Han Z., Lu K. Fretting wear behavior of nanocrystalline surface layer of copper under dry condition // *Wear*. – 2008. – V. 265. – P. 396–401.
30. Han Z., Lu L., Lu K. Dry sliding tribological behavior of nanocrystalline and conventional polycrystalline copper // *Tribology Letters*. – 2006. – V. 21. – P. 45-50.
31. Zhang Y.S., Han Z., Wang K., Lu K. Friction and wear behaviors of nanocrystalline surface layer of pure copper // *Wear*. – 2006. – V. 260. – P. 942-948.
32. Li L.W., Tao N.R., Han Z., Lu K. Comparisons of dry sliding tribological behaviors between coarse-grained and nanocrystalline copper // *Wear*. – 2012. – V. 274-275. – P. 306–312.
33. Emge A., Karthikeyans S., Rigney D.A. The effects of sliding velocity and sliding time on nanocrystalline tribolayer development and properties in copper // *Wear*. – 2009. – V. 267. – P. 562-567.
34. Yao B., Han Z., Li Y.S. Dry sliding tribological properties of nanostructured copper subjected to dynamic plastic deformation // *Wear*. – 2011. –V. 271. – P. 1609 – 1616.

35. Kolubaev A., Tarasov S., Sizova O., Kolubaev E. Scale-dependent subsurface deformation of metallic materials in sliding // *Tribology International*. – 2010. – V. 43. – P. 695-699.
36. Tarasov S., Rubtsov V., Kolubaev A. Subsurface shear instability and nanostructuring of metals in sliding // *Wear*. – 2010. – V. 268. – P. 59-66.
37. Banerjee A., Garshasb M., Zhang L.R. , Zhang J.G., Vook R.W. Electric current effects in wear phenomena at a rotating Cu-Ag interface // *Wear*. – 1983. – V. 86. – P. 341-352.
38. Wang Y.A., Li J.X., Yan Y., Qiao L.J. Effect of surface film on sliding friction and wear of copper-impregnated metallized carbon against a Cu-Cr-Zr alloy // *Applied Surface Science*. – 2012. – V. 258. – P.2362-2367.
39. Singh B., Zhang J.G., Hwang B.H., Vook R.W. Microstructural characterization of rotating electrical contacts in vacuum and wet co2 environments // *Wear*. – 1982. – V. 78. – P. 17-28.
40. Bares J.A. , Argibay N., Mauntler N., Dudder G.J., Perry S.S., Bourne G.R., Sawyer W.G. High current density copper-on-copper sliding electrical contacts at low sliding velocities // *Wear*. – 2009. – V. 267. – P. 417-424.
41. Argibay N., Bares J., Sawyer W. Asymmetric wear behavior of self-mated copper fiber brush and slip-ring sliding electrical contacts in a humid carbon dioxide environment // *Wear*. – 2010. – V. 268. – P. 455–463.
42. Bouchoucha A., Kadiri E.K., Robert F., Zaidi H., Paulmier D. Metals transfer and oxidation of copper-steel surfaces in electrical sliding contact // *Surface and Coatings Technology*. – 1995. – V. 76-77. – P. 521-527.
43. Senouci A, Zaidi H, Frene J. Damage of surfaces in sliding electrical contact copper steel // *Applied Surface Science*. – 1999. – V. 144–145. – P. 287–291.
44. Xiao J.K., Liu L.M., Zhang C., Zhang L., Zhou K.C. Sliding electrical contact behavior of brass fiber brush against coin-silver and Au plating // *Wear*. – 2016. – V. 368-369. – P. 61–469.
45. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. 2-е переработ. изд. – М: Машиностроение, 1965. – 492 с.

46. Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. Конструкционные материалы: справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
47. Повышение качества поверхности и плакирование металлов: Справочник / Под ред. А. Кнаушнера. – М.: Metallurgiya, 1984. – 368 с.
48. Wang Y., Liang Z., Zhang J., Ning Z., Jin H. Microstructure and antiwear property of laser cladding Ni–Co duplex coating on copper. *Materials (Basel)*. – 2016. – V. 9. – P. 634-644.
49. Yan H., Wang A., Xu K., Wang W., Huang Z. Microstructure and interfacial evaluation of Co-based alloy coating on copper by pulsed Nd: YAG multilayer laser cladding // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2010. – V. 505. – P. 645–653.
50. Кудинов В.В., Иванов В.М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. – М.: Машиностроение, 1981. – 192 с.
51. Liu F., Liu C., Chen S., Tao X., Xu Z., Wang M. Pulsed Nd: YAG laser post-treatment Ni-based crack-free coating on copper substrate and its wear properties // *Surface and Coatings Technology*. – 2007. – V. 201. P. 6332-6339.
52. Бартенев С.С, Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1982. – 215 с.
53. Семенов А.П., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия и их применение. – М.: НИИМаш, 1977. – 72 с.
54. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – Киев: Наукова думка, 1988. – 240 с.
55. Марков А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1968 – 368 с.
56. Холопов Ю.В. Зинченко А.Г. Савиных А.А. Безабразивная ультразвуковая финишная обработка металлов. – Ленинград: Изд-во ЛДНТП, 1988. – 218 с.
57. Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Куракин И.Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 184 с.
58. Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы. – М.: Metallurgiya, 1990. – 216 с.

59. Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Рябчиков А.И. Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004.–328 с.
60. Быковский Ю.А., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
61. Алехнович В.Н., Алифанов А.В., Гордиенко А.И., Поболь И.Л. Электронно-Лучевая обработка материалов. – Минск: Белорусская наука, 2006. – 319 с.
62. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
63. Handbook of Vacuum Arc Science and Technology. Fundamentals and Applications / Edited by R.L. Voxman, D.M. Sanders, P.J. Martin. – 1995. – Noyes Publications, Park Ridge, N.Y., USA. – 512 p.
64. Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.
65. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 328 с.
66. Wasa R., Hayakawa S. Handbook of sputter deposition technology. Principles, technology and applications. – 1991. – New Jersey. USA – Noyes Publications – p.397.
67. Handbook of deposition technologies for films and coatings / Edited by R.F. Bunshah, 2-nd ed. – 1994. – New Jersey. USA. – Noyes Publications. – 438 p.
68. Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2008. – 286 с.
69. Mattox D.M. Deposition Technologies for Films and Coatings. Chapter 6/ ed. Bunshah R.F. – 1982. – Noyes Publications, Park Ridge, N.Y., USA. – 463 p.
70. Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия. Получение, свойства и применение. / Перевод под ред. Андриевского Р.А. – 2000. – М: Мир. – 518 с.

71. Kaftelen H., Ünlü N., Göller G., Öveçoglu M.L., Henein H. Comparative processing-structure-property studies of Al-Cu matrix composites reinforced with TiC particulates // *Composites: Part A*. – 2011. – V. 42. –P. 812–824.
72. Tian Y.Z., Wu S.D., Zhang Z.F., Figueiredo R.B., Gao N., T.G.Langdon. Strain hardening behavior of a two-phase Cu-Ag alloy processed by high-pressure torsion // *Scripta Materialia*. – 2011. – V. 65. – P. 477-480.
73. Jia S.G., Liu P., Ren F.Z., Tian B.H., Zheng M.S., Zhou G.S. Wear behavior of Cu-Ag-Cr alloy wire under electrical sliding // *Materials Science and Engineering*. – 2005. – V. 398. – P. 262–267.
74. Rajkumar K., Kundu K., Aravindan S., Kulkarni M.S. Accelerated wear testing for evaluating the life characteristics of copper-graphite tribological composite // *Materials and Design*. – 2011. – V. 32. – P. 3029–3035.
75. Chen S., Feng Y., Li S., Xie. Influence of MoS₂ contents on sintering process and properties of Cu-MoS₂ composites // *Journal of Materials Science and Engineering*. – 2008. – V. 2.– P. 7–12.
76. Huang S., Feng Y., Liu H., Ding K., Qian G. Electrical sliding friction and wear properties of Cu-MoS₂-graphite-WS₂ nanotubes composites in air and vacuum conditions // *Materials Science and Engineering*. – 2013. – V. 560. – P. 685–692.
77. Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2008. – 286 с.
78. Rodriguez R.J., Sanz A., Medrano A. Tribological properties of ion implanted aluminum alloys // *Vacuum*. – 1999. – V. 52. – P. 187-192.
79. Zhan Z., Ma X., Feng L., Sun Y., Xia L.. Tribological behavior of aluminum alloys surface layer implanted with nitrogen ions by plasma immersion ion implantation // *Wear*. – 1998. – V. 220. – P. 161-167.
80. Youssef A.A., Budzynski P., Filiks J., Surowiec Z.. Improvement of tribological properties of aluminum by nitrogen implantation // *Vacuum*. – 2005. – V.78. –P. 599-603.

81. Abdi F., Savaloni H. Surface nanostructure modification of Al substrates by N⁺ ion implantation and their corrosion inhibition // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2017. – V. 27. – №3. – P. 701-710.
82. Wieser E., Schöneich A., Richter E. Influence of high dose and high energy oxygen implantation on the mechanical surface properties of aluminium // Surface and Coatings Technology. – 1996. – V. 83. – P. 290-295.
83. Foerster C.E., da Silva R.S.L., Fitzb T., Dekorsy T. Prokert F., Kreißig U., Richter E., Möller W., Lepiński C.M., de M. Siqueirad C.J. Carbon ion implantation into aluminium: Mechanical and tribological properties // Surface and Coatings Technology. – 2005. – V. 200. – P. 5210-5219.
84. Conde A., Muñoz-García C., García I., Fuentes G.G. Almandoz E., García J.A., Rodríguez R.J., Qin Yi. Nano-wear, nano-hardness and corrosion-resistance of electroplated nickel surfaces after co-implantation of Cr⁺ and N₂⁺ ions // Surface and Coatings Technology. – 2011. – V. 205. – P. 4447-4452.
85. Muñoz-García C., Conde A., García I., Fuentes G.G., Almandoz E., García J.A., Rodríguez R.J., Qin Yi. Friction, nanowear and corrosion properties of electroplated nickel surfaces after dual implantation of Cr⁺ and N₂⁺ ions: Influence of the implantation energy of the N₂⁺ ions // Surface and Coatings Technology. – 2012. – V. 210. – P. 46-53.
86. Myers S.M., Knapp J.A., Follstaedt D.M., Dugger M.T., Christenson T.R. Strength and tribology of bulk and electroformed nickel amorphized by implantation of titanium and carbon // Surface and Coatings Technology. – 1998. – V. 103-104. – P. 287-292.
87. Shih K.K. Effect of nitrogen ion implantation on impact wear // Wear. – 1985. – V.105. – №. 4. – P. 341-347.
88. Sari A.H., Salem M.K., Shoorche A. Effect of Nitrogen Ion Implantation in Copper // Journal of Fusion Energy. – 2011. – V. 30. – P. 323-327.
89. Wang S.B., Zhu P.R., Wang W.J.. The microstructure and tribological properties of copper surfaces implanted with carbon ions // Surface and Coatings Technology. – 2000. – V. 123. – P. 173-176.

90. Shin M., Hultman L., Barnett S.A. Growth structure and microhardness of epitaxial TiN/NbN superlattices. // *Journal of Materials Research*. – 1992. – Vol. 7. – P. 901-907.
91. Sproul W.D. Multilayer, multicomponent and multiphase physical vapor deposition coatings for enhanced performance // *Journal of Vacuum Science and Technology*. – 1994. – V. A 12. – P. 1595-1601.
92. Clemens B.M., Kung H., Barnett S.A. Structure and strength of multilayers // *MRS Bulletin*. – 1999. – V. 2. – P. 20-26.
93. Veprek S., Reiprich S. A concept for the design of novel superhard coatings // *Thin Solid Films*. – 1995. – V. 268. – P. 64-71.
94. Veprek S.. Electronic and mechanical properties of nanocrystalline composites when approaching molecular size // *Thin Solid Films*. – 1997. – V. 297. – P. 145-153.
95. Dias A.G., Van Breda J.H., Moretto P., Ordelman J. Development of TiN-Si₃N₄ nano composite coatings for wear resistance applications // *Proc. 10th Euro.Conf. on Chemical Vapour Deposition, Venice, Italy, September 10,1995, J. de Physique, IV (5), 1995, p. C5.831-C5. 840.*
96. Musil J., Jankovcova H., Cibulka V.. Formation of Ti_{1-x}Si_x and Ti_{1-x}Si_{xn} films by magnetron co-sputtering // *Czechoslovak Journal of Physics*. – 1999. – V. – 49. – №3. – P.359-372.
97. Veprek S.. Mechanical properties of superhard nanocomposites // *Surface and Coatings Technology*. – 1997. – V. 97. – P. 15-22.
98. Mitterer C., Losbichler P., Beschliesser M.. Nanocrystalline hard coatings within the quasi-binary system TiN-TiB₂ // *Vacuum*. – 1998. – V. 50. – P. 313-318.
99. Mitterer C., Mayrhofer P.H., Beschliesser M.. Microstructure and properties of nanocomposite Ti-B-N and Ti-B-C coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 1999. – V. 120–121. – P. 405-411.
100. Irie M., Ohara H., Nakayama A., Kitagawa N., Nomura T. Deposition of Ni/TiN nano-composite films by cathodic arc ion-plating // *Nuclear Instruments Methods in Physics Research*. – 1997. – V. B 121. – P. 133-136.

101. Musil J., Zeman P., Hruby H., Mayrhofer P.H.. ZrN/Cu nanocomposite film — a novel superhard material // *Surface and Coatings Technology*. – 1999. –V. 120-121. – P. 179-183.
102. Musil J., Polakova H. Relationships between hardness, young's modulus and elastic recovery in hard nanocomposite coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2002. – V. 154. – P. 304-313.
103. J. Musil, H. Hruby. Superhardnanocomposite $Ti_{1-x}Al_xN$ films prepared by magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. – 2000. – V.365. – P. 104-109.
104. Musil J., Vlcek J.. Magnetron sputtering of films with controlled texture and grain size // *Materials Chemistry and Physics*. – 1998. – V. 54. – P. 116-122.
105. Benda M., Musil J. Plasma nitriding enhanced by hollow cathode discharge – a new method for formation of superhard nanocomposite coatings on steel surfaces // *Vacuum*. – 1999. –V. 55. – P. 171-175.
106. Voevodin A.A., Prasad S.V., Zabinski J.S. Nanocrystalline carbide/amorphous carbon composites // *Journal of Applied Physics*. – 1997. – V. 82. – P. 855-858.
107. Delplancke-Ogletree M.P., Monteiro O.R.. Deposition of titanium carbide films from mixed carbon and titanium plasma streams // *Journal of Vacuum Science and Technology*. – 1997. – Vol. A 15. – P. 1943-1950.
108. Voevodin A.A., O'Neill J.P., Prasad S.V., Zabinski J.S.. Nanocrystalline WC and WC/a-C composite coatings produced from intersected plasma fluxes at low deposition temperatures // *Journal of Vacuum Science and Technology*. – 1999. – V. A 17. – P. 986-992.
109. Monteiro O.R., Delplancke-Ogletree M.P., Lo R.Y., Winand R., Brown I. Wear behavior of diamond-like carbon/metal carbide multilayers // *Surface and Coatings Technology*. –1997. –V. 94. – P. 484-488.
110. Sundgren J.E., Johanson B.O., Karlsson S.E. Influence of substrate bias on composition and structure of reactively r.f.-sputtered TiC films // *Thin Solid Films*. – 1983. – V. 105. – P.353-357.
111. Holleck H. Material Selection for Hard Coatings // *Journal of Vacuum Science and Technology*. – 1986. – Vol. A 4. – P. 2661-2669.

112. Ito H., Yamamoto K., Masuko M. Thermal stability of UBM sputtered DLC coatings with various hydrogen contents // *Thin Solid Films*. – 2008. – V.51-3. – P. 1115–1119.
113. Nedfors N, Tengstrand O., Lu J., Eklund P., Persson O.Å., Hultman L., Jansson U. Superhard NbB_{2-x} thin films deposited by dc magnetron sputtering // *Surface and Coatings Technology*. –2014. – V. 257. – P.295-300.
114. Nedfors N., Primetzhofer D., Wang L., Lud J., Hultman L., Jansson U. // Characterization of magnetron sputtered Cr–B and Cr–B–C thin films for electrical contact applications // *Surface and Coatings Technology*. –2015. – V. 266. – P.167-176.
115. Liang B., Zhang G. Electrical Sliding Tribological Behavior of Cu/Ag/Graphite Composite Coating // *Rare Metal Materials and Engineering*. – 2016. – V. 45. – P.1961-1966.
116. Ng K.W., Man H.C., Cheng F.T., Yue T.M. Laser cladding of copper with molybdenum for wear resistance enhancement in electrical contacts // *Applied Surface Science*. – 2007. – V. 253. – P. 6236–6241.
117. Abad M.D., Sanchez-Lopez J.C., Cusnir N., Sanjines R. WC/ a–C nanocomposite thin films: Optical and electrical properties // *Journal Of Applied Physics*. – 2009. – V. 105. – P. 033510-1 – 033510-6.
118. Krzanowski J.E., Endrino J.L. The effects of substrate bias on phase stability and properties of sputter-deposited tungsten carbide // *Materials Letters*. – 2004. – V. 58. – P. 3437-3440.
119. Santerre F., El Khakani M.A., Chaker M., Dodelet J.P. Properties of TiC thin films grown by pulsed laser deposition // *Applied Surface Science*. – 1990. – V. 148. – P. 24-33.
120. Lauridsen J., Nedfors N., Jansson U., Jensen J., Eklund P., Hultman L. Ti–B–C nanocomposite coatings deposited by magnetron sputtering // *Applied Surface Science*. –2012. – V. 258. – P. 9907-9912.
121. Sandu C.S., Benkahoul M., Sanjinés R., Lévy F. Model for the evolution of Nb–Si–N thin films as a function of Si content relating the nanostructure to electrical and

mechanical properties // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – V. 201. – P. 2897-2903.

122. Lamni R., Sanjinés R., Lévy F. Electrical and optical properties of $Zr_{1-x}Al_xN$ thin films // *Thin Solid Films*. – 2005. – V. 478. – P. 170-175.

123. Sandu C.S., Medjani F., Sanjinés R. Structure, morphology and electrical properties of sputtered Zr–Si–N thin films: From solid solution to nanocomposite // *Reviews on advanced materials science*. – 2007. – V. 15. – P. 173-178.

124. Dinesh Kumara D., Kumard N., Kalaiselvam S., Radhika R., Arul Maximus Rabel, Jayavela R. Tribo-mechanical properties of reactive magnetron sputtered transition metal carbide coatings // *Tribology International*. – 2017. – V. 114. – p. 234–244.

125. Drnovšek A., Panjana P., Panjan M., Čekada M. The influence of growth defects in sputter-deposited TiAlN hard coatings on their tribological behavior // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – V. 288. – P. 171–178.

126. Wang H., Wang X., Song X., Xuemei Liu, Xingwei Liu. Sliding wear behavior of nanostructured WC–Co–Cr coatings // *Applied Surface Science*. – 2015. – V. 355. – P. 453–460.

127. Dinesh Kumara D., Kumarc N., Kalaiselvam S., Dash S. , Jayavela R. Substrate effect on wear resistant transition metal nitride hard coatings: Microstructure and tribo-mechanical properties // *Ceramics International*. – 2015. – V. 41. – P. 9849–9861.

128. Donnet C., Erdemir A. Solid lubricant coatings: recent developments and future trends // *Tribology Letters*. – 2004. – V. 17. – P. 389-397.

129. Scharf T.W., Prasad S.V. Solid lubricants: a review // *Journal of Materials Science*. – 2013. – V. 48. – P. 511–531.

130. Braithwaite E.R. (1964) *Solid lubricants and surfaces*. – Clarendon Press, Oxford. – P. 139.

131. Deacon R.F., Goodman J.F. Lubrication by lamellar solids. *Proceedings of the Royal Society of London*. – 1958. – V. A 243. – P. 464.

132. Roselman I.C., Tabor D. The friction of carbon fibers // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1976. – V. 9. – P. 2517-2532.

133. Yen B.K., Schwickert B.E., Toney M.F. Origin of low-friction behavior in graphite investigated by surface x-ray diffraction // *Applied Physics Letters*. – 2004. – V. 84. – P. 4702-4704.
134. Savage R.H. Graphite lubrication // *Journal of Applied Physics*. – 1948. – V. 19. – № 1. – P. 1-10.
135. Ramadanoff D., Glass S.W. High altitude brush problem // *Electrical Engineering*. – 1944. – V. 63. – P. 825-830.
136. Erdemir A., Donnet C. Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications. – Springer, New York, 2008. – 664 p.
137. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. – 2002. – V. 37. – P.129-281.
138. Erdemir A., Donnet C.. Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2006. – V. 39. – №18. – P. 311-327.
139. Polaki S.R., Kumar N., Ganesan K. Madapu K., Bahuguna A., Kamruddin M., Dash S., Tyagi A.K. Tribological behavior of hydrogenated DLC film: Chemical and physical transformations at nano-scale // *Wear*. –2015. – V. 338 –339. – P. 105-113.
140. Guo C.Q., Pei Z.L., Fan D., Gong J., Sun C. Microstructure and tribomechanical properties of (Cr, N)-DLC/DLC multilayer films deposited by a combination of filtered and direct cathodic vacuum arcs // *Diamond and Related Materials*. – 2015. – V. 60. – P. 66-74.
141. Choi J., Nakao S., Miyagawa S., Ikeyama M., Miyagawa Y.. The effects of Si incorporation on the thermal and tribological properties of DLC films deposited by PBII&D with bipolar pulses // *Surface and Coatings Technology*. – 2007. – V. 201. –P. 8357-8361.
142. Chen L.Y., Hong F.C. Effects of SiOx-incorporation hydrocarbons on the tibological properties of DLC films // *Diamond and Related Materials*. – 2001. – V.10. – P. 1058-1062.

143. Müller I.C., Sharp J., Rainforth W.M. Hovsepian P., Ehiasarian A. Tribological response and characterization of Mo–W doped DLC coating // *Wear*. –2017. – V. 376–377, Part B. – P. 1622-1629.
144. Cai Y., Wang R.Y., Liu H.D. Luo C., Wan Q., Liu Y., Chen H., Chen Y.M., Mei Q.S., Yang B. Investigation of (Ti:N)-DLC coatings prepared by ion source assisted cathodic arc ion-plating with varying Ti target currents // *Diamond and Related Materials*. – 2016. – V.69. – P. 183-190.
145. Scharf T.W., Singer I.L. Role of the Transfer Film on the Friction and Wear of Metal Carbide Reinforced Amorphous Carbon Coatings During Run-in // *Tribology Letters*. – 2009. – V. – 36. – P. 43-53.
146. Fontaine J., Le Mogne T., Loubet J.L, Belin M. Achieving superlow friction with hydrogenated amorphous carbon: some key requirements // *Thin Solid Films*. –2005. – V. 48. – P. 99-108.
147. Fontaine J., Belin M., Le Mogne T., Grill A. How to restore superlow friction of DLC: the healing effect of hydrogen gas // *Tribology International*. – 2004. – V. 37. – P. 869-877
148. Erdemir A., Fontaine J., Donnet C. Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications. Springer, New York, 2008. – p 237.
149. Jungk J.M., Michael J.R., Prasad S.V.. The role of substrate plasticity on the tribological behavior of diamond-like nanocomposite coatings // *Acta Materialia*. – 2008. – V. 56. – P. 1956-1966.
150. Scharf T.W., Prasad S.V., Dugger M.T., Kotula P.G., Goeke R.S., Grubbs R.K. Growth, structure, and tribological behavior of atomic layer-deposited tungsten disulphide solid lubricant coatings with applications to MEMS // *Acta Materialia*. – 2006. – V. 54. – P. 4731-4743.
151. Brainard WA. The thermal stability and friction of the disulfides, diselenides, and ditellurides of molybdenum and tungsten in vacuum (10^{-9} to 10^{-6} torr) / NASA TN D5141, 1969. – 22 p.
152. Wahl K.J., Dunn D.N., Singer I.L.. Wear behavior of Pb-Mo-S solid lubricant coatings // *Wear*. – 1999. – V. 230. – P. 175-183.

153. Scharf T.W., Kotula P.G., Prasad S.V. Friction and Wear Mechanisms in MoS₂/Sb₂O₃/Au Nanocomposite Coatings // *Acta Materialia*. –2010. – V. 58. – P. 4100-4109.
154. Hu J.J., Wheeler R., Zabinski J.S., Shade P.A., Shiveley A., Voevodin A.A. Transmission electron microscopy analysis of Mo–W–S–Se film sliding contact obtained by using focused ion beam microscope and in-situ micro-tribometer // *Tribology Letters*. – 2008. – V. 32. – P. 49-57.
155. Sliney H.E. Solid lubricant materials for high temperatures—a review. *Tribology International*. – 1982. – V. 15. – P. 303–315.
156. Uernura M., Saito K., Nakao K. A mechanism of vapor effect on friction coefficient of molybdenum disulfide // *Tribology Transactions*. – 1990. – V. 33. – № 4. – P. 551–556.
157. A.R. Lansdown. *Molybedenum Disulphide Lubrication*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1999.
158. Przybyszewski J.S. A review of lubrication of sliding- and rolling-element electrical contacts in vacuum / NASA TN D-4476, 1968. – 32 p.
159. Oliver W., Pharr G. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // *Journal of Materials Research*. – 1992. – V. 7. – № 6. – P. 1564-1583.
160. Смирнов С.В. Методы исследования материалов и структур электроники : учеб. пособие / С.В. Смирнов. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 171 с.
161. Горелик С.С, Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. 3-е изд. переработ. и доп. – М: МИСИС, 1994. – 328 с.
162. Hall E.O. The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results // *Proceedings of the Physical Society of London*. – 1951. – V. 64. – P. 747–753.
163. Petch. N.J. The Cleavage Strength of Polycrystals // *Journal of the Iron and Steel Institute*. – 1953. – V. 173. – P. 25–28.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Раздел на иностранном языке

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM81	Чукарев Б.А.		

Консультант школы ИШНПТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Коростелёва Е.Н.	к.т.н., доцент		

Консультант школы ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Ажель Ю.П.			

The influence of coating based Cu-Mo-S and environment on the wear of the copper pair of friction.

1. Literature review on tribotechnical properties of copper

1.1 Basic patterns of friction and wear of metallic materials

Operational characteristics of machine parts and mechanisms are often caused by friction during their operation, because friction initiates deformation, dynamic, thermal, adhesion and other processes that determine the performance of friction units of machines.

The science of friction and the processes accompanying friction - tribology, as it developed, offered many theories about the nature of friction and wear and tear of two bodies in friction contact. Nowadays the molecular-mechanical theory of friction is the most developed one [7, 8].

According to this theory friction force is represented as the sum of molecular (adhesion) and mechanical (deformation) components. Molecular interaction is conditioned by mutual attraction of two solids, their adhesion; mechanical interaction is conditioned by mutual introduction and micronerosity fixation.

When sliding, there are various surface layer changes caused by deformation, stress, temperature and chemical influence of the environment.

Figure 1.1 shows five main types of friction bond disturbance. The first three types are observed in mechanical interaction, while the last two are observed in molecular interaction. The conditions for transition from the first to the second and third species depend on the relative depth of metal introduction and the magnitude of adhesion forces. The implementation of the fourth and fifth species depends on the ratio between the strength of the oxide film and the base material and the value of the stress state. If the strength of the film is less than the strength of the base material, then the fourth type takes place. When the strength of the film or surface layers without the film is greater, the fifth type takes place [9].

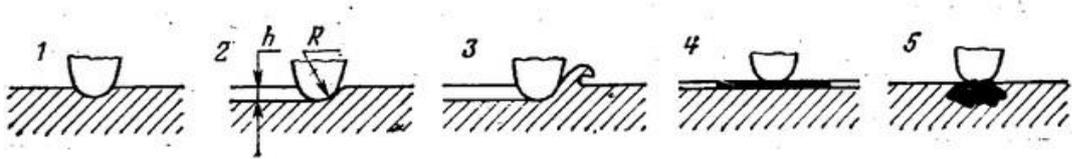


Figure 1.1 - Types of friction disturbance. 1 - elastic metal pushing away, 2 - plastic metal pushing away, 3 - shearing away, 4 - film setting and breaking, 5 - entrapment with deep metal pulling away.

Based on the molecular-mechanical model, I.V. Kragelsky formulated three consecutive and interrelated stages of the friction process:

1. surface interaction taking into account the influence of the environment;
2. change of surface layers as a result of interaction taking into account the influence of environment;
3. destruction of surfaces taking into account two previous stages.

Mutual contacting of details takes place on the surface protrusions at heights formed by micronervities (Fig. 1.2) [10].

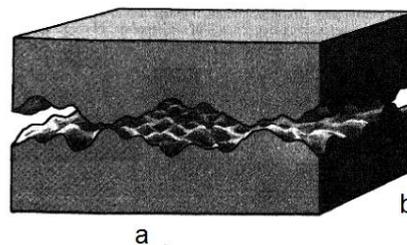


Figure 1.2 - Scheme of contacting surfaces of friction pair bodies [10].

They're different:

1. Nominal contact area corresponding to the nominal mating dimensions of the parts: $A_a = a \times b$;
2. Actual contact area equal to the sum of the actual small contact areas: $A_r = 0.01 \dots 0.1$ of A_a ;
3. Contour area of contact, which is the sum of the areas of actual contact with the adjacent areas: $A_r = 5 \dots 15\%$ of A_a .

The following types of deformation of projections are possible:

1. Elastic;

2. Elastic plastic without hardening;
3. Ultragoplastic with hardening.

In most cases of primary loading of plastic deformation plays a leading role in forming the actual contact area. The projections included in the contact are plastically flattened, most often with the introduction: a harder projection or the one to which the geometric shape gives more resistance to deformation is introduced.

Wear is the destruction of the surface of a solid body, manifested by changes in size or shape. This process takes place over time. If wear of any pair of friction is represented graphically as a function of time (or path of time), then the slope of the curve in each point characterizes the intensity of wear. If we set aside on the abscissa axis the working time t of the friction pair (Fig. 1.3 a) and on the ordinate axis the wear U , we obtain the pattern wear curve in time. The tangent angle α , formed by the abscissa axis and tangent to the curve at any point, determines the wear rate at a given moment in time.

On the general wear curve (Fig. 1.3 a, curve 1), three sections corresponding to the three stages of wear can be identified. I - initial wear, observed at the surface of the parts; II (straight line section of the curve) - established wear ($\text{tg}\alpha - \text{const}$), observed at normal operation of the conjugation; III - process of sharp increase of wear rate, corresponding to the stage of catastrophic wear. The curve 2 in Figure 1.3 (a) shows the change in the wear rate.

The curve in Figure 1.3 (b) corresponds to a case where, after the end of the operation, the factors accelerating wear gradually accumulate and therefore there is no period of established wear.

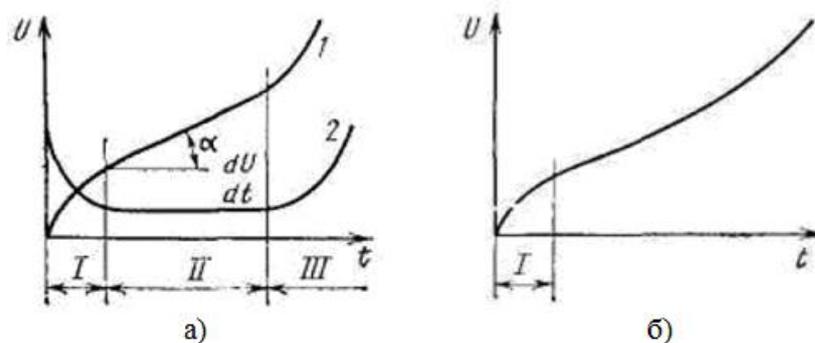


Figure 1.3 - Wear curves [10].

1.2 Main types of wear

Type of wear and its intensity is determined by a set of mechanical and physical-chemical properties of the material under the influence of such external factors as environment, temperature, pressure, speed of relative movement of surfaces, etc. In view of a variety of materials of elements of tribosystems and conditions of their operation types of deterioration are various enough. Below are listed the generally accepted main types of wear, described in various literature sources [7-15].

Adhesive wear. The main reason for this type of wear is the adhesive (molecular) component of friction force. At conjugation of micronericals of bodies contacting in the course of friction, adhesive bonds arise between them. Adhesion can create strong bonds between metals, metals and non-metals and between non-metals. Bonds are formed in areas of actual contact that are free of foreign films and are relatively easy to form in soft materials with chemical affinity or mutual solubility. Adhesion wear is particularly evident in friction pairs consisting of homogeneous metals. The reason for the difference in adhesion between metals is the degree of electron transfer between contacting metals. Free electrons in two contacting metals change with each other and form a metal bond.

According to F.P. Bowden, the nature of the destruction of adhesive bonds is reduced to four cases:

1. Bond strength is less than the strength of metals of the friction pair. Cutting occurs on the connection itself.
2. The bond is stronger than one of the metals of the friction pair. Cutting occurs in volume of less strong metal. In this case, its particles will stick to a harder surface.
3. The bond is stronger than both metals. The main destruction of the bond occurs in the thickness of the less strong metal.
4. A compound of identical metals. The bond is riveted and its shear resistance increases as it is moved. Therefore, a shear is less likely to occur in the

connection, and more often in the depth of the main metal mass, with surface damage being significant.

The Archard model works well to estimate the amount of wear on friction pairs made from one relatively soft material. Archard found that the volume of carried material V is proportional to the normal F_N load and the path L and back is proportional to the hardness of the material H in the contact micro-rises:

$$V = k_A \frac{F_N \cdot L}{H}$$

The experiments conducted by Archard showed that the coefficient varies from 10^{-2} to 10^{-7} .

Lubricants (liquid, plastic and solid) are the means of fighting against setting, and it is necessary that the resistance to deformation of the film is lower than the resistance to deformation of the material of the friction pair, otherwise, with the application of sufficient normal load the material will deform plastically. The film will rupture into the individual sections associated with the metal, with little or no change in the total area. At this point, the base material will come out between the parts of the film, and adhesion will occur on clean newly formed surfaces of the material.

Fatigue wear and tear will occur, accompanying all types of wear and tear. This includes cases where there are no abnormal damages such as scoring, tacking, microcutting, etc. during the operation of friction units. During friction, each projection of the body surface drives a wave on the counterbody surface in front of it, deforming the material. It compresses it in front of the indenter (micronerosity), stretching considerably behind the indenter due to the friction force. In this way, each section of the abraded body is successively subjected to compressive and tensile stresses.

Reduction in the number of loading cycles before the surface layer breaks down is caused by compressive and especially tensile stress. The process of surface layer fatigue failure occurs at nominal stresses not exceeding the elastic limit and always has a hidden period within which the damage accumulates. During this period there are no visible physical changes either at the surface or in the surface layer.

Fatigue wear and tear occurs even in the absence of direct physical contact of the bodies with a lubricating film.

Despite the reduction in frictional force during lubrication and the corresponding reduction in contact stress, fatigue wear still occurs and the number of cycles required for surface damage increases. The film protects the base material from deep pulling, but does not protect the base material from the deformation it experiences when sliding on it by embedded projections. Fatigue wear and tear caused by multiple deformations of the microvolumes of the material leads to their colouring and peeling (pitting).

Oxidative wear occurs when on contacting surfaces films of oxides which in the course of a friction are formed are destroyed and formed again, thus wear products consist of oxides. The intensity of wear can be considerable, but the surface of a friction keeps small roughness, owing to an obstacle to tacking of surfaces by oxides.

For oxidative wear, it is necessary that the time interval between successive film breaks is sufficient to form an oxide film of a certain thickness. When the oxide film is thin and flexible, it plays a positive role and protects the surfaces from damage by preventing the juveniles from welding the surfaces, which occurs in a vacuum. But as the oxide film grows, it thickens, becomes brittle and collapses. Wear products can escape the friction zone with lubrication. And in some cases, they cause abrasive wear because they have a higher hardness. During oxidative wear, deformation, adsorption and chemical reactions occur simultaneously and they are interrelated. Deformation activates the thinnest surface layers, making them more sensitive to adsorption, diffusion and chemical reactions. The layer formed as a result of local plastic deformation contains numerous microstructure defects and areas with high density of dislocations. This layer can interact with oxygen dissolved in the lubricant.

1.3 Coating as a method of increasing wear resistance

According to the molecular-mechanical theory of external friction, the wear resistance of a material can be increased in two ways: by increasing the hardness of contact surfaces and reducing the force of adhesive interaction between them. Based on this, the wear resistance of the material can be increased by applying a hard coating to

the surface or by applying a lubricant to reduce the adhesion force between the rubbing surfaces.

At present, superhard nanocomposite coatings based on various elemental systems with nanocrystalline grains in amorphous matrix systems have been obtained [93-101]. Some hard coating systems have been considered as protective coatings in electrocontact friction pairs. Thus, work [113] considered an ultra-hard coating of NbBh deposited with a magnetron equipped with an NbB₂ target as a protective coating for the electrocontact pair. The coating was deposited on a steel disk and tested for friction in pair with a steel ball by the "ball to disk" scheme. The hardness of the deposited coating was 42 GPa and the friction coefficient was 0.16 due to oxidation of the coating surface during friction and formation of B₂O₃ phase. However, NbB₂-x coatings have rather high electrical resistance ~ 100 μΩ-cm.

Unfortunately, the destruction of the hard coating can lead to the formation of solid wear particles from the coating material. In this case sliding friction of a tribopair made of soft metals will turn into abrasive wear of unfixed particles of the destroyed coating, which will lead to intensive wear of soft metal of a tribopair [124-127].

According to the molecular-mechanical theory of friction to increase the wear resistance of soft metals it is advisable to reduce the force of their adhesive interaction. Different lubricants are used to reduce the adhesion interaction between surfaces that come into contact with each other during friction. For lubrication of heavy-duty components (such as high vacuum, outer space, high speed, high loads and very low or high temperatures), where liquid lubricants cannot provide the required performance or durability, solid lubricants are used [128]. There are four classes of solid lubricants [129]:

1. Materials based on carbon (e.g. graphite, DLC and nanocrystalline diamond);
2. Dichalcogenides of transition metals MX₂ (where M - W, Mo, Nb, Ta, X - S, Se, Te);
3. Polymers;
4. Soft metals such as silver, tin, indium and gold.

A classic example of a carbon-based hard lubricant is graphite. The graphite shown in Figure 1.5 is a lamellar solid body with a hexagonal lattice [130]. The carbon atoms in its base plane are held together by strong covalent bonds, while the base planes themselves are held together by weak Van der Waals forces providing weak resistance to shear between lamellars. Thus, under the action of the shear force, the reference planes slide above each other. The presence of water vapor and oxygen in the environment contributes to the interplanar shift of graphite crystals. Densely packed basal planes have low surface energy and low adhesion between them [131, 132]. If the basebase plane is damaged, areas with a strong covalent bond of the plane bind to areas of the neighboring plane, which leads to increased adhesion between the layers. Low friction is maintained when the edge areas capable of reaction are neutralized (passivated) by adsorption of water or other condensed vapors [133]. This is true for many solid carbon-based lubricants. In contrast to transition metal dichalcogenides, graphite needs moisture or adsorbed gases in the environment to passivate exposed covalent bonds and edges of basal planes to provide lubrication [134]. In vacuum and dry environments graphite without additives shows high friction coefficient [135].

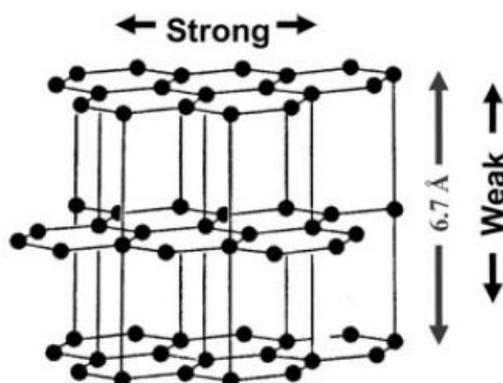


Figure 1.5 - Lamellar graphite structure [130].

Among the various transition metal dichalcogenides, the MoS₂ and WS₂ are best known for their lubricating properties. These solid lubricants are most often used to lubricate assemblies operating in open space conditions. Lubrication with these compounds is ensured by their crystalline structure. Like graphite, MoS₂ crystallizes in a hexagonal structure where the plane of molybdenum atoms is squeezed between two

hexagonally filled layers of sulfur. The scheme of their crystalline structure is presented in Fig. 1.6 [150].

The S-Mo-S lamellas have a strong covalent bond, while the weak Van der Waals forces hold the lamellas together, resulting in weak shear resistance between the lamellas. Thus, under the action of the shear forces, the reference planes glide above each other by means of intra-crystal sliding, resulting in a transfer film on the counter-tape. Thus, the main mechanisms for creating low shear resistance are [151]: creation of reference planes (002) and subsequent (repeated) orientation parallel to the direction of sliding and formation of the transfer film.

The ability of the MoS₂ and WS₂ to form transfer films on the counterbore means that it is not necessary to cover both contact surfaces of the tribopair, covering one contact surface is sufficient to create low friction after the run-in period. In addition, there is no need to deposit fully crystalline coatings or coatings with a predominant orientation of base planes (002) parallel to the sliding direction.

A number of experimental studies have confirmed that frictional stresses can cause crystallization in MoS₂-based coatings, which initially did not have a long range order [152, 153] or lead to reorientation of planes parallel to the direction of sliding in the deposited crystal coatings [154]. Fig. 1.7 shows cases in which the coating has (a) a crystal (base planes perpendicular and/or parallel to the substrate) or (b) an amorphous structure. In the sequence a→c→d, there is a shear reorientation of perpendicular (or randomly oriented) reference planes parallel to the direction of sliding, with friction of the randomly oriented MoS₂/Au crystal coating. In the sequence b→c→e there is a transformation of amorphous material into crystalline reference planes parallel to the direction of sliding, when friction of the amorphous coating MoS₂/Sb₂O₃/Au [153].

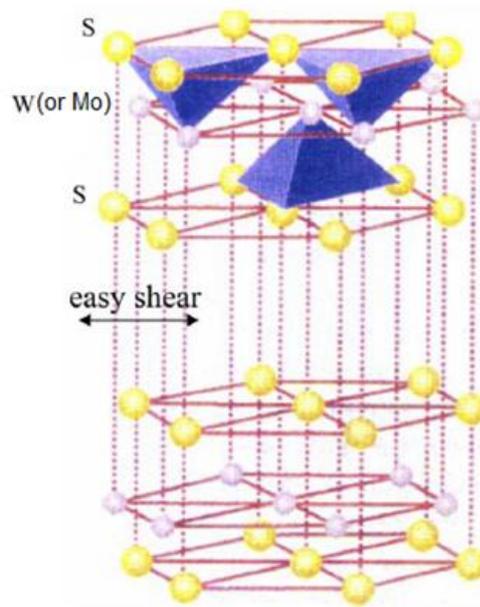


Figure 1.6 - Lamellar crystalline structure of molybdenum disulfide (tungsten) [150].

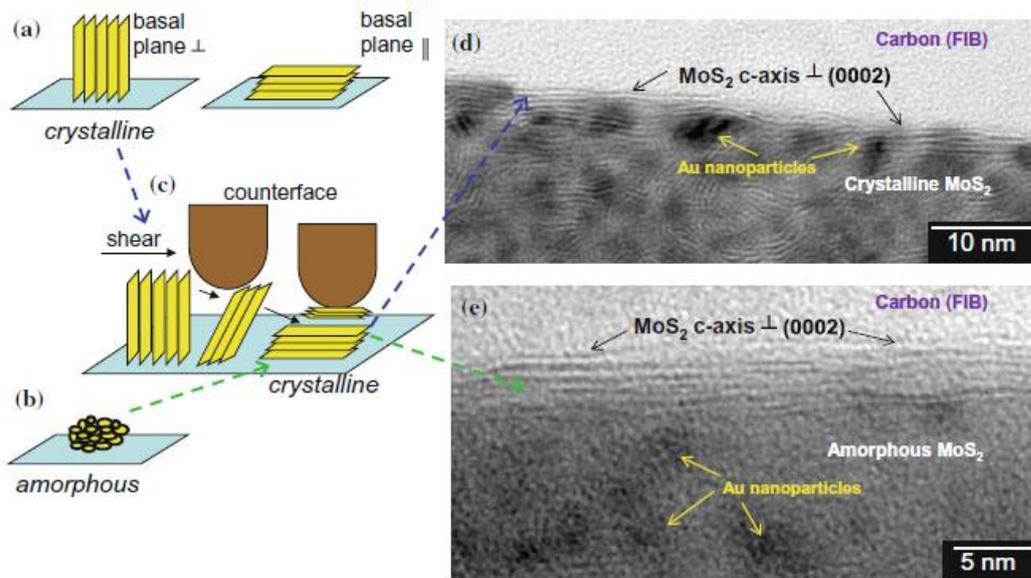


Figure 1.7 - Schematic representation of two crystallographic textures with base planes (a) perpendicular or parallel to the substrate and (b) amorphous structure. The process of shear (a→c→d) reorientation under friction of the perpendicular (or randomly oriented) basal planes parallel to the direction of sliding, or (b→c→e) transformation of the amorphous structure into a crystal structure. Corresponding PEM images of the cross sections of the wear track of MoS₂/Au crystal coating (1000 sliding cycles at 0.3 GPa load) (d) and MoS₂/Sb₂O₃/Au e amorphous coating (10 000 sliding cycles at 0.7 GPa load) [129].

The friction of transition metal dichalcogenides is strongly influenced by the environment. The MoS₂ and WS₂ coatings show extremely low coefficient of friction

(~ 0.05 or less) and long service life (several million sliding cycles) at friction in dry inert gas or in ultra-high vacuum, where the coatings do not oxidize and do not react with water vapor molecules, retaining their lubricating ability [151, 155]. However, when sliding in humid air a higher coefficient of friction (0.15-0.2) and extremely short lifetime (as a rule, less than several thousand cycles) are observed. The nature of the effect of humidity on friction coefficient can be explained as follows. Water vapour is first adsorbed on the surface of the coatings and then penetrates the MoS₂ coatings. The water vapour in the coatings will influence the crystal structure and physical and chemical properties and thus will change tribotechnical characteristics. In [156] it is reported that liquid water may exist in defects of the MoS₂ crystal structure and that this water affects the shear strength between the base planes. In [157] it is reported that water penetrates the interlayer gap and causes increased adhesion between adjacent lamellas. Papers [151, 155] report that the deterioration of tribotechnical characteristics of friction of transition metal dichalcogenides in a humid atmosphere is associated with the formation of valence bonds at the edges of the reference planes that react with water and oxygen in the environment, resulting in their oxidation and the formation of oxidation products such as MoO₃ or WO₃.