

1558496

На правах рукописи

БЕЛИКОВ Андрей Иванович

**ПОВЫШЕНИЕ ВАКУУМНЫХ И ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МЕХАНИЗМОВ С ТВЕРДОСМАЗОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ НА ОСНОВЕ
ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА ДЛЯ ВАКУУМНОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Специальность 05.27.07 -
Оборудование производства электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Беликов

Москва, 1998

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель -

доктор технических наук, профессор
Панфилов Ю.В.

Официальные оппоненты -

доктор технических наук, профессор
Слепцов Владимир Владимирович,
кандидат технических наук
Папко Вильямс Михайлович

Ведущее предприятие - ОАО ЦНИТИ "ТЕХНОМАШ"

Защита диссертации состоится "20" мая 1998 г. на
заседании диссертационного Совета К 053.15.01 в Московском
Государственном Техническом Университете им. Н.Э.Баумана по адресу:
г. М., 5.

ат в 1-м экземпляре, заверенный печатью,
у.

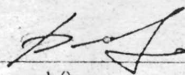
ознакомиться в библиотеке Московского
ерситета им. Н.Э.Баумана.

2 " апреля 1998 г.

83

О

1558496



Рябов В.Т.

Объем 1,0 п.л.

Тираж 100 экз.

Инография МГТУ им. Н.Э.Баумана

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время большое число технологических процессов производства изделий электронной техники осуществляются в условиях высокого и сверхвысокого вакуума при жестких требованиях к спектру газовой выделения и потокам микродисперсных частиц (МДЧ). Одним из путей решения возникающих при этом проблем является создание многокамерных вакуумных технологических установок кластерного типа, в которых осуществляется шлюзовая загрузка и выгрузка кассеты с полупроводниковыми пластинами из атмосферы в вакуумный шлюз и обратно, операции индивидуальной обработки пластин в рабочих камерах и передача каждой пластины из кассеты в вакуумную транспортную систему с дальнейшим распределением пластин по рабочим камерам. Реализация столь сложных манипуляций в условиях вакуума требует значительного числа механизмов в транспортных системах и в приводах различных исполнительных устройств, содержащих всевозможные пары трения.

Эффективное использование такого оборудования связано с повышением надежности функционирования механизмов, расположенных в вакууме. Разработанный Панфиловым Ю.В. новый критерий проектирования вакуумного технологического оборудования (ВТО) – "минимум привносимой дефектности обрабатываемых изделий" служит мерой, определяющей параметрическую надежность ВТО и связан с учетом влияния потоков МДЧ на качество и выход годной продукции. Так, распространяющиеся в вакуумных объемах потоки частиц, осаждающаяся на формируемые структуры сверхбольших интегральных схем (СБИС) приводят к значительному браку (70-90%) уже при плотности привносимой дефектности порядка 3-5 шт/см² с размерами МДЧ $\geq 0,2$ мкм.

Большинство используемых в ВТО механизмов не соответствуют новым требованиям по потоку генерируемых микрочастиц. Как показывает практика, используемые в механизмах пары трения при работе выделяют в вакуумную среду значительные потоки частиц износа, достигающие 2000 шт/с и более. А получившие в последнее время распространение твердосмазочные покрытия (ТСП) на основе дисульфида молибдена, имеющие хорошие антифрикционные характеристики в условиях вакуума, зачастую не удовлетворяют предъявляемым требованиям по газовой выделению и потоку МДЧ. Однако, появившийся в последнее время метод нанесения MoS₂ путем ионного распыления в вакууме, который был реализован в ИМАШ под руководством Семенова А.П., обладает некоторыми преимуществами в сравнении с другими покрытиями из твердосмазочного материала.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1558496

Беликов А.И. Повышение ва



Исследованиям пар трения вакуумных механизмов посвящены работы Александровой А.Т., Деулина Е.А., Ковалева Л.К., Вагина Н.С., Смирнова Н.Д., Кужмана А.Г., Синодеева И.В., Степанчикова С.В. и др. Ими исследованы процессы и определены характеристики фрикционного взаимодействия поверхностей без покрытий в условиях вакуума, разработаны требования, регламентирующие состав и потоки газовой выделения из вакуумных механизмов, построены физико-статистические модели потоков газовой выделения из ТСП "Димолит-4" для различных механизмов, а также аналитические зависимости для расчета линейного износа такого покрытия.

Однако, в этих работах не решены вопросы выбора метода нанесения твердосмазочного покрытия на пары трения и проектирования механизмов с ТСП для ВТО в соответствии с новым критерием – минимумом привносимой дефектности обрабатываемых изделий. Недостаточно изучены процессы, возникающие при фрикционном контактировании деталей с ТСП, вопросы изнашивания такого покрытия. Не исследованы вакуумные и фрикционные характеристики покрытия, получаемого ионно-плазменным нанесением и нет ориентированной на промышленное использование технологии получения такого покрытия. Не разработаны методы регулирования потоков МДЧ из пар трения вакуумных механизмов.

Таким образом, существует необходимость разработки научно-обоснованного подхода к выбору и проектированию пар трения механизмов для современного вакуумного технологического оборудования с заданными вакуумными и фрикционными характеристиками, учитывающими фактор привносимой дефектности обрабатываемых изделий.

Поэтому целью данной работы явилось создание научных основ формирования заданных эксплуатационных свойств поверхностного слоя деталей с твердосмазочным покрытием на основе дисульфида молибдена, используемых в механизмах вакуумного технологического оборудования.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработана модель процессов трения и изнашивания тонкопленочного ТСП на основе MoS_2 и создана методика расчета параметров износа в парах трения механизмов ВТО, опирающаяся на разработанную модель;
- выбраны методы, средства и разработана пригодная для промышленного использования технология нанесения ТСП на основе MoS_2 на детали пар трения вакуумных механизмов;
- исследованы вакуумные и фрикционные характеристики пар трения с ТСП на основе MoS_2 (поток микродисперсных частиц, интенсивность изнашивания и др.);

разработана методика проектирования вакуумных механизмов с ТСП на основе MoS_2 с заданными вакуумными и фрикционными свойствами.

На защиту выносятся:

1. Физическая и математическая модель процессов трения и изнашивания тонкопленочного твердосмазочного покрытия;
2. Результаты экспериментальных исследований вакуумных и фрикционных характеристик пар трения с ТСП, получаемым ионно-плазменным нанесением;
3. Методика проектирования пар трения вакуумных механизмов с заданными вакуумными и фрикционными характеристиками.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. На основании теоретических и экспериментальных исследований обоснованы выбор и целесообразность использования твердосмазочного покрытия на основе MoS_2 , формируемого методом ионно-плазменного нанесения в вакууме, в узлах трения механизмов современного вакуумного технологического оборудования.
2. Впервые разработана модель изнашивания тонкопленочного твердосмазочного покрытия на основе MoS_2 , позволяющая рассчитывать параметры износа пар трения механизмов с ТСП с учетом предварительно формируемого микрорельефа ("микрокарманов") и прогнозировать показатели надежности механизмов.
3. Обоснован принцип построения технологического процесса на основе магнетронной ВЧ распылительной системы и ионно-лучевого источника с использованием операции формирования микрорельефа для создания пар трения с заданными вакуумными и фрикционными характеристиками.
4. Разработан метод регулирования потока частиц износа из механизмов путем изменения соотношения площади микрокарманов к общей площади покрытия.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработаны стенд и методика для определения вакуумных и фрикционных характеристик пар трения механизмов вакуумного оборудования с низкой интенсивностью изнашивания непосредственно в условиях вакуума в реальном масштабе времени.
2. Создана технологическая установка, реализующая в едином вакуумном цикле ионно-лучевое формирование микрорельефа и ионно-плазменное нанесение твердосмазочного покрытия с требуемыми вакуумными и фрикционными свойствами для механизмов вакуумного технологического оборудования.

3. Разработана оригинальная методика выбора параметров технологического процесса нанесения ТСП на основе MoS_2 на элементы пар трения с помощью информационно-поисковой системы по технологии тонких пленок.
4. Создана база данных твердосмазочных покрытий и разработаны рекомендации по выбору покрытий для проектируемых механизмов вакуумного оборудования.

Методы исследований. Теоретические исследования базировались на положениях теории контактирования твердых тел Краггского И.В., работах Дроздова Ю.Н., Добычина М.Н., Комбалова В.С. и др. в области математического моделирования процессов трения и износа, теории распространения дислокаций при трении, разработанной Suh N.P., теории прочности и устойчивости, современных представлениях по вопросам трения, изнашивания и взаимодействия контактирующих поверхностей. Использовались исследования Слепцова В.В. по изучению поверхности, работы Семенова А.П., Воронина Н.А., Григорова А.И., Духовского Е.А., Ноженкова М.В. и других по нанесению и исследованию твердосмазочных покрытий.

Экспериментальные исследования вакуумных и фрикционных характеристик (потоки частиц износа, интенсивность изнашивания) пар трения с ТСП на основе MoS_2 , получаемого ионно-плазменным методом, проводились на специально разработанном стенде для исследования пар трения в условиях вакуума, оснащенного современной контрольно-измерительной аппаратурой. Покрытие наносилось на вакуумной установке, оснащенной специальными технологическими средствами. Обработка результатов экспериментов проводилась с использованием вычислительной техники, оценка их точности и достоверности выполнялась на основе положений теории вероятности и математической статистики.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры "Электронное машиностроение" МГТУ им. Н.Э.Баумана, на двух Международных Симпозиумах "Тонкие пленки в электронике", на Российской конференции "Высокие технологии в промышленности России".

Публикации. Основное содержание работы отражено в четырех печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов и приложения. Содержит 204 страницы машинописного текста, 45 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 112 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность решаемой в диссертационной работе задачи, сформулированы цель работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено высокопроизводительное вакуумное технологическое оборудование производства микроэлектроники, проведен анализ современных тенденций его развития в направлении создания установок кластерного типа и определено увеличение относительной степени влияния потоков МДЧ из пар трения механизмов на качество выпускаемой продукции и фактическую производительность ВТО.

Кроме того, повышение степени интеграции СБИС приводит к увеличению количества требований, которым должно соответствовать вакуумное технологическое оборудование, а сами требования становятся все более жесткими. Это связано как с уменьшением топологических норм интегральных микросхем и улучшением качественных характеристик изделий, так и с необходимостью снижения себестоимости продукции за счет увеличения выхода годной продукции.

Анализ современных условий, в которых используются механизмы ВТО, позволил сформулировать требования, предъявляемые к парам трения. При недопустимом "сухом" контакте поверхностей (без покрытий) вследствие высокого коэффициента трения ($f \geq 0,4-0,9$) в вакууме и невозможности использования жидких и консистентных смазок вследствие высокого газовыделения, пары трения должны обеспечивать работоспособность при давлениях $10^{-4}-10^{-9}$ Па, температуре прогрева поверхностей до 450°C , контактных давлениях до 1000 МПа, при потоках энергии до 10^6 Вт/см². К механизмам предъявляются жесткие требования по плавности перемещения и погрешности позиционирования ($\leq \pm 5$ мкм), наработки на отказ – не менее 1000 часов, минимальной величине стоп-эффекта – вплоть до $f_{\text{покоя}}/f_{\text{движ}}=1$.

В последнее время широкое распространение получили твердосмазочные покрытия на основе дисульфида молибдена, обладающие высокими антифрикционными характеристиками в вакууме. Однако существует множество методов, формирующих различные покрытия на основе MoS₂ с большим разбросом эксплуатационных свойств. Основную сложность при выборе покрытия представляет необходимость удовлетворения противоречивым требованиям, таким, например, как малая толщина и высокая долговечность, кроме того, помимо указанных, необходимо соблюдать требования по допустимым потокам газовыделения – $< 10^{-5}-10^{-12}$ м³·Па/с и отсутствию в спектре нежелательных сернистых и серо-углеродистых соединений, требования по генерации частиц износа определяются допустимой дозой привнесенной дефектности пластин – 0,01 шт/см² при критическом размере частиц $\geq 0,2$ мкм.

Анализ свойств покрытий на основе MoS_2 , получаемых различными методами, показал, что наиболее полно удовлетворяют вышеуказанным требованиям покрытия, состоящие из MoS_2 без связующих компонентов.

Как показал анализ, покрытие, получаемое ионно-плазменным нанесением (ИПН) имеет низкую интенсивность изнашивания (линейный износ - порядка 10^{-9}), реализует в условиях высокого вакуума аномально низкий коэффициент трения $<0,01$. Кроме того, выполненные Панфиловым Ю.В. и Медовицким В.Ф. эксперименты показали, что по сравнению с покрытием "Димолит-4", получаемым термохимическим методом, такое покрытие не содержит в спектре выделяемых газов сернистых соединений и сероводородов. А эксперименты Гусарова В.В. по исследованию продуктов износа, выделяемых подшипником качения определили более малые потоки частиц из подшипника с покрытием ИПН MoS_2 в сравнении с покрытием, формируемым механическим нанесением MoS_2 и даже в сравнении с подшипником без покрытия.

Таким образом, получаемое методом ИПН покрытие перспективно для использования в узлах трения ВТО. Однако, на сегодняшний день не решены задачи формирования покрытия с заданными значениями потоков частиц износа, нет доведенной до промышленного использования технологии нанесения покрытия с требуемыми характеристиками, не разработана методика расчета параметров изнашивания пар трения с ТСП.

Вторая глава посвящена исследованию особенностей процессов трения и изнашивания покрытий на основе слоистых твердосмазочных материалов и разработке модели изнашивания тонкопленочного ТСП на основе MoS_2 в узлах и механизмах ВТО.

Анализ существующих моделей процесса трения показал, что имеющиеся математические модели для сухого трения и для трения поверхностей, разделенных прослойкой жидкой смазки не годятся для описания процессов трения слоистых материалов и не могут использоваться при расчете параметров износа твердосмазочных покрытий.

Современные исследования в области физики процессов, происходящих в слое твердосмазочного материала при фрикционном взаимодействии позволили определить, что в процессе взаимного контактирования поверхности контртела и покрытия в материале последнего происходят изменения, влекущие за собой появление внутренних напряжений (по данным электроннографических исследований). Было также определено, что основной механизм изнашивания твердосмазочного покрытия состоит из следующих стадий: отслоения, "вздутия" и отделения фрагментов покрытия.

Процесс трения твердосмазочного материала характеризуется перемещением плоскостей скольжения (базовых плоскостей), имеющих малое усилие сдвига. При нанесении покрытия формируется структура, состоящая из кристаллитов, не ориентированных базовыми плоскостями по направлению скольжения в паре трения. При трении происходит переориентация кристаллитов по направлению скольжения на участках фактического контакта (рис.1) и, вследствие этого, накопление напряжений сжатия в покрытии (рис.2). Изнашивание участка покрытия определяется процессом отслаивания и "вспучивания" при достижении предельных значений внутренних напряжений на участке. Выдвинутая гипотеза о линейном характере процесса накопления напряжений позволила связать фактическое давление p_r в контакте с возникающими в материале напряжениями.

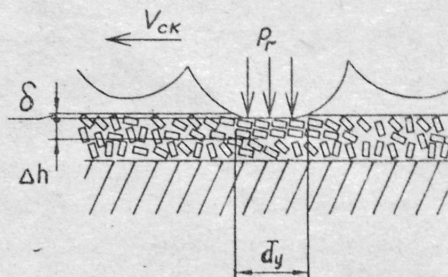


Рис.1. Модель фрикционного контактирования микронеровности контртела с тонкопленочным ТСП: $V_{ск}$ - скорость скольжения, $\delta = \Delta h_1 - \Delta h_2$.

Работами Воронина Н.А. показано, что для модели контакта цилиндра с двухслойным полупространством при "мягком" поверхностном слое, что соответствует характеристикам слоя дисульфида молибдена, эпюра контактного давления незначительно отличается от расчетной модели Г.Герца для контакта без покрытия. Учитывая это обстоятельство и малую толщину покрытия (1-5 мкм), вкладом тонкой пленки дисульфида молибдена в процесс формирования фактических площадей и давления в контакте можно пренебречь. Таким образом, при расчете характеристик контакта могут использоваться зависимости, полученные Крагельским И.В. (на основании решения задачи Г.Герца) для расчетной модели контактирования типа: идеально гладкая поверхность - шероховатая поверхность из набора полусфер.

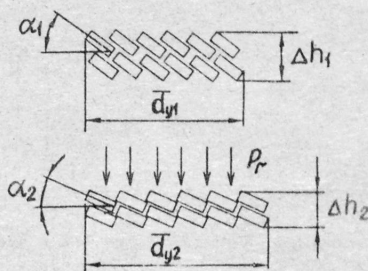


Рис.2. Схема накопления в покрытии напряжений сжатия на участках фактического контакта при переориентации кристаллитов: $\alpha_2 < \alpha_1$; $\Delta h_2 < \Delta h_1$; $\bar{d}_{y2} > \bar{d}_{y1}$.

При построении математической модели процесса изнашивания был определен элементарный акт износа, как отслоение и отрыв фрагмента покрытия толщиной Δh и разме-

ром, соответствующим среднему диаметру фактического пятна контакта $\bar{d}_y$. Толщина фрагмента определяется зависимостью, полученной Suh N.P. для зоны с повышенной концентрацией дислокаций, по глубине, возникающей при трении. Отслаивание фрагмента наступает при достижении на участке предельных значений внутренних напряжений сжатия $\sigma_{сж}^{пред}$, которые зависят от радиуса кривизны подложки с покрытием. Соотношение между фактическим давлением на контакте p_r и предельными напряжениями сжатия, которые достигаются за счет линейного накопления напряжений при каждом воздействии на фрагмент покрытия контактного давления, определяет то количество воздействий, после которых произойдет разрушение участка покрытия.

Таким образом, математическое выражение для расчета линейной интенсивности износа с учетом полной площади покрытия A_o , участвующей в трении и фактической площади контакта A_r имеет следующий вид:

$$I_h = \frac{\Delta h A_r p_r}{\bar{d}_y A_o \sigma_{сж}^{пред}} \quad (1)$$

С учетом выражений, входящих в (1) составляющих, уравнение для расчета линейной интенсивности износа имеет окончательный вид:

$$I_h = \frac{P_c \left[\frac{GB}{4\pi(1-\mu)(\tau_0 + \beta p_c)} \right]^2}{R_b r_0 \frac{2r}{\sqrt{v}} \left[\frac{2\sqrt{\pi}}{k_v} \Delta^v p_c \theta \right]^{\frac{1}{2v+1}}}, \quad (2)$$

где p_c - контурное давление; G - модуль сдвига; B - вектор Бюргерса; μ - коэффициент Пуассона; τ_0 - сдвиговое сопротивление при экстраполяции нормального давления к нулю; β - коэффициент упрочнения молекулярной связи твердосмазочного материала. Характеристики подложки: R_b - радиус волны макронеровности; r - радиус микронеровности; b - параметр кривой опорной поверхности; v - параметр степенной аппроксимации кривой опорной поверхности; k_v - числовой коэффициент, зависящий от v ; Δ - комплексная характеристика шероховатости; θ - упругая постоянная материала;

Анализ выражения (2) показывает, что значительное влияние на величину износа покрытия, а следовательно, и на поток частиц износа оказывает шероховатость подложки.

Для подтверждения теоретических положений, определения вакуумных и фрикционных свойств покрытия и дальнейшего практического использования покрытия необходим

научно-обоснованный выбор технологического маршрута и режимов нанесения, которые позволили бы не только получать покрытие, но также использовать возможности вакуумных технологий для создания пар трения с заданными эксплуатационными характеристиками.

Третья глава посвящена разработке технологического маршрута и выбору режимов нанесения твердосмазочного покрытия на основе дисульфид молибдена.

Для повышения достоверности и ускорения процесса выбора рациональных режимов и маршрута нанесения дисульфида молибдена из множества существующих вакуумных методов была разработана база данных (БД) "Вакуумные методы нанесения покрытий". Конкретная реализация БД строилась на основе системы управления базами данных (СУБД) "Paradox" по разработанной Панфиловым Ю.В. и Ковалевым Л.К. классификации вакуумных методов нанесения.

Получение необходимой выборки информации из базы для дальнейшей обработки и анализа осуществлялось исходя из следующих соображений:

- 1) для обеспечения высокой адгезии покрытия к материалу основания энергия частиц осаждающегося материала должна быть более 1 эВ;
- 2) метод должен обеспечивать нанесение диэлектрических материалов;
- 3) температуры источника и подложки не должны превышать 400 °С, поскольку в остаточной кислородсодержащей среде в MoS_2 образуются оксидные фазы;
- 4) необходимо нанесение покрытия на детали относительно больших размеров для возможности промышленного использования технологии при нанесении покрытия на элементы пар трения вакуумных механизмов.

Анализ полученной из базы данных информации определил в качестве преимущественного метода - магнетронное ВЧ-распыление. В качестве вакуумного метода, реализующего окончательную очистку и активацию поверхности перед нанесением необходимо использовать ионно-лучевой источник с холодным катодом. Возможности ионно-лучевого травления поверхностей целесообразно также использовать для полировки поверхности и микрообработки.

Одним из недостатков рассматриваемого покрытия является малая толщина, поэтому актуальна также задача повышения долговечности механизмов с таким покрытием. Для этого в разработанный маршрут была впервые введена операция формирования микрокарманов (рис.3), в которых после нанесения покрытия содержится резерв дополнительной смазки, подплавывающий зону трения после износа основного слоя.

Было установлено, что создаваемые микрокарманы обеспечивают также регулирование потока микрочастиц из пары трения за счет частичного накопления изнашиваемого материала и снятия напряжений в покрытии. Варьирование относительной площадью микрокарманов позволяет регулировать величину потока частиц износа из пары трения.

Для практической реализации процесса нанесения покрытия была разработана и оснащена необходимым технологическим оборудованием вакуумная установка.

Важным преимуществом разработанной технологии нанесения покрытия с необходимыми вакуумными и фрикционными свойствами является проведение технологического процесса в едином вакуумном цикле, начиная с операций по микрообработке, финишной полировке, очистке, активации поверхности и заканчивая нанесением ТСП (рис. 4).

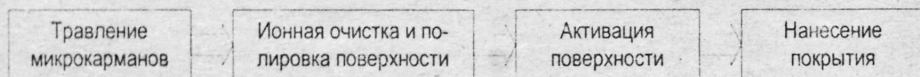


Рис. 4. Технологический маршрут формирования покрытия.

При нанесении покрытия по разработанной технологии при следующих режимах: расстояние магнетрон-изделие – 60 мм, диаметр мишени дисульфида молибдена – 100 мм, плотность ВЧ мощности на мишени порядка 3 Вт/см² была достигнута скорость нанесения покрытия 5-6 мкм/час, что в 4-5 раз превышает полученные ранее результаты.

Для оценки параметров предварительной обработки поверхности (ионно-лучевая полировка) использовались профилограммы образцов, а характеристики покрытий оценивались с помощью электронной микроскопии.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям процессов генерации частиц износа парами трения с твердосмазочными покрытиями и разработке методики регулирования эксплуатационных свойств поверхностного слоя деталей с ТСП.

Имеющиеся на сегодняшний день средства для исследования пар трения на износостойкость используют при оценке износа конечные значения контролируемых величин. Таким образом, качество покрытий и поверхностей пар трения определяется по интегральным характеристикам процесса износа: геометрическим (изменение толщины или размеров), ве-

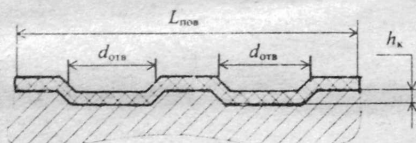


Рис. 3. Микрокарманы для дополнительной смазки: $S_{\text{пов}} = L_{\text{пов}} B_{\text{пов}}$ – площадь поверхности покрытия в паре трения ($L_{\text{пов}}$, $B_{\text{пов}}$ – протяженность и ширина поверхности), $S_{\text{отв}} = \sum (\pi d_{\text{отв}}^2 / 4)$ – суммарная площадь микрокарманов, h_k – глубина карманов.

товым (изменение массы) и временным (интервал времени, число циклов нагружения). При этом представляет трудность исследование динамики процесса изнашивания материалов и тем более с использованием традиционных средств невозможно осуществить контроль за изменением малых величин износа, когда из зоны трения выделяются единичные частицы размером в микрометры. Поэтому для экспериментального подтверждения теоретических зависимостей и определения оптимальных значений шероховатости поверхности, при которых из зоны трения выделяется минимальный поток микрочастиц, а также для исследования влияния относительной площади микрокарманов на поток частиц износа был разработан и оснащен специальным оборудованием оригинальный экспериментальный стенд.

Разработанный стенд может использоваться для исследования потоков частиц износа размером от 1 до 100 мкм из пар трения вакуумных механизмов непосредственно в условиях вакуума и в реальном масштабе времени.

Анализ разработанной модели показал, что на износ покрытия значительное влияние оказывают параметры шероховатости контактирующих поверхностей. Для определения зависимости потоков частиц износа из пары трения от шероховатости подложки с ТСП, получаемым ИПН MoS_2 были проведены экспериментальные исследования, позволившие выявить значения шероховатости, при которой происходит существенное уменьшение износа покрытия (рис.5). В связи с этим необходимо обеспечивать шероховатость подложки с параметром $R_a=0,5$ мкм и менее, что определяет более жесткие требования к поверхности в сравнении с покрытием "Димолит-4", получаемым термохимическим методом, для которого оптимальный параметр шероховатости составляет $R_a=0,75$ мкм.

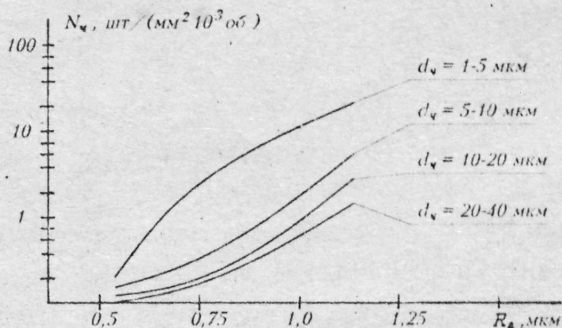


Рис.5. Экспериментальные зависимости потока частиц износа N_q , генерируемых парой трения от параметра шероховатости подложки R_a и размеров частиц d_q .

В результате проведенных экспериментов были получены распределения потоков частиц по размерам из покрытия получаемого ИПН дисульфида молибдена на вал пары трения скольжения типа "вал-втулка" при различных значениях относительной площади микрорельефа $\gamma_a = S_{\text{отг}} / S_{\text{пов}}$ (рис.3) при $\gamma_a=0$ (рис.6а), $\gamma_a=0,15$ (рис.6б) и $\gamma_a=0,3$ (рис.6в), кото-

Образец без микро рельефа

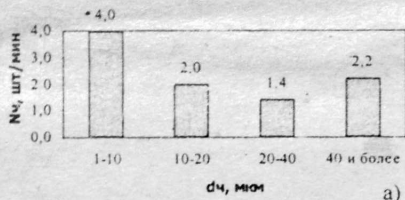
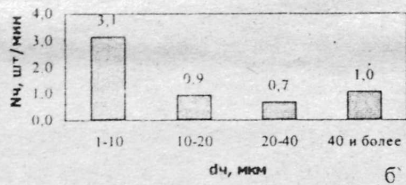
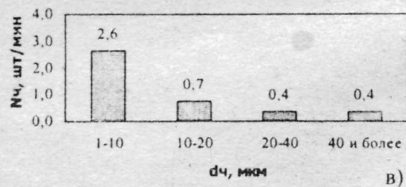
Образец с микро рельефом $\gamma_a = 0,15$ 

Рис.6. Распределение потоков частиц износа N_q по размерам d_q при различных значениях параметра микро рельефа γ_a .

Образец с микро рельефом $\gamma_a = 0,3$ 

рые показали, что с увеличением относительной площади микрокарманов γ_a происходит уменьшение потоков частиц во всем диапазоне размеров.

В соответствии с разработанной моделью изнашивания ТСП на примере пары трения типа "вал-втулка" были получены аналитические зависимости, отражающие влияние относительной площади микрокарманов γ_a на поток частиц износа из пары трения и интенсивность линейного износа покрытия.

Зависимость площади изношенной поверхности покрытия $A_{ин}$ от γ_a , которая в виде частиц износа выделяется из пары трения "вал-втулка" с покрытием на валу за количество оборотов k вала, имеет следующий вид:

$$A_{ин} = \frac{NDkGB}{4(1-\mu)\left(\tau_0 + \beta \frac{N}{\pi DL(1-\gamma_a)}\right)} (1-\gamma_a)(1-\sqrt{\gamma_a}), \quad (3)$$

$$R_B \tau_0 \frac{2r}{\sqrt{\nu}} \left[\frac{2\sqrt{\pi}}{k_v} \Delta \nu \frac{N}{\pi DL(1-\gamma_a)} \frac{\Theta}{\theta} \right]^{\frac{1}{2\mu-1}}$$

где N – нагрузка на пару трения, D – диаметр вала, L – длина сопряжения.

Следует отметить, что для точного отражения взаимосвязи процесса изнашивания покрытия с количеством продуктов износа необходимо использовать именно эту характери-

стику, поскольку отношение указанной площади износа покрытия к площади частицы среднего диаметра $\bar{d}_y$, дающее значение потока частиц, не будет соответствовать экспериментальным данным вследствие дробления частиц в зоне трения.

Полученная зависимость интенсивности линейного изнашивания I_h от γ_a определяет влияние варьируемого фактора γ_a на долговечность покрытия и имеет вид:

$$I_h = \frac{N \left[\frac{GB}{4\pi(1-\mu) \left(\tau_0 + \beta \frac{N}{\pi DL(1-\gamma_a)} \right)} \right]^2}{\pi DL(1-\gamma_a) R_B \tau_0 \frac{2r}{\sqrt{v}} \left[\frac{2\sqrt{\pi}}{k_v} \Delta^v \frac{N}{\pi DL(1-\gamma_a)} \theta \right]^{\frac{1}{2v+1}}} \quad (4)$$

Проверкой по критерию Фишера была установлена адекватность полученных теоретических зависимостей (3) и (4) экспериментальным данным при доверительной вероятности 95%.

Определенные экспериментально значения линейной интенсивности изнашивания составляют $I_h = 10^{-10} - 10^{-11}$, что на один-два порядка лучше по сравнению с имеющимися на сегодняшний день достижениями.

Разработанные теоретические зависимости (3) и (4) составляют расчетную базу для определения характеристик пар трения с тонкопленочным ТСП, нанесенным на поверхность трения с микрорельефом. Построенные по указанным зависимостям кривые представлены на рис. 7 и отражают влияние относительной площади микрокарманов γ_a на поток частиц износа $A_{изн}$ из пары трения и линейную интенсивность изнашивания I_h . Данные кривые позволяют определить значения параметра γ_a , при которых или поток частиц имеет допустимые значения $A_{изн}^{доп}$, или достигается допустимая интенсивность износа $I_h^{доп}$, соответствующая требуемой долговечности механизмов с ТСП. Таким образом, получен метод регулирования эксплуатационных свойств поверхностного слоя деталей с ТСП на основе MoS_2 .

В пятой главе представлена методика выбора покрытий для пар трения ВТО и проектирования пар трения с ТСП на основе ИПН MoS_2 с заданными вакуумными и фрикционными характеристиками (поток частиц износа и интенсивность изнашивания) путем варьирования параметром γ_a .

Рассмотренное в работе покрытие не охватывает всех областей использования в вакуумном технологическом оборудовании, а наиболее пригодно для применения в прецизионных механизмах и парах трения, используемых в условиях высоких температур (до 400°C), при жестких требованиях к газовой выделению (поток – менее $10^{-8} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ и отсутствие сероуглеродов и серосодержащих соединений) и потокам МДЧ (менее 1 шт/с). Для ускорения процесса выбора покрытий, используемых при других условиях эксплуатации в ВТО, на основе анализа предметной области методов нанесения и покрытий на основе твердых смазок была разработана автоматизированная экспертная система (АЭС) по технологиям нанесения и характеристикам ТСП. При выборе покрытия из базы данных АЭС следует проводить анализ задаваясь требуемыми эксплуатационными характеристиками, например, рабочей температурой, при которой используется покрытие, интенсивностью изнашивания и толщиной покрытия, ресурсом его работы, коэффициентом трения, нагрузочной способностью и другими.

В случае выбора покрытия, получаемого ИПН MoS_2 для создания механизмов с заданными эксплуатационными характеристиками необходимо определять параметр микрорельефа γ_a исходя из следующих соображений:

1. При ограничении потока износа из пары трения предельным значением $A_{\text{инн}}^{\text{доп}}$ по полученной для проектируемого механизма зависимости (3) (рис.7) определяется необходимое значение параметра γ_a микрорельефа.
2. Для достижения требуемой долговечности покрытия (при оптимальной толщине до 1-3 мкм), ограничиваясь максимальным значением интенсивности изнашивания $I_h^{\text{доп}}$, по зависимости (4) определяется возможное значение параметра микрорельефа γ_a при котором минимален поток частиц износа (рис.7).

Предложенная оригинальная операция формирования микрокарманов на поверхности трения в едином вакуумном цикле с нанесением ТСП позволяет уменьшить поток изношенного покрытия из пары трения в 8-15 раз по сравнению с покрытием без микрокарманов, при незначительном увеличении интенсивности изнашивания (в 2-3 раза).

Представленная в работе методика проектирования пар трения с ТСП и выбора технологических режимов нанесения покрытия могут использоваться при создании механизмов вакуумного технологического оборудования кластерного типа, например установки "Оратория 3-200", с допустимым потоком МДЧ. Кроме того, полученные теоретические и экспериментальные данные могут быть использованы для регулирования потоков износа

при создании пар трения с тонкопленочными ТСП, используемых в таких экологически чистых производствах, как, например, медицинская промышленность, оборудование нанесения тонких пленок на предметы быта (тонируемые стекла, художественные изделия и др.).

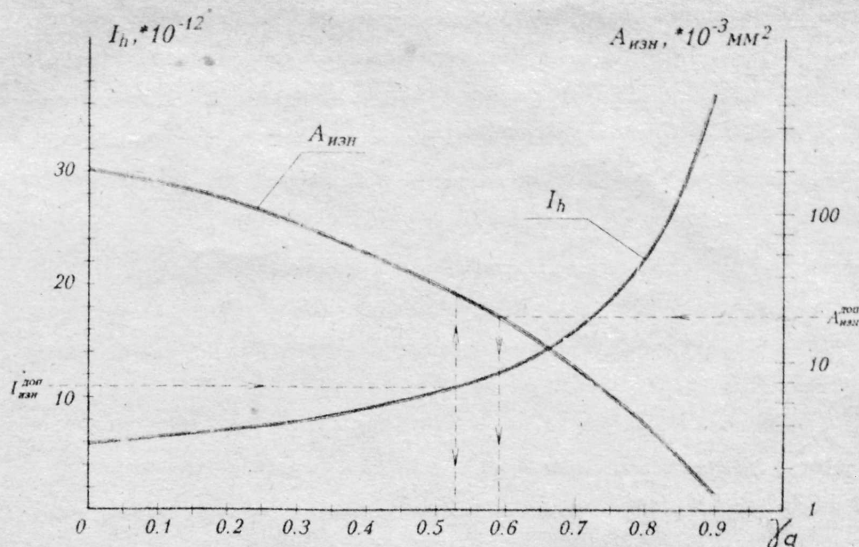


Рис.7. Теоретические зависимости площади продуктов износа $A_{изн}$ выделяющихся из пары трения и линейной интенсивности изнашивания I_h в зависимости от относительной площади микрокарманов γ_a на поверхности покрытия

Основные выводы:

1. Анализ тенденций развития современного вакуумного технологического оборудования выявил, что для повышения качества выпускаемой на этом оборудовании продукции необходимо учитывать потоки частиц износа из механизмов с твердосмазочными покрытиями, работающих в вакууме.
2. Анализ методов нанесения и характеристик твердосмазочных покрытий позволил рекомендовать, – как наиболее перспективное, – покрытие на основе MoS_2 , получаемое вакуумным ионно-плазменным нанесением на поверхности пар трения.
3. Для повышения достоверности и ускорения выбора параметров технологического оборудования и режимов нанесения ТСП рекомендуется использовать созданную базу данных "Вакуумные методы нанесения покрытий".
4. Для выбора наиболее рациональных режимов нанесения и параметров пар трения рекомендуется использовать впервые разработанную модель изнашивания тонкопленочного

- ТСП. Установлено, что параметр шероховатости R_a подложки, для покрытия, формируемого ионно-плазменным нанесением MoS_2 должен составлять не более 0,5 мкм.
5. Для определения вакуумных и фрикционных характеристик механизмов вакуумного технологического оборудования рекомендуется использовать оригинальный стенд, оснащенный средствами измерения потока частиц износа из механизмов, работающих в вакууме.
 6. Для варьирования параметрами износа (интенсивностью изнашивания и потоком частиц) пар трения рекомендуется использовать оригинальную операцию формирования микро-рельефа на поверхности трения с помощью автономного источника ионов. Рекомендуемый диапазон значений относительной площади микрорельефа - $\gamma_a = 0,3-0,5$.
 7. Узлы трения с ИПН MoS_2 рекомендуется использовать в многокамерных (кластерных) установках типа "Оратория 36-200", а при выборе покрытия для других условий эксплуатации может использоваться автоматизированная экспертная система по технологиям нанесения и характеристикам ТСП.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Панфилов Ю.В., Беликов А.И. Использование технологических методов формирования тонкопленочных покрытий изделий электронной техники в общем машиностроении // Тонкие пленки в электронике: Материалы VI Международного Симпозиума. - М., 1995. - С.74-78.
2. Панфилов Ю.В., Беликов А.И. Систематизация методов нанесения тонких пленок в вакууме // Тонкие пленки в электронике: Материалы VIII Международного Симпозиума. - Харьков, 1997. - С.388-392.
3. Панфилов Ю.В., Беликов А.И. Вакуумные методы формирования покрытий для прецизионных пар трения // Высокие технологии в промышленности России: Материалы 2-й Российской конференции. - М., 1997. - С.25-31.
4. Панфилов Ю.В., Беликов А.И. Расчет допустимой дозы привносимой дефектности интегральных микросхем и выбор класса чистоты производственного помещения: Учеб. пособие по курсу "Основы расчета и конструирования вакуумного технологического оборудования". - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. - 24 с.