

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи  
(561.4) (565.2)

**Камилов Мухаммад**

**Влиятельность покрытий на фрикционные свойства пар**

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание степени магистра

по специальности 5A520910 – Эксплуатация авиадвигателей и  
летательных аппаратов

**Научный руководитель: д.т.н., проф. Сайдахмедов Р.Х.**

Ташкент – 2010 г

## ВВЕДЕНИЕ

Современная авиастроительная промышленность уделяет большое внимание вопросам повышения надёжности, экономичности и ресурса выпускаемых машин. Проблема надёжности авиационной техники на современном этапе развития авиационной промышленности неразрывно связана с обеспечением безопасности полетов и постоянно приобретает все большую актуальность.

Надёжность авиационной техники закладывается при проектировании, отрабатывается на стадии доводки, обеспечивается в производстве, ремонте и при эксплуатации техники. Многолетний опыт ремонта эксплуатации авиационной техники показал, что большинство неисправностей и отказов возникает вследствие недопустимого большого износа деталей и узлов, обусловленного повреждением поверхностей трения. Большинство деталей авиационной техники восстанавливается различными технологическими методами. Однако значительная их часть бракуется по причине повышения износа и отсутствием технологии на их восстановление. Для упрочнения и восстановления деталей ЛА применяют различные прогрессивные методы: электронно-лучевые, лазерные, плазменные, ионно-плазменные, гальванические и другие. Задача расширения номенклатуры восстанавливаемых деталей авиационной техники вызывает необходимость внедрения в практику новых и совершенствование существующих методов поверхностного упрочнения, нанесения износостойких покрытий, которые резко увеличивают усталостную прочность, коррозионную стойкость и износ материалов деталей ЛА.

Одним и наиболее важным показателем эксплуатации деталей летательных аппаратов является его износостойкость и фрикционные свойства. Износостойкость деталей летательных аппаратов может быть повышена, благодаря такому изменению поверхностных свойств материала, при котором

контактная поверхность детали будет наиболее эффективно сопротивляться абразивному, адгезионному, коррозионно-окислительному износам. Так же материал детали должен обладать достаточным запасом прочности при сжатии, изгибе, приложении ударных нагрузок.

Одним из способов решения вопросов повышения надежности и долговечности деталей летательных аппаратов является создание на их поверхности защитного износостойкого покрытия.

В настоящее время определены и применяются несколько основных методов осаждения износостойких покрытий. Из множества видов упрочняющих технологий наибольшее распространение получили технологии физического (PVD) и химического (CVD) нанесения износостойких покрытий.

В рамках этих технологий наносятся однослойные покрытия из нитридов, карбидов и карбонитридов титана, а также многослойные покрытия, включающие различное сочетание слоев из вышеперечисленных соединений.

При осаждении покрытий возникает ряд проблем, которые необходимо решить. Одна из них связана с необходимостью получения качественного покрытия обладающего высокой адгезией с металлической подложкой и одновременно низкой адгезией с контртелом при эксплуатации деталей.

Другая состоит в том, что покрытие должно обладать высокой твердостью и теплостойкостью, быть не хрупким и достаточно трещиностойким под действием термических напряжений, вызываемых нагревом металлической подложки с покрытием.

Эксплуатационные свойства изделий с покрытиями во многом определяются их структурой, химическим и фазовым составом и как следствие технологическими режимами формирования. Таким образом, весьма важным является установление влияния структуры, химического и фазового состава, а также технологических параметров на свойства покрытий. Весьма важным также является синтез покрытий нового состава, а также изучение их свойств.

**Цель исследований.** Исследование влияния состава покрытий на фрикционные свойства деталей летательных аппаратов, формируемых ионно-плазменным методом.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить анализ существующих способов получения упрочняющих покрытий и изучить их влияние на фрикционные свойства.
2. Выявить влияние состава на фрикционные свойства покрытий.
3. Выработать практические рекомендации по назначению технологических режимов нанесения покрытий, обеспечивающих необходимый комплекс эксплуатационных свойств.

**Научная новизна.** Заключается в установлении зависимости фрикционных свойств покрытий, от состава.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях «Перспективы развития авиационной техники и технологий» 2009г.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит 66 страниц машинописного текста, 23 рисунков, 21 таблиц и состоит из введения, 3 главы, выводов, списка литературы, включающего 39 источников и приложения.

# 1. МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПАР

## 1.1. Конструкционные материалы узлов трения

Выбор конструкционных материалов деталей узлов трения при стремлении к высоким эксплуатационным характеристикам представляет собой одну из базовых проблем трибологии [1-9]. Такая задача рассматривается специалистами в области трибоматериаловедения.

Основными задачами трибоматериаловедения являются отбор известных и создание новых материалов, обладающих оптимальными для данного узла трения характеристиками, обеспечивающими необходимый ресурс. При этом, помимо достижения необходимых эксплуатационных свойств, требуется учитывать экономические соображения исходя из рыночных условий. Поэтому трибоматериаловедение обычно решает компромиссные задачи целесообразного соотношения между уровнем эксплуатационных характеристик и себестоимостью.

Все материалы узлов трения можно разделить на две группы: антифрикционные и фрикционные. Первые применяются при создании подвижных соединений с низким трением и высокой износостойкостью: подшипников качения и скольжения, шарнирных соединений, направляющих для ползунов, эксцентриковых и кулачковых механизмов и т.д. Фрикционные применяются в тормозах, фрикционных передачах и муфтах. Они должны обладать не только высоким и стабильным коэффициентом трения, но и высокой износостойкостью.

При выборе материалов узлов трения должна учитываться их совместимость, в особенности использование схватывания и последующего задира, что связано с химическим сродством, близостью строения и значений параметров кристаллических решеток. В более общей форме под совместимостью понимают способность материалов обеспечивать оптимальные параметры

узла трения при длительной эксплуатации, быстро приспосабливаться к резким изменениям нагрузки, скорости и температуры при неблагоприятных условиях смазки.

Процесс приработки должен заканчиваться образованием на поверхностях трения тонких слоев вторичных структур, предохраняющих материал от схватывания и задиров, а также равновесной шероховатости, необходимой для обеспечения стабильного значения коэффициента трения.

В этой области наукой еще не вполне раскрыты механизмы самоорганизации в зоне контакта и пути воздействия на способность пар трения к самоорганизации, когда система сама формирует оптимальную микрогеометрию поверхностей, защитные пленки, перестраивает структуру поверхностных слоев металла, меняет твердость в целях сохранения нормального функционирования. Перспективным в этом направлении является создание на трущихся поверхностях самоорганизующие тонкие слои–покрытия, с целью, которой использует физические и химические методы синтеза покрытий на поверхности деталей.

### **1.1.1. Металлические антифрикционные материалы**

Антифрикционные материалы используются преимущественно в ответственных узлах, подшипниках, шарнирах, направляющих скольжения и качения, распределительных валах, клапанных и кулачковых механизмах и т.д.

Цапфы подшипников скольжения обычно изготавливают из сталей и чугунов.

Наиболее часто применяют легированные стали: марганцовистые (35Г2, 40Г2, 45Г2, 50Г2 и др.), хромомолибденовые (30ХМ, 3ХМА, 35ХМ, 38ХМ), хромоникелевые (40ХН, 45ХН, 30ХН3А и др.), хромоникелевые с бором (30ХНР, 40ХНР) и хромомарганцовистоникелевые с бором (40

ХГНР). Детали подвергают либо объемной закалке с отпуском, либо поверхностной закалке токами высокой частоты (ТВЧ).

Для подшипников скольжения (вкладышей, втулок шарниров и др.) используются различные антифрикционные сплавы. К ним относятся сплавы на медной, цинковой, алюминиевой и оловянно-свинцовой основах. Последние получили название баббитов. Изредка применяют антифрикционные чугуны с графитными включениями.

Баббиты и чугуны применялись на начальном этапе развития техники и имеют лишь историческое значение. По мере роста мощности двигателей, ужесточения режима эксплуатации, снижения металлоемкости произошел переход к более твердым подшипниковым материалам на медной, цинковой и алюминиевой основах, хорошо совместимых со сталями.

Медные антифрикционные материалы разделяются на бронзы и латуни. Бронзы - это сплавы меди с оловом и другими элементами. У них цинк и никель не являются главными легирующими компонентами. Наиболее распространены оловянистые бронзы. Не основными легирующими элементами являются свинец, никель, фосфор, цинк, железо и др.

Меньшее распространение, чем бронзы, получили латуни. Наиболее часто в качестве антифрикционных материалов используют кремнистые и марганцовистые латуни, а также алюминиево-железистые.

В качестве подшипниковых материалов успешно применяются цинковые сплавы с легирующими элементами в виде меди, алюминия, магния. Низкая температура плавления (400 °С) и повышенная размягчаемость обеспечивают хорошую прирабатываемость. Из них делают биметаллические вкладыши подшипников скольжения. В стальной стакан заливается цинковый сплав, который ровным слоем покрывает внутреннюю поверхность. Другим способом изготовления вкладышей является штамповка их из биметаллической полосы, состоящей из стали и цинкового сплава и получаемой ме-

тодом горячей прокатки. Такие вкладыши используются в некоторых видах тракторных двигателей.

В настоящее время широкое распространение получили антифрикционные сплавы на основе алюминия. Алюминиевые сплавы обладают сравнительно высокой прочностью, коррозионной стойкостью, дешевы и не дефицитны, имеют низкую плотность и высокую теплопроводность. В качестве легирующих элементов используются олово, медь, никель, кадмий, кремний, железо, марганец, титан и другие элементы. Наибольшее распространение получил сплав А020-1 (1 %-Ca, 20 % - Sn, 0,02 - 0,1% - Ti, остальное - Al). Биметаллические вкладыши изготавливаются путем совместной прокатки с последующей штамповкой. При нарушении режима гидродинамической смазки и возникновении металлического контакта на поверхности вкладыша и цапфы образуется защитная пленка мягкой фазы - олова, внутри которой и локализуются сдвиговые деформации.

### **1.1.2. Антифрикционные материалы, получаемые из порошков и пластмасс**

Одним из направлений получения антифрикционных материалов является создание порошковых антифрикционных композитов. Изделия (втулки, вкладыши подшипников) получают методом порошковой металлургии. Сначала составляется смесь из порошков необходимых веществ, которая после тщательного перемешивания прессуется в виде изделия и спекается. Если это необходимо, то осуществляется механическая отделочная обработка изделия и насыщение пор смазкой. Наиболее распространены материалы на основе меди и железа.

Материалы на основе меди получили широкое применение из-за хороших антифрикционных свойств и высокой электропроводности, например, в скользящих электроконтактах в щётко-коллекторных узлах электродвигате-

лей и генераторов и т.д. Типичным представителем этой группы являются медно-графитовые компоненты с содержанием графита до 75 %. Для улучшения свойств электрощеточных материалов в них добавляют олово, цинк, свинец. Графит обеспечивает смазывание контакта и электропроводность.

В качестве подшипниковых материалов также используются пористые оловянные бронзы. Они применяются в подшипниках, работающих в легком режиме при небольших скоростях скольжения (менее 1,5 м/с) и номинальных давлениях (0,5 - 1 МПа). Благодаря смазке, содержащейся в порах, они могут работать без наполнения маслом до 5000 ч при температуре от – 60 до +120 °С с коэффициентом трения 0,01 - 0,04. Эти подшипники используются в маломощных электромоторах и генераторах, пусковых установках ДВС. В табл. 1.1 приведены сведения о некоторых оловянистых бронзах.

**Таблица 1.1**

**Свойства оловянистых бронз**

| Марка       | Массовая доля Sn, % | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Пористость, % | Предел прочности $\sigma_B$ , МПа | Твердость НВ, МПа |
|-------------|---------------------|------------------------------|---------------|-----------------------------------|-------------------|
| Бр010       | 10                  | 6 - 7                        | 20 - 30       | 20 - 35                           | 60 - 75           |
| Ст100 США)  | 9,5 - 10,5          | 6,4 - 7,2                    | ---           | 40 - 50                           | 100 - 120         |
| SM500 (ФРГ) | 10                  | 5,6 - 11                     | ---           | ---                               | ---               |

Обычно стальная лента сначала покрывается электролитическим слоем меди, на которую наносится порошок свинцовистой бронзы. Порошок припекается к ленте в конвейерной печи. После припекания производится обжатие ленты методом прокатки. Из ленты штампуют заготовки вкладышей, которые затем механически обрабатываются. На заключительной стадии элект-

тролитическим способом наносится слой мягкого металла (свинца, олова, меди, индия).

Аналогичным способом получают и используют спеченные латуни, сложно-легированные бронзы. Помимо графита, в качестве самосмазывающей добавки используют дихалькогениды металлов: дисульфиды, диселениды, дителлуриды и др.

В последнее время в России и за рубежом используются металлофторопластовые материалы. Они обладают широким диапазоном эксплуатационных свойств, способны работать без смазки в агрессивных средах, в вакууме, при температуре от  $-200$  до  $+300$  °С. Подшипниковые вкладыши состоят из стальной основы, тонкого припеченного слоя высокооловянистой бронзы (до 0,3 мм), поры которого заполнены смесью фторопласта с дисульфидом молибдена.

Помимо сплавов на медной основе, все большее применение находят антифрикционные алюминиевые сплавы. Технология изготовления вкладышей такая же, как при использовании медных сплавов. Поры пропитываются маслом, вводятся твердосмазочные добавки. В США в подшипниках автомобильных двигателей применяются вкладыши из стальной ленты с припеченным порошком свинцово-оловянного сплава. Технология та же, что при изготовлении вкладышей из свинцовой бронзы.

С увеличением содержания графита улучшаются антифрикционные свойства, однако снижается прочность. Содержание графита обычно не превышает 10 % от общей массы. В качестве легирующих элементов к железу добавляют медь, серу, фосфор. Медь повышает прочность и улучшает спекаемость. Её содержание колеблется от 0,5 до 20 %.

Применение железографитовых подшипников позволяет экономить большое количество сплавов цветных металлов, бронзы, баббита. В ряде случаев железографитовые подшипники скольжения могут успешно заменить шариковые и роликовые подшипники качения. Наличие графита и запас

жидкой смазки в порах придают металлокерамическим подшипникам свойства самосмазывающихся, что уменьшает опасность выхода из строя узлов трения из-за недостаточной смазки.

В настоящее время решена задача изготовления металлокерамических поршневых колец для двигателей внутреннего сгорания. Такие поршневые кольца имеют более высокую износостойкость по сравнению с обычными чугунными. Они работают до выхода из строя на 30-45 тысяч километров пробега автомашин больше, чем чугунные, и на 30 % меньше изнашивают цилиндры двигателя.

Расширяется также применение пористых спеченных подшипников, пропитанных фторопластом. Такие подшипники весьма перспективны для несмазываемых опор скольжения благодаря высоким антифрикционным свойствам фторопласта. Коэффициент трения подшипников, пропитанных фторопластом, без смазки составляет примерно 0,05. Они надежно работают при температурах до 280 °С в кислых и щелочных средах.

Разработаны антифрикционные спеченные материалы для подшипников газовых и паровых турбин, работающих при высоких температурах. Для получения этих деталей используют порошки хромоникелевых сталей типа Х18Н15, ХЗН18 с добавками в шихту дисульфида молибдена. Спеченные материалы имеют плотность, превышающую 90 %. Более низкая стоимость пористых спеченных подшипниковых материалов по сравнению с бронзой и баббитом стимулирует дальнейшее развитие этого направления разработки триботехнических материалов и технологий.

## **1.2. Методы воздействия на поверхность деталей ЛА с целью улучшения фрикционных свойств**

Весьма перспективна возможность значительного улучшения фрикционно - износных характеристик некоторых пар трения при граничной смазке за счет реализации эффекта избирательного переноса, открытого Д. Н. Гаркуновым и И.В. Крагельским в 1965 году. Следует отметить еще две работы трибологов, также удостоенных дипломами за открытия: эффекта аномально низкого трения при бомбардировке ядрами гелия некоторых материалов (А. А.Силин, М. А. Тальрозе, Е. А. Духовский и др.) и явления водородного изнашивания (А. А. Поляков, Д. Н. Гаркунов).

Вопросы развития триботехники можно подразделить на следующие части, которые содержат самостоятельные этапы:

- 1) учение о трении и изнашивании деталей машин;
- 2) конструктивные решения вопросов трения и изнашивания;
- 3) технологические методы повышения износостойкости деталей;
- 4) эксплуатационные мероприятия по повышению долговечности машин.

Важной задачей триботехники является разработка методов борьбы с водородным изнашиванием. В СНГ было экспериментально обнаружено неизвестное ранее явление концентрации в поверхностных слоях трущихся деталей водорода, выделяющегося из материалов пары трения и из окружающей среды. Это явление вызывает ускорение изнашивания. Водородное изнашивание характеризуется интенсивным выделением водорода в результате трибодеструкции водородсодержащих материалов, ускоряемым механохимическим действием. Кроме того, оно характеризуется диффузией водорода в деформируемый слой стали и особым видом разрушения, связанным с од-

новременным появлением большого числа «зародышей» трещин во всей зоне деформирования, и упомянутым накапливанием водорода. Водородное изнашивание вносит новые представления о механизме хрупкого разрушения.

Защита от водородного изнашивания имеет особое значение и в авиатехнике (узлы трения топливных насосов, а также тормозные колодки и барабаны колес выходят из строя в результате водородного изнашивания). В авиационной технике расширяется применение титана и его сплавов, при трении эти материалы, обладая низкими антифрикционными свойствами, весьма сильно поглощают водород и подвергаются водородному изнашиванию.

До последнего времени генеральным направлением по борьбе с изнашиванием в машиностроении было повышение твердости трущихся поверхностей детали. В промышленности разработано большое количество методов повышения твердости деталей (хромирование, азотирование, цементирование и т. д.). Многолетний опыт свидетельствует, что это направление позволило в большей степени повысить надежность трущихся деталей машин. Однако постоянное стремление к уменьшению массы машин и повышению интенсификации рабочих процессов привело к увеличению давлений в узлах машин и скоростей скольжения и ухудшило условия смазывания. Кроме того, требования к повышению КПД механизмов, а также применение специальных смазочных материалов и жидкостей привело к тому, что традиционные методы увеличения износостойкости деталей повышением их твердости во многих случаях перестали себя оправдывать. В процессе поиска средств увеличения износостойкости деталей машин открыт избирательный перенос при трении.

Технологические методы являются актуальным направлением повышения износостойкости деталей и обеспечения фрикционных свойств пар трения.

### 1.2.1. Методы получения износостойких покрытий

Методы получения покрытий в вакууме можно разделить на термические, газофазные и ионно-плазменные.

Термические методы основаны на конденсации молекулярных и атомарных пучков материала, получаемых в результате резистивного, электронно-лучевого или лазерного нагрева [10]. Продукты испарения, состоящие из атомов, молекул и микрокапельной фазы, изотропно разлетаются над поверхностью мишени и, попадая на поверхность подложки, конденсируются. В силу тепловой природы процесса испарения энергия конденсирующихся частиц не превышает 0,3 эВ, а степень ионизации продукта испарения практически равна нулю. Структура и физико-механические свойства покрытий регулируются температурой основы, скоростью конденсации пара и степенью вакуума. В процессе конденсации температура основы должна быть не ниже (0,3-0,5) температуры плавления покрытия. Этими методами получают покрытия из металлов, неметаллов, полупроводников и других соединений. Методы газофазного осаждения (ГФО) основаны на подаче в тепловой реактор летучих соединений металлов (в основном хлоридов) в смеси с водородом и добавками азота, метана и кислорода. В зарубежной литературе данный метод назван CVD (Chemical Vapour Deposition)-химическое паровое осаждение. С помощью этого метода можно получить покрытие либо из чистого металла, либо из его соединений с азотом, углеродом или кислородом. Основное условие получения покрытия - поддержание температуры на уровне, превышающем температуру разложения хлорида металла в атмосфере водорода. Однако для получения качественных покрытий из соединений (нитридов, карбидов и оксидов) необходимо поддержание температуры основы на уровне, превышающем  $0,3 \cdot T_{\text{пл}}$  этих соединений, т.е. выше 600-800 °С. По

этой причине метод ГФО малопригоден для обработки большинства конструкционных машиностроительных материалов.

Вакуумные ионно-плазменные методы универсальны по возможности получения широкой гаммы монослойных, многослойных и многокомпонентных покрытий на базе нитридных, карбидных, карбонитридных, оксидных, боридных и других соединений тугоплавких металлов IV-VI групп Периодической системы элементов Д. И. Менделеева [10, 11].

При вакуумном ионно-плазменном осаждении покрытий важную роль играют ионы или плазма. Плазма активирует плазмохимические реакции между атомами металла и реактивного газа или способствует образованию ионов компонентов металла или газа, поток которых воздействует на подложку перед и в процессе осаждения покрытия. Перед нанесением покрытия на подложку воздействуют высокоэнергетические частицы, что повышает прочность сцепления покрытия с основой, а также оказывает влияние на структуру, плотность покрытия и величину внутренних напряжений. При помощи этих методов можно наносить покрытия при низких температурах подложки, что наиболее перспективно для инструментов из быстрорежущих сталей.

Ионно-плазменные методы удобно разделить на три группы, взяв за основу признак, из какой фазы (атомарной, ионной или плазменной) происходит формирование покрытия. В свою очередь каждую группу можно разделить на подгруппы по технической реализации метода. По используемой фазе вещества для получения покрытий методы подразделяют на ионное распыление (cathode sputtering), ионное осаждение (ion plating), плазменное напыление (ion bond).

Методы ионного распыления принято подразделять в основном на катодное и магнетронное распыление. В данных методах мишень, изготовленная из материала покрытия, распыляется при бомбардировке положительными ионами высокой энергии в плазме разряда вспомогательного газа. Продукты распыления, состоящие из атомарной фазы вещества мишени, осаж-

даются на поверхность основы и образуют покрытие. Системы распыления классифицируют по количеству электродов (диодные, триодные, тетродные), виду используемого напряжения (постоянное, высокочастотное), наличию или отсутствию потенциала на подложке (со смещением, без смещения).

В наиболее простом случае система распыления состоит из двух электродов, помещенных в вакуумную камеру (рис. 1.1). Распыляемую мишень 1 располагают на катоде, а на другом электроде на расстоянии в несколько сантиметров от катода устанавливают изделия (подложки). Между двумя электродами поддерживается самостоятельный тлеющий разряд газа на постоянном или высокочастотном токе. Атомы мишени, распыленные ионами газа, направляются к подложке и, осаждаясь на ней, образуют покрытие.

Усовершенствование катодных распылительных систем позволило создать так называемые магнетронные распылительные системы [12,13]. Главный отличительный признак магнетронных систем - наличие под мишенями магнитов, арочного магнитного поля над мишенью.

При диодном распылении постоянного тока разряд поддерживается с помощью вторичных электронов, выпущенных катодом под воздействием ионной бомбардировки. Электроны, не встречающие молекул газа, отходят от катода в перпендикулярном направлении и захватываются анодом (рис. 1.2 а).

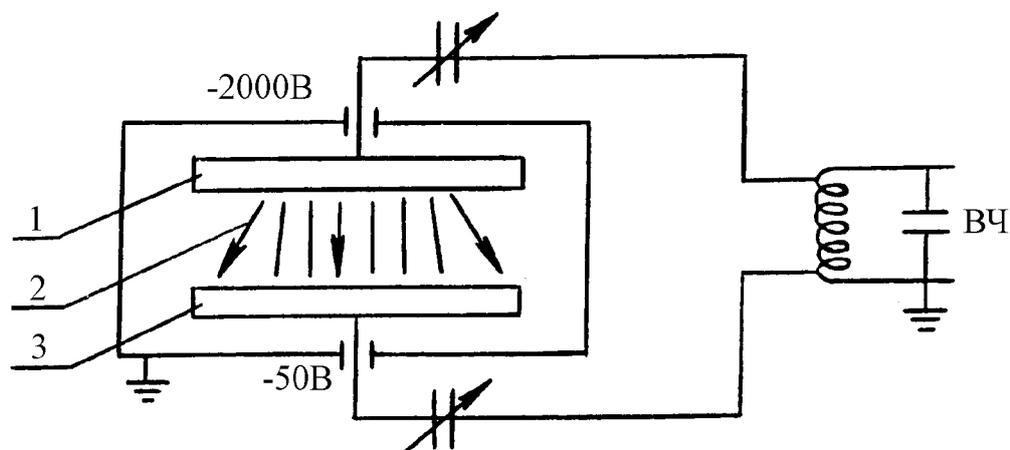


Рис.1.1. Диодная схема ионного распыления с высокочастотным (ВЧ) разрядом: 1-мишень; 2-распыленный материал;3-подложка.

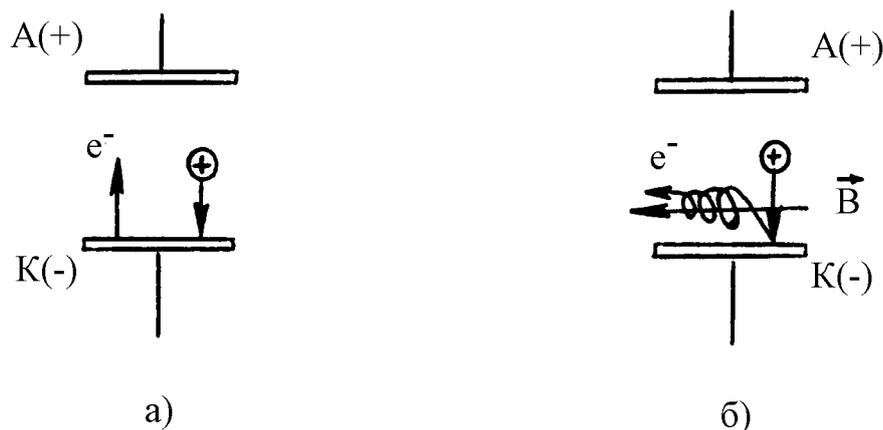


Рис 1.2. Механизм магнетронного эффекта .  
а- диодная система; б- магнетронная система.

Если над электрическим полем перпендикулярно расположить магнитное поле  $B$ , т.е. параллельно катоду и очень близко от него (рис 1.2 б), то электронные траектории обвиваются вокруг линии магнитного поля, что значительно увеличивает возможности ионизации газовой молекулы вблизи катода. Эффективность ионизации вторичных электронов, выпущенных катодом, повышается благодаря удлинению их траектории.

Ионная плотность возрастает в зоне, близкой от катода, где ионы легче притягиваются катодом, что приводит к увеличению скорости напыления.

Различают две геометрические формы магнетронов:

-плоские (круглые и прямоугольные);

-цилиндрические (стержневые катоды и полые цилиндрические магнетроны);

Конструкция круглого магнетрона показана на рис.1.3.

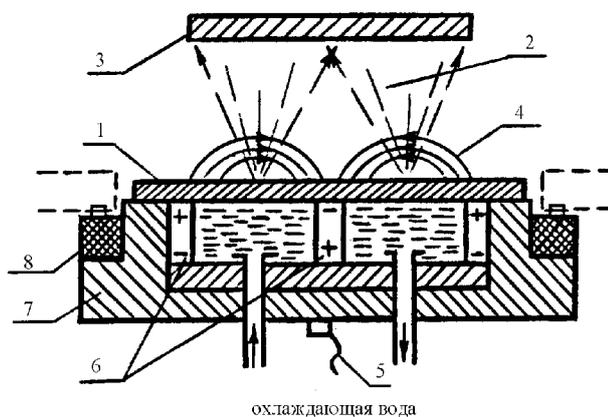


Рис.1.3. Конструкция круглого магнетрона.

1-мишень; 2- распыленный материал; 3- подложка; 4- магнитное поле; 5- высокое напряжение; 6- постоянные магниты; 7- корпус; 8-изолятор.

Методы ионного осаждения развивались в связи с необходимостью повышения прочности сцепления покрытий, получаемых термическими методами, а также увеличения производительности и скорости роста покрытий, получаемых методами ионного распыления [10]. Метод ионного осаждения впервые предложен Д. М. Мэттоксом в 1974 г.[12]. Сущность его заключается в испарении материала, дальнейшей ионизации и ускорении по направлению к поверхности детали под действием приложенного к ней отрицательного потенциала.

Испарение металла происходит чаще всего электронным лучом в атмосфере тлеющего разряда, который возбуждается между катодом-подложкой и

анодом-испарителем. На подложку подается отрицательный потенциал величины 1-5 Кв.

На рис. 1.4 показана схема установки ионного осаждения с триодной системой и высоковольтной электронно-лучевой пушкой. Испарение материала мишени 1 осуществляется лучом 2 высоковольтной электронно-лучевой пушки 3, электроны, испускаемые накаливаемым катодом 4 и расплавом материала, ускоряются по направлению к дополнительному электроду -аноду 5 и ионизируют испаряемый материал. Нейтральные атомы и ионы пара осаждаются на поверхность основы 6, образуя покрытие.

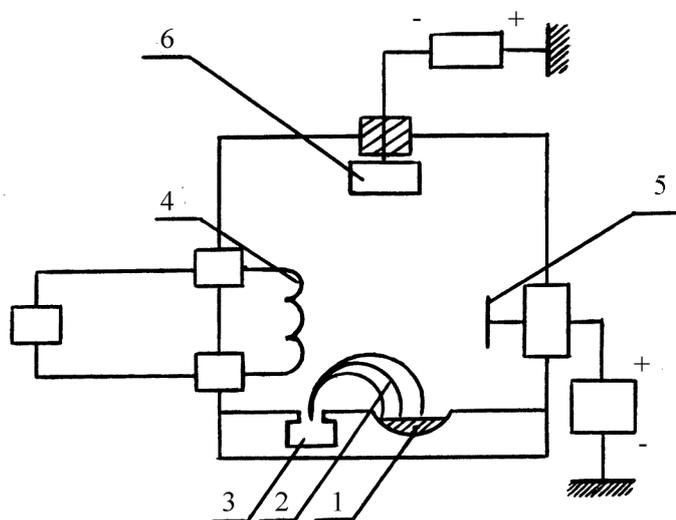


Рис.1.4. Схема установки ионного осаждения с триодной системой и дополнительной ионизацией парообразного материала, испаряемого лучом электронно-лучевой пушки

С помощью этого метода получают покрытия из металлов, а также их нитридов и карбидов. Основным недостатком этого метода является использование дорогостоящего высоковольтного оборудования для получения электронного луча ,а также травление поверхности основы перед напылением , например, на стадии предварительной очистки на изделие может подаваться отрицательный потенциал до 15 Кв [12].

Если при ионном осаждении удастся ионизировать 10-40% атомов пара, то при дуговом испарении материалов катодным пятном вакуумной дуги степень ионизации металлической плазмы достигает 50-90% (см. табл.1.2) [10,14]. Из этого следует, что с применением дугового метода можно добиться большего эффекта по сравнению с другими методами.

Методы получения покрытий с помощью устройств для дугового испарения материалов получили название методов плазменного напыления в вакууме. Одним из этих методов получившим наибольшее распространение является метод КИБ (конденсация покрытий из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой), при котором на подложку оказывается воздействие высокоэнергетических частиц, обеспечивающих очистку поверхности перед нанесением покрытия и повышающих прочность сцепления покрытия с подложкой. Метод КИБ (рис.1.5) разработан Харьковским институтом АН Украины [11] и основан на том, что плазменный поток металла, образующийся с помощью вакуумной дуги с холодным катодом, ускоряется путем приложения отрицательного потенциала к подложке с последующей конденсацией на ней ионов и нейтральных атомов при одновременном прохождении плазмохимической реакции их с реактивным газом. С помощью этого метода можно наносить покрытия как самих металлов, так и

Таблица 1.2

Основные параметры характеризующие установки для нанесения покрытий в вакууме[8]

| Метод нанесения покрытий           | Удельная скорость испарения (распыления), г/(см <sup>2</sup> ·с) | Эффективность процесса испарения (распыления), г/Дж | Степень ионизации, % | Энергия генерируемых частиц, Дж | Скорость осаждения, нм/с | Энергия осаждаемых частиц, Дж | Рабочее давление, Па   |
|------------------------------------|--|---|----------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Ионно-плазменный (электро-дуговой) | $2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$                              | $2 \cdot 10^{-6} - 10^{-5}$                         | 10-90                | $(1,6-16) \cdot 10^{-18}$       | 5                        | -                             | -                      |
| Магнетронное распыление            | $(4-40) \cdot 10^{-5}$   | $3 \cdot 10^{-6}$                                   | -                    | $(1,6-3,2) \cdot 10^{-18}$      | 10-60                    | $(0,32-16) \cdot 10^{19}$     | $(5-50) \cdot 10^{-2}$ |
| Высокочастотное распыление         | $2 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6}$                              | $6 \cdot 10^{-7}$                                   | -                    | $(16-320) \cdot 10^{-19}$       | 0,3-3                    | $(0,32-32) \cdot 10^{19}$     | 0,5-2,0                |

их химических соединений типа нитридов, карбидов, боридов, оксидов, сульфидов, тугоплавких металлов.

При высоком потенциале подложки (1кВ и выше) ускоренные ионы частично распыляют поверхностный слой подложки и одновременно внедряются в подложку и насыщают тонкий приповерхностный слой, что обеспечивает надежную адгезию покрытия к подложке [14 - 16].

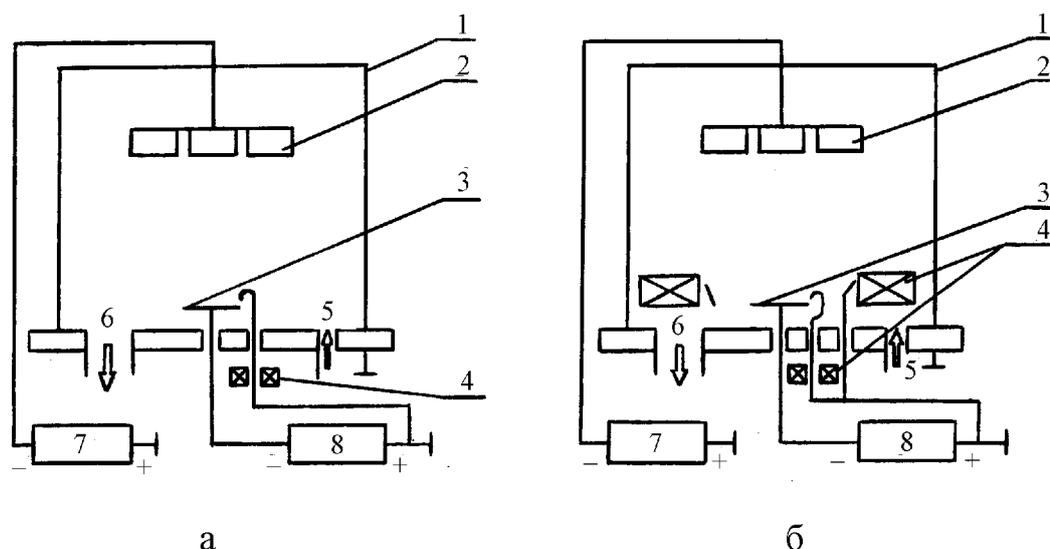


Рис.1.5. Схема установки вакуумного ионно-плазменного метода:

а- вакуумно-плазменная установка обычного типа; б- вакуумно-плазменная установка с плазмооптической системой; 1-вакуумная камера (анод); 2- подложка; 3- испаритель (катод); 4-электромагниты; 5- подача реакционного газа; 6- к вакуумному насосу; 7- источник питания для подачи отрицательного потенциала к подложке;8- источник питания дуги;

Основным узлом вакуумно-плазменной установки является электродуговой испаритель, где испарение металла с поверхности катода происходит благодаря высокой концентрации энергии в катодном пятне электрической дуги.

Для нормальной работы электродугового испарителя необходимо поддерживать катодные пятна на поверхности катода, для чего применяется магнитное поле.

Существенное расширение технологических возможностей электродуговых испарителей связано с дополнительным наложением на плазменный поток электромагнитного поля (рис.1.6) [15]. При наложении внешнего аксиально

расходящегося магнитного поля реализуется режим плазменного ускорителя (холовский торцевой плазменный ускоритель).

В ускорителе имеются две зоны - зона генерации (область катодных микропятен), где процессы не зависят от магнитного поля и определяются лишь видом материала катода, и зона ускорения, на процессы в которой сильное влияние оказывает магнитное поле. Холовский метод реализована на установке модели "Пуск", предназначенной для нанесения износостойких покрытий [15].

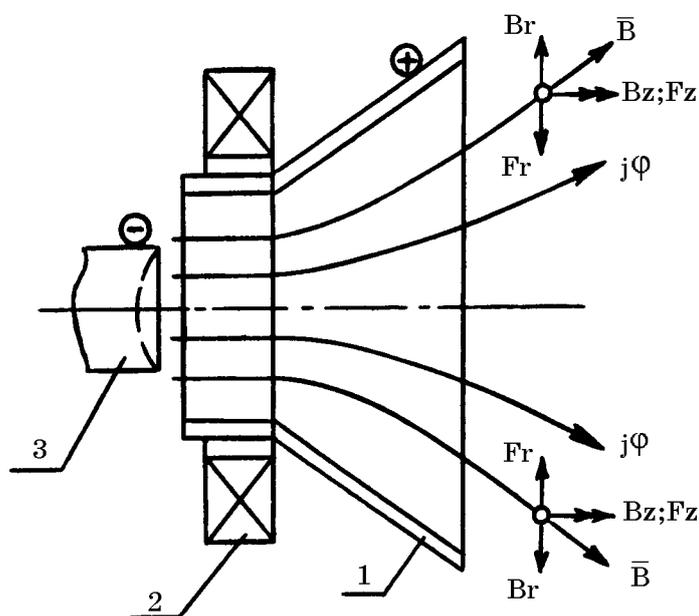


Рис.1.6. Холовский торцевой ускоритель:

1-анод; 2-электромагнитная катушка; 3-катод;  $B_r$  и  $B_z$  - радиальная и аксиальная компоненты аксиально расходящегося магнитного поля;  $j\varphi$  - азимутальный холовский ток;  $F_z$  - сила, приводящая к эффектам фокусировки плазменной струи по оси системы,  $F_z=j\varphi B_r$ ;  $F_r$  - сила ,приводящая к эффектам до ускорения плазмы ,  $F_r=j\varphi B_z$ .

Основные преимущества вакуумного ионно-плазменного метода (КИБ) следующие:

-возможность точного регулирования скорости нанесения покрытий, путем изменения силы тока дуги;

- возможность регулирования фазового и химического состава покрытий, используя катоды из разных материалов или составные (многокомпонентные);
- высокая адгезия покрытий к основе за счет высокой энергии плазменной струи;
- высокая степень ионизации способствует эффективной агломерации зародышей и формированию сплошных пленок минимальных толщин;
- возможность получение покрытий соединений металлов (нитридов, карбидов, оксидов и др.), вводя в камеру реакционный газ;
- использование ЭВМ для управления технологическим процессом нанесения покрытий.

Таблица 1.3

Характеристики ионно-плазменных установок [11,14,18,19]

| Тип установки            | $V_H$ ,<br>мкм/мин | $\tau_H \cdot 10^2$ ,<br>с | $t_u, ^\circ\text{C}$ | $n_u$ ,шт | Размеры ка-<br>меры,мм |     | $N_u$ ,<br>кВт | Организация,<br>разработчик         |
|--------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------|-----------|------------------------|-----|----------------|-------------------------------------|
|                          |                    |                            |                       |           | D                      | h   |                |                                     |
| Пуск79-1*                | 0,05-0,13          | 1,2-<br>1,6                | 330-800               | 1         | 360                    | 450 | 40             | -                                   |
| ИЭТ-8И                   | 0,075              | 10,5                       | 330-800               | 3         | 900                    | 500 | 60             | -                                   |
| “Булат-3Т”               | 0,05-0,13          | 10,8                       | 330-800               | 3         | 500                    | 500 | 47             | ХФТИ<br>г. Харьков                  |
| ННВ-6.6-И1<br>(Булат-20) | 0,13-0,50          | -                          | 330-800               | 3         | 600                    | 600 | 27             | ВНИИЭТО<br>СКБСар.ЗЭТО<br>г.Саратов |
| “Булат-6”                | 0,25-0,83          | -                          | -                     | 3         | 500                    | -   | 48             | -                                   |
| Пуск-79*                 | 0,5-1,0            | -                          | -                     | 2         | 360                    | 450 | 16             | НИИТ автопром,<br>г. Москва         |
| Пуск-83*                 | 0,4-0,8            | -                          | -                     | 2         | 300                    | 400 | 15             | НИИТ автопром,<br>г. Москва         |
| ННВ 9,5-И1<br>(Булат-21) | 0,13-0,50          | -                          | -                     | 4         | 900                    | 500 | 35             | ВНИИЭТО<br>СКБСар.ЗЭТО<br>г.Саратов |

|                        |           |   |   |   |                     |      |    |                                     |
|------------------------|-----------|---|---|---|---------------------|------|----|-------------------------------------|
| ННВ 6.10-И1 (Булат-22) | 0,13-0,50 | - | - | 4 | 600                 | 1000 | 35 | ВНИИЭТО<br>СКБСар.ЗЭТО<br>г.Саратов |
| ИЭТ-8-И2 (Булат-23)    | 0,13-0,50 | - | - | 2 | 900                 | 500  | 20 | ВНИИЭТО<br>СКБСар.ЗЭТО<br>г.Саратов |
| Булат-2-УЗ             | 0,08-0,30 | - | - | 3 | 600                 | 600  | -  | Укроргсманкин<br>пром, г. Харьков   |
| Юнион                  | 0,50-0,80 | - | - | 2 | 600                 | 600  | 20 | НПО"Ритм", г.<br>Белгород           |
| ВУ-15                  | 0,30-0,50 | - | - | 1 | 600                 | 540  | 15 | СМЗ, г.Сморгонь                     |
| Титан 14               | -         | - | - | 4 | V=0,4м <sup>3</sup> |      | -  | ГФВТ, Болгария                      |
| Титан 17               | -         | - | - | 7 | V=1м <sup>3</sup>   |      | -  | ГФВТ, Болгария                      |
| Титан 22*              | -         | - | - | 2 | V=0,4м <sup>3</sup> |      | -  | ГФВТ, Болгария                      |

\* Двухкамерная установка.

Примечание:  $V_H$  - скорость нанесения покрытия;  $\tau_{II}$  - полное время процесса;  $t_{II}$  - температура изделия;  $V$  - объем камеры;  $n_{II}$  - количество испарителей;  $h, D$  - высота и диаметр камеры соответственно;  $N_y$  - мощность установки; ГФВТ - Государственная фирма вакуумных технологий (Болгария).

В настоящее время в промышленности используется несколько модификаций ионно-плазменных установок, некоторые характеристики которых приводятся в табл. 1.3.

Основными техническими характеристиками ионно-плазменных установок являются: скорость осаждения -  $V_H$ ; продолжительность процесса -  $\tau_{II}$ ; температура подложки (изделия) -  $t_{II}$ ; мощность установки -  $N_y$ ; размеры вакуумной камеры -  $h$  и  $D$ ; количество испарителей -  $n_{II}$ .

Основные отличия приведенных моделей заключаются в скорости испарения материала катода, количестве, форме и размерах вакуумных камер, количестве и расположении электродуговых испарителей по камере установки.

Наилучшими возможностями по скорости нанесения покрытий можно выделить установку "Пуск-79".

Установки ННВ6.10-И1 (Булат-22) и “Титан-17” предназначены для нанесения покрытия на длинномерные детали. На установке “Титан-17” можно наносить равномерные покрытия на детали длиной до 1,5 м[19], в котором сеть испарителей расположена по двум противоположным образующим цилиндра: три с одной стороны и четыре с другой, стороны - соответственно в шахматном порядке.

## **2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ**

### **2.1.1. Фрикционные свойства покрытий**

Процесс затупления инструмента при обработке материалов представляет сложный комплекс явлений физико-механического, теплового и химического характера, которые происходят при резании в непосредственной близости к лезвию. Упрочняющие слои для режущего инструмента должны обладать высокой твердостью и в то же время не снижать теплопроводности инструментального материала. При резании в результате термической деструкции образуются агрессивные вещества, следовательно, упрочненные поверхности должны иметь повышенную коррозионную стойкость. Упрочнение должно производиться таким образом, чтобы после переточки инструмента упрочненные поверхности продолжали выполнять свои функции.

Правильно выбранное покрытие значительно удлиняет жизнь инструмента, обеспечивая дополнительную защиту инструментального материала от трения и высокой температуры.

Используются различные виды покрытий [20]:

Алюмонитрид титана ( $TiAlN$ ), служит превосходным теплоизолятором в операциях обработки, характеризующихся высокими температурами, в том числе без применения СОЖ. Это покрытие характеризуется следующим:

- сопротивление высокотемпературному износу. Покрытие  $TiAlN$  позволяет инструменту сохранять сопротивление износу при высокой температуре, так как имеет температуру плавления приблизительно на 35% больше, чем нитрид титана ( $TiN$ );

- скользящий эффект. Наружный слой покрытия  $TiAlN$  представляет собой оксид алюминия, который является одновременно твердым и скользящим. Хорошо защищая инструмент от износа, оксид алюминия как бы смазывает горячую стружку, чтобы она скользила по поверхности фрезы без теплопередачи

и прилипания. Низкий коэффициент трения делает это покрытие эффективным для обработки графита, чугуна и других абразивных материалов.

Нитрид карбида титана (TiCN). Толстое, многослойное покрытие, которое преимущественно применяется для обработки стали. Недостаток этого покрытия состоит в том, что его нельзя наносить повторно. Инструменты, покрытые однажды TiCN, обычно повторно покрываются TiN.

Покрытие TiCN — недорогое, применяется там, где твердость заготовки меньше 42 HRC и скорость резания не больше 240 м/мин. При этих условиях резания рекомендуется использовать охлаждающую эмульсию.

Нитрид титана (TiN). Это покрытие очень дешевое и хотя не может работать в условиях, в которых работают предыдущие два покрытия, оно является самым универсальным и рентабельным.

Накоплен экспериментальный материал, который позволяет сделать несколько обобщений, касающихся особенностей самого процесса резания инструментами с покрытием и их изнашивания [21]:

- покрытия TiN, TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на инструментах из быстрорежущих сталей и твердых сплавов снижают силы резания (до 20 %), коэффициент укорочения стружки и уменьшают мощность тепловыделений.

- покрытия TiN, TiC обеспечивают многократное (от 2 до 5 раз) повышение стойкости инструментов из быстрорежущих сталей и твердых сплавов при обработке конструкционных углеродистых сталей нормальной и повышенной твердости и малоэффективны при резании труднообрабатываемых материалов. В последнем случае работоспособнее оказались покрытия на основе карбидов и нитридов молибдена, гафния, циркония, а также многокомпонентные и многослойные покрытия различных конструкций;

- в условиях резания в режиме наростообразования уменьшаются размеры нароста;

- работоспособность режущих инструментов определяется свойствами не только покрытия, но и инструментальной основы. Наилучшие результаты следует ожидать в том случае, когда под покрытие разрабатывается специаль-

ная инструментальная основа с повышенными характеристиками прочности и вязкости;

- при резании инструментом из быстрорежущих сталей с покрытием на обеих поверхностях лезвия снижается интенсивность изнашивания задней поверхности и изменяются параметры лункообразования. Переточка по передней поверхности часто приводит к снижению стойкости инструмента до уровня неупрочненного, а по задней — не влияет на стойкость или снижает ее незначительно. Обнаружено также, что покрытие в зоне лункообразования, а часто и на задней поверхности исчезает в первые минуты работы.

В отличие от инструментов из быстрорежущих сталей, твердосплавные инструменты с покрытиями имеют высокую работоспособность до прорыва покрытия на задней либо на передней поверхности, причем покрытие на них остается целым значительно дольше. Кроме того, образование лунки на передней поверхности твердосплавного инструмента существенно сдерживается и происходит сначала без прорыва покрытия путем пластического вдавливания материала основы. После прорыва лункообразование ускоряется. Отмечается вместе с тем, что при частичном разрушении покрытия твердосплавный инструмент продолжает сохранять все же более высокую работоспособность по сравнению с инструментом без покрытия.

Применение TiN покрытия началось с середины прошлого века. С целью повышения износостойкости и регулирования фрикционных свойств покрытий проведено ряд научных работ.

Так, например, в работе [22] изучали поведение образцов из стали с TiN-покрытием на воздухе при скольжении по ним стальных и сапфировых шариков с малой скоростью ( $<0,1 \text{ мс}^{-1}$ ). В случае сапфирового шарика коэффициент трения  $\mu$  в начальный момент был равен 0,05. Затем он непрерывно возрастал до 0,1-0,15. В случае стального шарика начальная величина  $\mu$  составила 0,17 и затем достигала 0,6 пропорционально объему продуктов износа, аккумулированных в дорожках износа в TiN-покрытии. После полирования TiN-покрытия до толщины 4 мкм массоперенос снижался и

$\mu$  находилось в пределах 0,15—0,2. Методами металлографии и электронной микроскопии установлено, что основными продуктами износа являлись  $\text{TiO}_2$  (рутил) и ромбоэдрический тройной оксид системы  $\text{FeTiO}_2\text{—Fe}_2\text{O}_3$ . Обе фазы представлены скоплением очень мелких частиц ( $\sim 10$  мкм), которые трансформировались в тонкие однородные чешуйки при малых значениях  $\mu$  и в сфероидальные скопления при высоких значениях  $\mu$ .

Также в работе [21] были приведены результаты изучения влияния на эти факторы тонкого-износостойкого покрытия  $\text{TiN}$ , нанесенного методом КИБ на подложку из стандартно термообработанной быстрорежущей стали Р6М5 (HRC 63...65). Исследование проведено при точении нормализованной стали 45, которую часто используют для сравнительных испытаний инструментов. Точение является в известной степени модельным видом обработки металлов резанием, и закономерности, выявляемые при точении, в той или иной степени характерны и для других операций резания.

Для сравнения приведены аналогичные характеристики другой пары трения: быстрорежущая сталь-сталь 45. Испытание на трение и износ проводились по схеме цилиндр-плоскость на машине трения СМЦ-2, цилиндр диаметром  $\varnothing 50$  мм выполнен из стали 45, термообработанной на ферритно-перлитную структуру (HB175). Покрытие наносилось на неподвижное контртело — куб с ребром, равным 10 мм, который изготовлен из быстрорежущей стали Р6М5, шероховатость подложки  $R_a = 0,16$  мкм.

Коэффициент трения определяли в зависимости от нормальной нагрузки для трех случаев: трения без смазывания, трения в масле МИХП-3 и СОЖ (3%-ный водный раствор эмульсола ЭТ-2 с добавлением 0,2 %  $\text{Na}_2\text{O}_2$  и 0,5 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Смазывание осуществлялось погружением части контртела в масло или СОЖ- Испытания на износостойкость проводились в среде СОЖ при постоянной нагрузке (500Н) в течение одного часа, после чего определяли ширину выработанной лунки, рассчитывали объем удаленного материала и удельный износ, т.е. объем материала, удаляемый на единицу пути резания.

Зависимость коэффициента трения  $f_{тр}$  от нагрузки (рис.1) имеет сложный характер, хотя в целом преобладает возрастание значения  $f_{тр}$  по мере увеличения нагрузки для пары быстрорежущая сталь — сталь 45 и некоторое снижение — для второй пары при трении в среде масла и СОЖ. Средний уровень  $f_{тр}$  выше при трении по покрытию. Для обеих пар трения минимальные значения  $f_{тр}$  наблюдаются в условиях смазывания маслом, максимальные — при трении без смазки. Указанные закономерности качественно характерны для двух скоростей скольжения: 0,8 и 1,3 м/с.

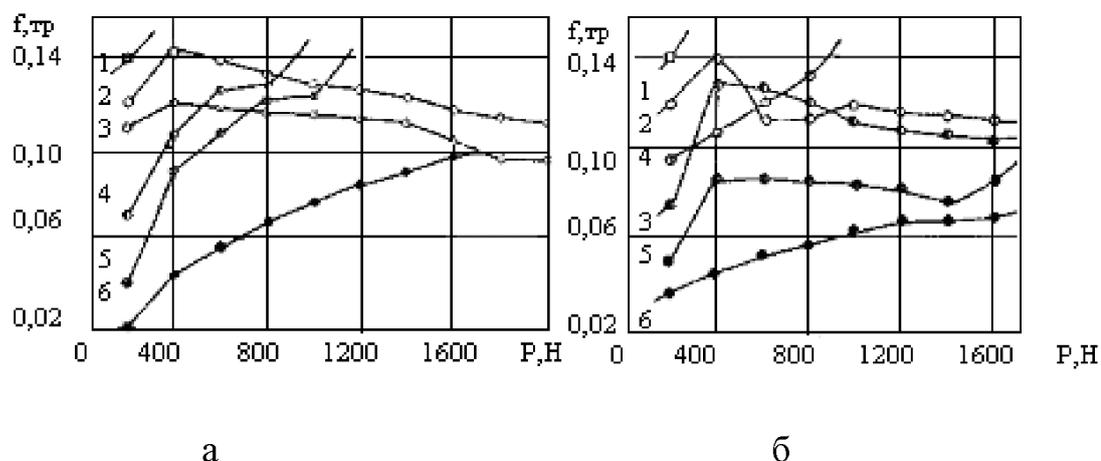


Рис. 2.1 Зависимость коэффициента трения от нагрузки при трении стали 45 по стали Р6М5 и по покрытию TiN (а — 0,8 м/с; б—1,3 м/с):  
 1— TiN, без смазки; 2 —TiN, СОЖ; 3 — TiN, масло; 4 — P5M5, без смазки; 5 — P6M5, СОЖ; 6 — P6M5, масло

На образцах с покрытиями задиорообразование характеризуется, прежде всего, сколом самого покрытия, а подложка разрушается незначительно. При трении по стали Р6М5 задиорообразование сопровождается вырыванием значительных объемов материала. В случае трения без смазки критическая нагрузка задиорообразования  $P_{кр}$  пары покрытие — сталь 45 намного меньше, чем у пары сталь Р6М5 — сталь 45 (табл. 2.1). В условиях смазывания маслом и СОЖ устойчивость против задиорообразования значительно возрастает, причем пары либо имеют одинаковый уровень  $P_{кр}$ , если используется масло, либо он выше для пары покрытие — сталь 45, если применяется СОЖ - это свидетельствует о высокой эффективности смазки, особенно СОЖ, при трении по покрытию, а также о нецелесообразности использования покрытия в условиях трения без

смазывания. Высокая устойчивость покрытий против задиорообразования, очевидно, объясняется их хорошей адсорбирующей способностью по отношению к поверхностно-активным веществам, присутствующим в смазке, и особенно в СОЖ, что связано с развитым микрорельефом поверхности покрытия или пористостью.

Таблица 2.1

Нагрузки задиорообразования при трении стали 45 по стали Р6М5 и по покрытию TiN со смазкой и без нее

| смазка     | образец  | Критическая нагрузка задиорообразования, Н,<br>при скоростях скольжения, м/с |       |
|------------|----------|--|-------|
|            |          | 0,8  | 1,3   |
| Без смазки | Р6М5+TiN | 200  | 200   |
|            | Р6М5     | 800  | 800   |
| СОЖ        | Р6М5+TiN | >2000  | >2000 |
|            | Р6М5     | 1200   | 1600  |
| МАСЛО      | Р6М5+TiN | >2000  | 1800  |
|            | Р6М5     | >2000  | 1800  |

Согласно результатам испытаний на изнашивание (табл. 2.2) покрытие по сравнению со сталью Р6М5 имеет более высокую износостойкость, причем с увеличением скорости скольжения удельный объемный износ покрытия не изменяется, а у стали Р6М5 увеличивается более чем в два раза.

Таблица 2.2

Удельный объемный износ покрытия TiN и стали P6M5 при трении по стали 45 (нормальная нагрузка 500Н, время испытаний 1ч)

| Образец  | Скорость скольжения,<br>м/с | Удельный объемный износ<br>мм <sup>3</sup> /м |
|----------|-----------------------------|---|
| P6M5+TiN | 0,8                         | $1,0 \cdot 10^{-6}$                           |
| P6M5     |                             | $2,5 \cdot 10^{-5}$                           |
| P6M5+TiN | 1,3                         | $1,0 \cdot 10^{-6}$                           |
| P6M5     |                             | $5,2 \cdot 10^{-5}$                           |

Интенсивность изнашивания и уровень  $f_{тр}$  определяются как комплексом свойств материалов, так и условиями фрикционного контакта. Высокая микротвердость покрытия может однозначно коррелировать с его высокой износостойкостью и в то же время определять относительно более высокий коэффициент трения, особенно в начале нагружения, когда в контакт вступают наиболее выступающие участки поверхности, выполняющие роль закрепленного абразива. При этом возможны также высокие значения адгезионной составляющей коэффициента трения, чему способствует интенсивная пластическая деформация поверхности контртела с разрушением окисных пленок и обнажением ювенильных поверхностей. По мере истирания выступающих неровностей и формирования защитных пленок на поверхности покрытия различие между значениями коэффициентов трения покрытия и быстрорежущей стали уменьшается, что подтверждается ходом кривых. Более того, с увеличением нагрузки наступает такой момент, когда коэффициент трения пары с покрытием становится меньше в среде СОЖ это происходит при меньших значениях нормальной нагрузки, чем в масле.

В экспериментах температура фрикционного контакта не фиксировалась. Вместе с тем очевидно, что с повышением скорости вращения цилиндрического контртела температура трения возрастает. Вероятно, именно с этим связано

увеличение удельного объемного износа стали Р6М5 при изменении скорости скольжения от 0,8 до 1,3 м/с. По отношению к температурному фактору покрытие, очевидно, оказывается более стойким, поскольку его удельный объемный износ от скорости скольжения не зависит.

Судя по внешнему виду изношенной поверхности (оптическая микроскопия), покрытие после одночасовых испытаний насквозь не изнашивается. Эти наблюдения совпадают с измерениями максимальной глубины канавки износа. Поверхность покрытия в зоне фрикционного контакта выглядит по сравнению с остальной площадью более темной, что связано, во-первых, с размазыванием капель по поверхности трения и, во-вторых, с окислением покрытия под воздействием повышенных температур в среде СОЖ, на отдельных участках площадки фрикционного контакта, как правило, у периферии наблюдаются сколы покрытия, что определяется наиболее благоприятными условиями для нарушения адгезионной связи покрытия с подложкой. На поверхности трения стальных образцов Р6М5 без покрытия при скорости скольжения 0,8 м/с образуются трещины в этих же условиях при трении по покрытие трещинообразования не наблюдается.

При нагрузке 500 Н и реализуемой геометрии контакта развиваются контактные напряжения, достигающие нескольких десятков мегапаскалей. Аналогичные напряжения возникают при резании на контактных поверхностях режущего инструмента. Высокая износостойкость покрытия и его слабая чувствительность к температуре, очевидно, важны для решения задачи повышения стойкости режущих инструментов, однако нужно учитывать, что покрытие устойчиво к задиробразованию только в случае использования смазки.

При трении контрольных образцов из инструментальных материалов по контртелам из труднообрабатываемых материалов наибольшее снижение силы трения  $F_K$  обеспечивают двухфазные твердые сплавы ВК, причем отмечается тенденция увеличения  $F_K$  по мере роста зернистости этих сплавов и содержания кобальта [23]. Разительное снижение  $F_K$  обеспечивали покрытия на основе нитридов тугоплавких металлов V и VI групп периодической системы элементов

по сравнению с нитридами и карбидами металлов этой группы. При трении по титановым сплавам ВТ16 и ВТ20 особенно заметна малая эффективность покрытий TiC и TiN, однако отмечается тенденция снижения  $F_K$  при трении по титановым сплавам для покрытий из нитридов металлов IV группы следующей последовательности: TiN, ZrN и HfN.

Для труднообрабатываемых сплавов отмечено значительно большее снижение силы трения при нанесении покрытий на основе нитридов металлов V и VI групп, эффективность которых возрастает в следующей последовательности; NbN, CrN и MoN.

На основе проведенных исследований автор [23] делает следующий вывод, что для конструкционных сталей максимальное снижение склонности к схватыванию быстрорежущих сталей и твердых сплавов обеспечивают композиционные покрытия TiC—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ГТ, TiC—TiCN—TiN ГТ (Zr/Hf—Cr)N, (Nb—Zr)N, нанесенных ионно-плазменным методом. Для жаропрочных сплавов на железохромоникелевой основе наилучшие результаты обеспечивают композиционные покрытия (Nb—Zr)N, (Ti/Nb—Cr)N для титановых сплавов — покрытия (Nb- Zr)N и (Zr/Hf-Cr)N, также нанесенных ионно-плазменным методом.

### 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

#### 3.1. Выбор материала образца

В настоящей главе изложены вопросы методики проведения экспериментов. Для проведения исследований были выбраны образцы из Т14К8 и Р9К5 размером 10×10×5 для резца. Выбор этих материалов был обусловлен широким их применением в качестве режущего инструмента для станков с ЧПУ, а также достаточно высокой ценой на данные материалы на мировом рынке, следовательно, изменение эксплуатационных свойств данного материала за счет нанесения покрытий с различными свойствами является актуальной и перспективной задачей.

Точный химический состав определялись с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-6500F фирмы «JEOL» высокого разрешения [24]. Основные характеристики данного микроскопа приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Характеристики микроскопа JSM-6500f

|   |   |
|---|---|
| Ускоряющее напряжение   | От 0.5 до 30кВ  |
| Разрешение (изображение во вторичных электронах)                            | 15 ангстр. (1.5нм) при 15 кэВ<br>30 ангстр. (3нм) в аналитическом режиме (5нА, 15кэВ)<br>50 ангстр. (5нм) при 1 кэВ |
| Увеличение  | от 10 до 500 000  |
| Система управления прибором   | Персональный компьютер с ОС Windows 2000, удобный и интуитивно понятный графический пользовательский интерфейс      |
| Возможности установки дополнительных детекторов и систем микроанализа       | EDS, WDS, CLD, EBSP, EBIC и др.   |
| Перемещение моторизованного столика для образцов с компьютерным управлением | По осям X, Y, Z, (стандарт)<br>вращение, наклон (по доп. заказу)  |
| Размер образца  | До 150мм в диаметре и до 10мм в высоту  |
| Автоматические функции  | Автофокусировка, автоконтраст-яркость, автостигматор  |

Микроскоп JSM-6500F с термоавтоэмиссионным катодом позволяет получить высокий (до 200нА) и стабильный ток зонда, необходимый для микроанализа с использованием не только энергетического, но и волнового спектрометра.

Микроскоп снимает показание с 4-х различных точек, среднее арифметическое и будет показателем марки материала

Первый образец был взят Т14К8 относящийся к твердосплавам. Твердые сплавы представляют собой тугоплавкие, износостойкие металлические материалы, весьма большой твердости; эти свойства сохраняются на достаточно высоком уровне при нагреве сплавов до 900—1000°С, в том числе в процессе эксплуатации инструмента с применением твердых сплавов в режущей части. Твердые сплавы делят на металлокерамические и литые [25,26]. Такое деление обуславливается их применением, составами, формами и структурой, а следовательно, различными физико-химическими свойствами, а также различной технологией производства. Металлокерамические твердые сплавы производят методом порошковой металлургии, Т14К8 относится именно к этой группе.

В качестве второго образца была быстрорежущая сталь-Р9К5. Теплостойкие стали высокой твердости, называемые быстрорежущими, — наиболее характерные стали, используемые для режущих инструментов [27,28]. Они сочетают теплостойкость (600—700°С) с высокой твердостью (HRC 63-70) и повышенным сопротивлением пластической деформации. В результате применения быстрорежущих сталей стало возможным увеличить скорость резания в 2-4 раза (а более новых сталей с интерметаллидным упрочнением даже в 5-6 раз) и повысить стойкость инструментов в 10-40 и более раз по сравнению с получаемыми для инструментов из нетеплостойких сталей. Эти преимущества быстрорежущих сталей проявляются при резании с повышенной скоростью, в условиях нагрева режущей кромки, или при меньшей скорости, но с высоким давлением. Для понимания особенностей свойств и области использования быстрорежущих сталей важно, что снижение их твердости на HRC 2—4 по сравнению с получаемой максимальной может сопровождаться ухудшением вязкости, прочно-

сти и износостойкости. Поэтому быстрорежущие стали необходимо использовать в состоянии высокой твердости и при работе без больших динамических нагрузок.

### 3.2. Подготовка микрошлифов

Важнейшим элементом технологии нанесения любых покрытий является подготовка рабочих поверхностей режущего инструмента.

Качество подготовки во многом определяет качество самого покрытия, прочность его сцепления с инструментальной матрицей. Недостаточно тщательная подготовка режущего инструмента перед нанесением покрытия может привести к браку изделия. Наиболее часто встречающимся браком изделия вследствие плохой подготовки инструмента является отслаивание покрытий и, как следствие, низкая эффективность.

Технология подготовки инструмента перед нанесением покрытия включает ряд последовательных операций. В любом случае большое внимание следует уделять очистке поверхности инструмента с тем, чтобы его рабочие части были химически и механически чистыми. При этом исключается наличие окалины после термической обработки, образование коррозионных и оксидных пленок посторонних включений в виде масла и других загрязнений, а также дефектов поверхности инструмента в виде раковин, трещин, задиров и т.д.

Приготовление микрошлифов с покрытием различного состава состоит в вырезании образца, шлифовке и полировке до зеркального блеска [29,30].

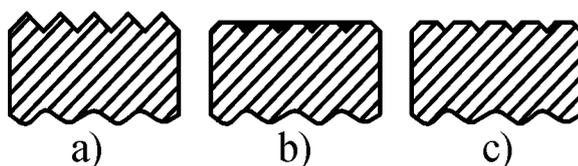


Рис. 3.1. поверхность микрошлифа в процессе его приготовления

- a) после грубой шлифовки;
- b) после резкого перехода на тонкую шлифовку;
- c) после травления.

Вырезанный образец затачивался на абразивном круге (зернистостью 46 и 60) с периодическим охлаждением, не допускающим перегрева образца. Заточенный образец шлифовался шлифовальной бумагой с постепенным переходом от бумаги марки № 12 – 3 с зернистостью от 125 до 25 мкм к бумаге марки М-40 – М-5 микронной зернистостью от 28 до 3,8 мкм до полного удаления рисок. При переходе от одного номера зернистости к другому производилась очистка образцов от абразива и менялось направление шлифовки на 90°. При подготовке микрошлифов не допускался резкий переход с грубой шлифовки на мелкую, так как в результате этого часто создается ложное впечатление, что шлиф хорошо приготовлен. На самом деле происходит лишь сглаживание вершин гребней, возникающих после грубой шлифовки и заполнение впадин сошлифованным металлом и абразивом, что обнаруживается после травления образца, на котором четко проступают царапины.

Шлифовка образцов производилась вручную, когда шлифовальная бумага кладется на ровные плоские плиты (стекло, мрамор), возможен также вариант шлифовки на специальных станках с закреплением шлифовальной бумаги на вращающихся дисках или лентах, но в данном случае этот метод не использовался. После окончательной шлифовки образец тщательно очищался от абразива и полировался до полного исчезновения рисок. Для полировки образцов, кроме шлифовальной бумаги применялись специальные пасты. Паста ГОИ, в состав которой входит окись хрома, стеарин, олеиновая кислота, сода, керосин, наносилась на мягкое сукно. Полировка производилась вручную с периодическим контролем поверхности микрошлифа визуальным методом.

Помимо механической полировки, существуют ряд прогрессивных методов, таких как: химико-механическое полирование, при котором в состав полирующей смеси вводится химически активное вещество, воздействующее на поверхность образца и ускоряющее процесс полирования; метод электрохимического полирования, при котором образец в качестве анода помещают в электролитическую ванну. Состав электролита (фосфорная, серная, хлорная кислота), материал пластины катода (свинец, медь, алюминий, цинк) и плот-

ность тока на аноде (образце) зависят от полируемого материала. При пропускании тока все неровности оставшиеся после шлифовки образца, растворяются и образец приобретает ровную зеркальную поверхность.

### **3.3. Технологический процесс нанесения покрытий**

Качество и надежность ионно-плазменных нитридных покрытий определяется совокупностью технологических параметров напыления (давление газа, опорное напряжение, ток дуги, температура подложки). Нанесение покрытий на образцы проводилось на установке типа ННВ-6,6-И1, которая предназначена для нанесения защитных и упрочняющих покрытий на изделия машиностроения; режущий инструмент, штамповую оснастку. Эти покрытия повышают износостойкость и увеличивают ресурс работы наиболее важных элементов различного оборудования за счет повышения эрозионной, коррозионной и абразивной стойкости используемых конструкционных материалов.

Для покрытия инструмента из быстрорежущей и инструментальной стали, твердосплавного и паяного твердосплавного инструмента используют покрытия TiN, TiCN, TiAlN, MoS<sub>2</sub>, CrN, B<sub>4</sub>C, DLC с толщиной до 5 микрон. Инструмент с такими покрытиями используется для обработки сталей, чугуна, силумина, меди, бронзы, алюминия.

Процесс нанесения покрытия можно рассматривать как состоящий из двух этапов: подготовка оборудования и оснастки к работе и непосредственно формирование покрытия.

#### *1. Подготовка оборудования и оснастки к работе.*

Подготовку оборудования и оснастки проведенную в данной работе можно описать последовательностью следующих действий:

Перед открытием вакуумной камеры прогреть камеру до температуры 60-80°C. Прогрев вакуумной камеры предназначен для предотвращения конденсации и удаления паров воды с поверхности стенок камеры, а также для обезгаживания в процессе откачки.

Включить форвакуумные насосы, нажав на кнопки «Форвакуумный насос I» и «Форвакуумный насос II».

Таблица 3.2.

Основные технические данные установки ННВ-6,6-И1

|     |   |   |
|-----|---|---|
| 1.  | Размеры рабочей камеры, мм<br>диаметр<br>высота   | $600^{+30}$<br>$600^{-20}$  |
| 2.  | Количество электродов токоподводящих с магнитной фокусировкой плазменного потока и электронным бесконтактным поджигом, шт | 3   |
| 3.  | Максимальная допустимая нагрузка на ось сателлита механизма вращения, кг  | 10  |
| 4.  | Точность регулирования автоматического натекателя, % от диапазона шкалы   | $\pm 2,5$   |
| 5.  | Длительность цикла упрочнения инструмента, ч  | до 2,5  |
| 6.  | Скорость осаждения покрытия (нитрида титана), мкм/ч   | от 13 до 40   |
| 7.  | Номинальный ток высоковольтного источника питания подложки, А   | 20  |
| 8.  | Диапазон плавного регулирования величины напряжения высоковольтного источника питания подложки, В                         | от 100 до 1500  |
| 9.  | Диапазон плавного регулирования величины напряжения низковольтного источника питания подложки, В                          | от 20 до 280  |
| 10. | Потребляемая мощность, кВт  | $50^{+5}$   |
| 11. | Остаточное давление в камере, Па (мм.рт.ст.)  | $6,65 \cdot 10^{-3}$ –<br>$6,65 \cdot 10^{-1}$<br>( $5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-3}$ ) |
| 12. | Габаритные размеры установки, мм<br>длина<br>ширина<br>высота   | 3600<br>3900<br>2070  |
| 13. | Масса установки, т  | 3,1   |

Открыть вакуумный клапан откачки диффузионного насоса, нажав кнопку «Высоковакуумная откачка». Включить электронагреватель диффузионного насоса, нажав на кнопку «Диффузионный насос».

Приспособление для установки инструмента протереть бензином, а затем спиртом.

Открыть вентиль - натекаТЕЛЬ вакуумной камеры и напустить в неё воздух. Открыть дверцу вакуумной камеры.

Установить приспособление с образцами в камеру и укрепить его. Загрузка образцов в вакуумную камеру осуществлялась в перчатках из хлопчатобумажной безворсовой ткани.

Закреть дверцу вакуумной камеры, закрыть вакуумный клапан "Высоковакуумная откачка" и открыть вакуумный клапан форвакуумной откачки, нажав на кнопку «Форвакуумная откачка». При достижении давления в камере  $5 \cdot 10^{-1}$  мм.рт.ст. по показанию вакуумметра ВИТ-3 открывается вакуумный вентиль «Параллельная работа».

После достижения в вакуумной камере давления  $5 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-2}$  мм.рт.ст. и прогрева диффузионного насоса, закрывается вакуумный клапан форвакуумной откачки, открывается клапан «Высокий вакуум» и открывается электромеханический затвор диффузионного насоса.

При достижении давления в вакуумной камере  $1 \cdot 10^{-4}$  мм.рт.ст. отключается нагрев воды и включается подача холодной воды.

Открыть баллон с газом, тумблер «Газ» поставить в положение «Автоматическое», открыть клапан напуска газа в камеру и потенциометром отрегулировать давление  $3 \cdot 10^{-3}$  мм.рт.ст. Затем клапан напуска газа закрыть, камеру откачать до необходимого давления.

## *2. Процесс формирования покрытия.*

Процесс формирования покрытий на образцы также можно описать последовательностью действий:

Ионная очистка и нагрев инструмента.

Подать напряжение на тиристорный регулятор (РНТТ), включив тумблер «Источник питания» и нажав на кнопку «Ток», проверив, чтобы ручка потенциометра «Регулирование напряжения» была выведена в крайнее левое положение, т.к. включение и отключение источника высокого и опорного напряжения при сигнале управления на РНТТ, не равном нулю, может повлечь выход источника питания высокого напряжения из строя.

Ручкой потенциометра «Регулирование напряжения» установить на подложке напряжение 1,5 кВ.

На блоках БА-12 включить тумблеры «Сеть». Потенциометрами «Фокусирующая катушка» был установлен ток в фокусирующих катушках 0,2 А, потенциометрами «Стабилизирующая катушка» был установлен первоначальный ток в стабилизирующих катушках 0,2 А, а после загорания дуги – 0,8 А.

Включить тумблер «Сварочные выпрямители» и на блоках БА-12 включить один из испарителей. Величина тока дуги при испарении титана составляла 90 А. Длительность горения дуги контролировалось по величине тока в цепи катод – изделие по амперметру на стойке управления и по степени вакуума в рабочей камере установки. Импульсный прогрев производился до прекращения возникновения микродуг на упрочняемых изделиях путем включения каждого испарителя.

Формирование слоя покрытия.

Для перехода к процессу осаждения, потенциометром «Регулирование напряжения» снизить напряжение до минимума, отключить высокое напряжение и кнопкой «Опорное напряжение» подать на подложку опорное напряжение. Опорное напряжение устанавливалось в размере 250 В, не выключая испарители. Подать легирующий газ в вакуумную камеру, переведя тумблер «Газ» в положение «Автомат». Потенциометром «Автомат» устанавливалось необходимое давление в вакуумной камере.

Потенциометрами «Стабилизирующая катушка» был установлен ток в стабилизирующих катушках электродуговых испарителей 0,7- 0,8 А.

Ток дугового испарителя был установлен в размере 90 А.

Охлаждение изделий и выгрузка.

После окончания процесса формирования покрытий необходимо произвести следующие операции: выключить испарители, нажатием на кнопки «Выкл» на блоках БА-12. Потенциометр «Регулирование напряжения» вывести в крайнее левое положение, отключить источник питания и РНТТ, нажав на стопорные кнопки «Опорное напряжение» и «Ток». Отключить тумблеры «Источник пи-

тания», «Сварочный выпрямитель», выключатели «Сеть» на блоках БА-12. Прекратить подачу легирующего газа в вакуумную камеру, переведя тумблер «Газ» в положение «Ручное» и нажав на стопорную кнопку «Газ».

Отключить механизм вращения, нажав на кнопку «Стоп».

Охладить изделия в вакуумной камере до температуры ниже 200°C.

Напустить в прогретую вакуумную камеру воздух, нажав на кнопку «Воздух».

Произвести выгрузку изделий.

По окончании выгрузки закрыть вакуумный вентиль напуска воздуха.

Отключение установки.

Отключение установки.

Параметры процесса осаждения покрытий, при проведении экспериментальных исследований, сведены в таблицу 3.3

Таблица 3.3.

Параметры исследуемого технологического процесса.

| № оп | Покрытие                  | P, мм.рт.ст.       | U <sub>тл.р.</sub> , В | t <sub>тл.р.</sub> , мин | U <sub>и.б.</sub> , В | t <sub>и.б.</sub> , мин | U <sub>опор.</sub> , В | I <sub>и.б.</sub> , I <sub>опор.</sub> , А | t <sub>нап.</sub> , мин |
|------|---------------------------|--------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|--|-------------------------|
| 1    | TiN <sub>x1</sub> (реж.1) | 3·10 <sup>-3</sup> | 1500                   | 2-2,5                    | 500 - 1000            | 1,5-2                   | 250                    | 90   | 20                      |
| 2    | TiN <sub>x1</sub> (реж.2) | 3·10 <sup>-4</sup> | 1500                   | 2-2,5                    | 500 - 1000            | 1,5-2                   | 250                    | 90   | 20                      |

### 3.4. Измерение шероховатости, образцов с покрытиями

Поверхность твердого тела, даже хорошо отшлифованного, далеко не ровная. На ней имеются микровыступы, впадины, трещины; часто эта поверхность покрыта окислами, прилипшими слоями газа или жидкости, посторонними включениями. Естественно, что зацепление этих выступов будет препятствовать перемещению соприкасающихся тел друг относительно друга.

Для получения более достоверных данных нам необходимо измерить шероховатость поверхности образцов до нанесения покрытия и после, для этого мы используем аппарат профилограф-профилометр тип АІ модель 252 .

Профилограф-профилометр тип А1 (ГОСТ 19299-73 и ГОСТ 19300—73) модель 252 является высокочувствительным прибором и предназначен для измерения в лабораторных условиях шероховатости и волнистости поверхности изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию.

Технические характеристики данного аппарата.

Параметры шероховатости поверхности, определяемые по показывающему устройству:

$R_a$  — среднее арифметическое отклонение профиля;

$H_{max}$  — высота наибольшего выступа профиля;

$H_{min}$  — глубина наибольшей впадины профиля;

$t_p$  — относительная опорная длина профиля;

$n$  — число шагов неровностей в пределах длины трассы ощупывания при измерении (по базовой линии).

Вид отсчетного (показывающего) устройства - цифровое

Вид регистрирующего (записывающего) устройства записывающий прибор с электротермической записью в прямоугольной системе координат

Диапазон измерений:

а) профилографа, 0,02 ... 250 мкм;

б) профилометра по параметрам:

$R_a$  0,02... 100 мкм;

$H_{max}, H_{min}$  0,1 ... 100 мкм;

$t_p$  0... 100%;

$n$  до 1000

Уровни сечения профиля при измерении:

$t_p, \%$  10; 20; 30;

40; 50; 60;

70; 80; 90

Вертикальное увеличение профилографа

200; 500; 1000;

2000; 5000; 10000;

20000; 50000; 100000

Горизонтальное увеличение профилографа 0,5; 1; 2; 5; 10;  
20; 50; 100; 200;  
500; 1000; 2000

Характеристики основной приведенной погрешности, %

а) вертикальных и горизонтальных увеличений профилографа:

предел допускаемой систематической составляющей 2,5;

предел допускаемого среднего квадратического отклонения случайной составляющей 0,6;

б) профилометра: предел допускаемой систематической составляющей

при измерении:  $R_a$  5;

$H_{max}$ ,  $H_{min}$ ,  $t_p$ ,  $n$  15;

предел допускаемого среднего квадратического отклонения случайной составляющей при измерении:

$R_a$  1;

$H_{max}$ ,  $H_{min}$ ,  $t_p$ ,  $n$  4;

Максимальная длина трассы ощупывания профилографа, 50 мм;

Ширина записи, 50 мм;

Скорости трассирования датчика, мм/мин 0,6;6;60;

Значения отсечек шага 0,08; 0,25; 0,8; 2,5;

Длина трасс ощупывания при измерении (профилометра), мм 1, 5;3; 6;

Радиус кривизны вершины щупа, мкм  $10 \pm 2,5$ ;

Измерительное усилие ощупывающей иглы, Н, не более 0,016;

Постоянная изменения измерительного усилия, Н/м, не более 800;

Радиус кривизны рабочей части опоры датчика в плоскости, перпендикулярной измеряемой поверхности и параллельной направлению движения датчика,

125 мм

### УСТРОЙСТВО И РАБОТА ПРИБОРА ПРОФИЛОГРАФ-ПРОФИЛОМЕТРА

Прибор (рис. 3.2) состоит из отдельных блоков:

а) стойки;

б) мотопривода;

- в) блока питания;
- г) блока измерительного;
- д) блока счетно-решающего;
- е) датчиков;
- ж) предметного стола;
- з) прибора записывающего.

На стойке 1 размещен мотопривод 2, на котором, с помощью специального разъема, закрепляется датчик 3 (или 4).

На стол стойки устанавливается предметный стол 5, позволяющий перемещать измеряемую деталь в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Для установки датчика на измеряемую поверхность мотопривод с помощью ходового винта перемещается по направляющим стойки.

Усиление и преобразование электрических сигналов с датчика, а также управление работой прибора осуществляется блоком питания 6 и блоком измерительным 7.

Эти блоки связаны соединительными шлангами 8 с мотоприводом, блоком счетно-решающим 9, предназначенным для обработки электрических сигналов и выдачи результатов измерения на цифровое отсчетное устройство, и с записывающим прибором 10, который служит для записи на диаграммную ленту результатов измерения неровностей исследуемой поверхности.

Для расширения эксплуатационных возможностей прибор снабжается датчиком для измерения шероховатости поверхности малых отверстий и пазов, стойкой с прямолинейной опорой, приспособлением для измерения волнистости и призмой для проверки цилиндрических деталей.

Действие прибора основано на принципе ощупывания неровностей исследуемой поверхности алмазным щупом 13 датчика и преобразования, возникающих при этом, колебаний щупа в изменения напряжения, пропорциональные этим колебаниям.

Прибор может быть использован для работы в качестве:

- а) профилографа;

б) профилографа при записи измеряемого профиля с использованием фильтров отсечки шага;

в) профилометра.

При работе прибора в качестве профилографа переключатель S3 устанавливается в положение «ЗП». Переключатель S5 (вертикальное увеличение) может быть установлен в любом из 9 положений от 200 до 100 тыс. крат.

Кнопкой S1 (пуск) включается электродвигатель перемещения датчика и начинается измерение.

Сигнал с датчика поступает на входной усилитель, к выходу которого подключен делитель, определяющий вертикальное увеличение.

С делителя сигнал поступает на первый усилитель несущей частоты, полосовой фильтр, второй усилитель несущей частоты и, после фазового детектора, на усилитель мощности, к выходу которого подключена измерительная система, преобразующая электрический сигнал в механические колебания пера записывающего прибора.

При установке переключателя S3 в положение «ЗФ» (запись с фильтрами) прибор дает возможность записывать исследуемый профиль с проведением частотного анализа при помощи RC — фильтров отсечки шага.

Связь между шагом неровностей и частотой сигнала определяется соотношением:

$$\text{ем: } \lambda = \frac{V}{f}$$

где: V — скорость трассирования датчика—мм/с

$\lambda$  — шаг неровностей профиля — мм

f — частота следования неровностей профиля— 1/с.

Минимальный шаг записываемых неровностей профиля определяется верхней граничной частотой записывающего прибора.

Максимальный шаг записываемых неровностей профиля определяется характеристикой RC — фильтров.

## ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Использование прибора в качестве профилографа

При работе прибора в качестве профилографа необходимо учитывать, что радиус опоры, базируемый на измеряемую поверхность, должен быть не менее 50 значений базовой длины, используемой при обработке профилограммы.

В случае использования базовой длины более 2,5 мм следует пользоваться независимой опорой.

12.1.1. Работа производится в следующей последовательности:

- а) включите прибор (см. рис. 3.2) кнопкой 12 блока питания;
- б) установите деталь на предметный стол 5 или в приспособление;
- в) установите ручку переключателя «Род работы» в положение «ЗП» или «ЗФ»;
- г) установите ручкой мотопривода необходимую скорость движения датчика;
- д) установите рукояткой скорость перемещения диаграммной ленты в соответствии с требуемым горизонтальным увеличением
- е) установите ручку переключателя «Вертикальное увеличение» в положение, соответствующее вертикальному увеличению 200;
- ж) установите датчик на измеряемую поверхность; для этого вращением маховика плавно опускайте датчик на измеряемую поверхность до тех пор, пока перо записывающего прибора окажется в поле записи диаграммной бумаги, после чего застопорите маховиком, каретку с мотоприводом;
- з) увеличивайте, поворотом ручки переключателя 14, вертикальное увеличение прибора до необходимого;
- и) нажмите кнопку прибора записывающего;
- к) нажмите кнопку (зеленого цвета) блока питания для записи шероховатости измеряемой поверхности.
- л) при записи с фильтрами, перед измерением, установите ручкой переключателя требуемую отсечку шага.

Параллельность измеряемой поверхности траектории движения каретки мотопривода устанавливается наклоном стола 4, маховиком 7. Отклонение от параллельности выражается записью неровностей со значительным наклоном к продольной оси диаграммной ленты. Перо записывающего при-

бора можно устанавливать в поле записи бумаги с помощью ручек подстроечных. Длину трассы ощупывания определяет оператор. Нажатием кнопки (красного цвета) можно остановить движение датчика в любом месте трассы. После нажатия кнопки «R» (реверс) датчика вернется в исходное положение.

Если измерение производится с нажатой кнопкой «R», то датчик будет возвращаться в исходное положение каждый раз после нажатия кнопки 22.

В противном случае нажатием кнопки 21 можно продолжить измерение с того места, на котором был остановлен датчик.

Примечание. После реверса датчика, из-за выбора люфтов в механизме мотопривода, начало записи на диаграммной ленте на 0,1—0,3 мм опережает начало хода датчика в исследуемой поверхности. Это опережение на диаграммной ленте записывается прямой линией.

## 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ

### 4.1. Экспериментальные исследования химического состава образцов

Экспериментальные исследования химического состава покрытий проводилось согласно методике, представленной в главе 3, с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-6500 фирмы «JEOL» высокого разрешения.

Первый образец был из T14K8, относящимся к твердосплавам. Микроскоп снял показание с 4-х различных точек, среднее арифметическое значения и стало показателем.

В табл. 4.1 представлено среднее арифметическое значение снятое с 4-х точек сплава.

Таблица 4.1

Химический состав первого образца

| Химический состав |      |     |     |      |      |      |      |      |
|-------------------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|
| W                 | Ti   | Co  | Fe  | V    | Ca   | S    | Si   | Al   |
| 76,43             | 12,6 | 7,5 | 1,2 | 0,27 | 0,43 | 0,35 | 0,73 | 0,47 |

Из полученных данных мы можем точно видеть, что выбранный нами материал относится к сплавам T14K8 и в таблице 4.2 приведены его основные характеристики и состав [25].

Таблица 4.2

## Состав и свойства сплава Т14К8

| Марка сплава | Химический состав |     |    | Твердость HRA<br>кгс/мм <sup>2</sup> , не менее | Средний $\sigma_{изг}$ при изгибе<br>кгс/мм <sup>2</sup> , не менее | Плотность<br>г/см <sup>3</sup> | Характерные особенности  |
|--------------|-------------------|-----|----|---|---|--------------------------------|--|
|              | WC                | TiC | Co |   |   |                                |  |
| Т14К8        | 78                | 14  | 8  | 89,5  | 125   | 11,2-11,6                      | Средняя износостойкость и скорость резания; достаточно высокая эксплуатационная прочность. |

Второй образец из Р9К5-быстрорежущая сталь. Полученные данные при измерении с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-6500F указаны в таблице 4.3.

Таблица 4.3

## Химический состав второго образца

| Химический состав |      |     |     |     |      |      |      |      |
|-------------------|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| C                 | Fe   | W   | Co  | Cr  | V    | Ca   | S    | Si   |
| 0,9               | 75,2 | 8,7 | 7,5 | 4,2 | 1,95 | 0,43 | 0.03 | 0,55 |

Из полученных данных мы можем точно видеть, что выбранный нами материал относится к сплавам Р9К5 и в таблице 4.4 приведены его основные характеристики и состав

Таблица 4.4

## Состав и свойства сплава Р9К5

| Марка сплава | Химический состав |    | Твердость HRC, не менее | Средний $\sigma_{изг}$ при изгибе МПа, не менее |
|--------------|-------------------|----|-------------------------|---|
|              | W                 | Co |                         |   |
| Р9К5         | 9                 | 5  | 60-63                   | 840   |

## 4.2. Экспериментальные измерение шероховатости

Экспериментальные исследование шероховатости поверхности покрытий проводилось согласно методике, представленной в главе 2, с использованием профилографа-профилометра типа АІ модель 252 .

Профилограф-профилометр тип АІ (ГОСТ 19299-73 и ГОСТ 19300—73) модель 252 является высокочувствительным прибором и предназначен для измерения в лабораторных условиях шероховатости и волнистости поверхности изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет

Измерение шероховатости проводились для получения достоверных данных до нанесения покрытия и после. Измерения снимались со всех сторон образца, позже все образцы были пронумерованы.

Таблица 4.5

Показания профилографа-профилометра до нанесения покрытия

| Марка материала | Значения Ra |           |           |           |
|-----------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|                 | 1           | 2         | 3         | 4         |
| № п/п           |             |           |           |           |
| T14K8           | 0,55-0,66   | 0,36-0,41 | 0,60-0,62 | 0,53-0,64 |
| P9K5            | 0,21-0,42   | 0,36-0,62 | 0,37-0,53 | 0,73-1,05 |

Для нанесения покрытия при режиме  $R=3 \cdot 10^{-3}$  были выбраны образцы №2,3-T14K8, №1,4-P9K5, а при  $R=3 \cdot 10^{-4}$  были выбраны №1,4-T14K8, №2,3-P9K5 ( табл. 4.6).

Таблица 4.6

Показания профилографа-профилометра после нанесения покрытия

| TiN <sub>0,960</sub> | T14K8     |           | P9K5      |           |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | № 2       | № 3       | № 1       | № 4       |
| Значения Ra          | 0,33-0,41 | 0,50-0,59 | 0,32-0,42 | 0,36-0,73 |
| TiN <sub>0,779</sub> | №1        | №4        | №2        | №3        |
| Значения Ra          | 0,54-0,60 | 0,50-0,59 | 0,40-0,60 | 0,32-0,45 |

По данным исследования видно, что значения  $R_a$  до и после нанесения покрытия и после практически не изменилась

#### 4.3. Экспериментальные исследования фрикционных свойств

Измерения проводились на установке рис 4.1, сконструированной в лаборатории Ташкентского государственного авиационного института.

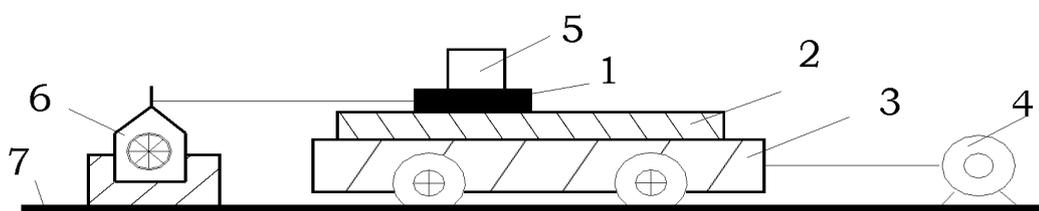


Рис 4.1. Принципиальная схема трибометра

1-образец; 2-обрабатываемый материал, 3-тележка, 4- двигатель постоянного тока, 5- груз, 6-граммометр, 7-колея

Тележка равномерно движется, что обеспечивается двигателем постоянного тока, к ней прикреплена пластинка (обрабатываемый материал) на пластинке лежит исследуемый образец, который прикреплен тросом к граммометру. Образец придавлен грузом ( $P$ ), для получения достоверных данных эксперимента мы меняем массу груза. Какое-то время исследуемый образец будет двигаться в одну сторону с тележкой, при этом рычаг граммометра будет отклоняться. Когда образец с грузом начнет равномерно двигаться в противоположном направлении, будет означать, что образец преодолел силу трения  $F_{тр}$ . Значение силы трения будут видны из показания граммометра. Для эксперимента использовался граммометр часового типа с ценной деления от 10-60г.

Далее полученные результаты считались по формуле:

$$f_{тр} = \frac{F_{тр}}{P}, \text{ где}$$

$f_{тр}$  -коэффициент трения;

$F_{тр}$ -сила трения;

$P$ - давление (в нашем случае вес груза, устанавливаемого на образец)

Для достоверности эксперимента, испытание производились пять раз, результирующим значением было среднее значение  $F_{тр}$ .

Так же был проведен эксперимент с образцом без покрытия при тех же условиях. В качестве пластинки по которой движутся образцы были выбраны титан (ОТ4), алюминий (Д16Т), сталь (Ст3), они исполняли роль обрабатываемого материала. Данные материалы были выбраны не случайно так как они широко применяются в авиастроении.

Данный эксперимент проводился, как при комнатной температуре (без нагрева), так при температуре обрабатываемого материала  $t=200^{\circ}\text{C}$  (с нагревом).

В первую очередь был исследован образец Т14К8 без покрытия при комнатной температуре, мы последовательно увеличивали нагрузку  $P$  на образец, сравнивая полученные результаты мы вывели среднее арифметическое показание коэффициента трения (табл. 4.7 и рис.4.1.)

Таблица 4.7

Изменение величины коэффициента трения в зависимости от марки обрабатываемого материала и величины нагрузки ( $P$ )

| Вес груза $P$ , гр                            | Обрабатываемый материал   |      |     |                             |          |          |
|---|---------------------------|------|-----|-----------------------------|----------|----------|
|   | Сила трения $F_{тр}$ , гр |      |     | Коэффициент трения $f_{тр}$ |          |          |
|   | ОТ4                       | Д16Т | ст3 | ОТ4                         | Д16Т     | Ст3      |
| 20  | 8,5                       | 6    | 5   | 0,425                       | 0,3      | 0,25     |
| 30  | 12                        | 8,2  | 7   | 0,4                         | 0,273333 | 0,233333 |
| 60  | 21                        | 17   | 15  | 0,35                        | 0,283333 | 0,25     |
| 110   | 48                        | 38   | 38  | 0,436364                    | 0,345455 | 0,345455 |
| Среднее значение коэффициента трения $f_{тр}$ |                           |      |     | 0,402841                    | 0,30053  | 0,269697 |

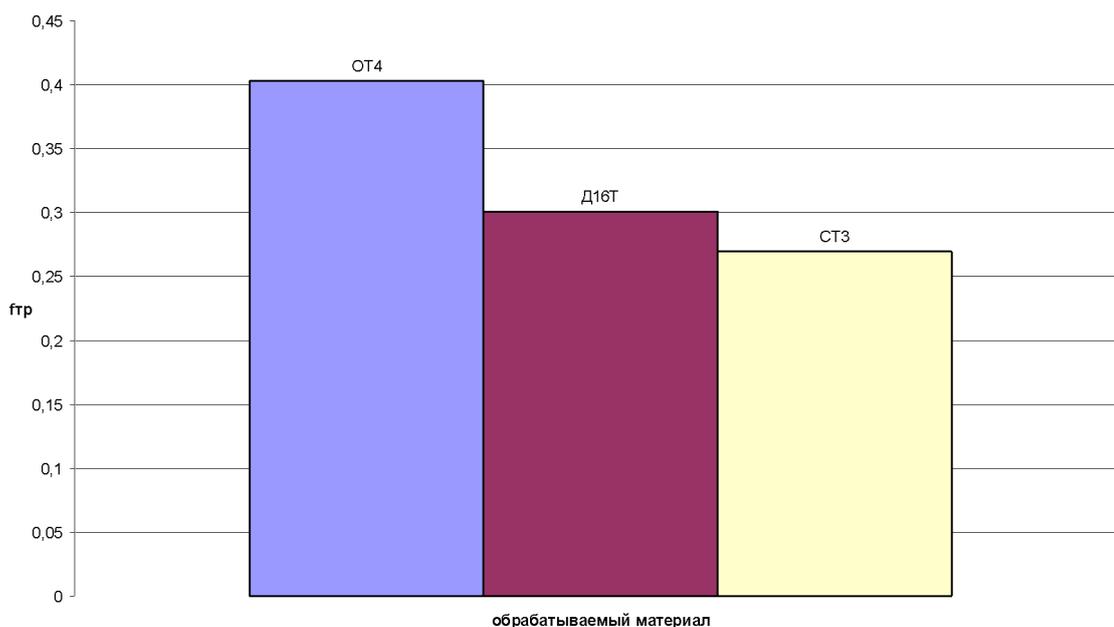


Рис 4.2. Измерение величины коэффициента трения в зависимости от марки обрабатываемого материала

Для изучения влияния нестехиометрии покрытий на фрикционные свойства, был проведен такой же эксперимент, при тех же условиях только в качестве образцов были сплав Т14К8 с нестехиометрическими покрытиями  $TiN_{0,96}$  и  $TiN_{0,779}$ . Результаты приведены в табл. 4.9, и на рис. 4.3.

Таблица 4.9

Измерение величины коэффициента трения в зависимости от марки обрабатываемого материала и нестехиометрического состава покрытий

| Нестехиометрический состав покрытий | Коэффициент трения $f_{тр}$ |      |      |      |
|-------------------------------------|-----------------------------|------|------|------|
|                                     | Обрабатываемый материал     | OT4  | D16T | CT3  |
| $TiN_{0,96}$                        |                             | 0,34 | 0,23 | 0,36 |
| $TiN_{0,779}$                       |                             | 0,34 | 0,32 | 0,24 |

На рис. 4.3. показаны зависимости коэффициента трения  $f_{тр}$  от обрабатываемого материала. Из графика мы видим что сплавы без покрытия имеют более высокий коэффициент трения.

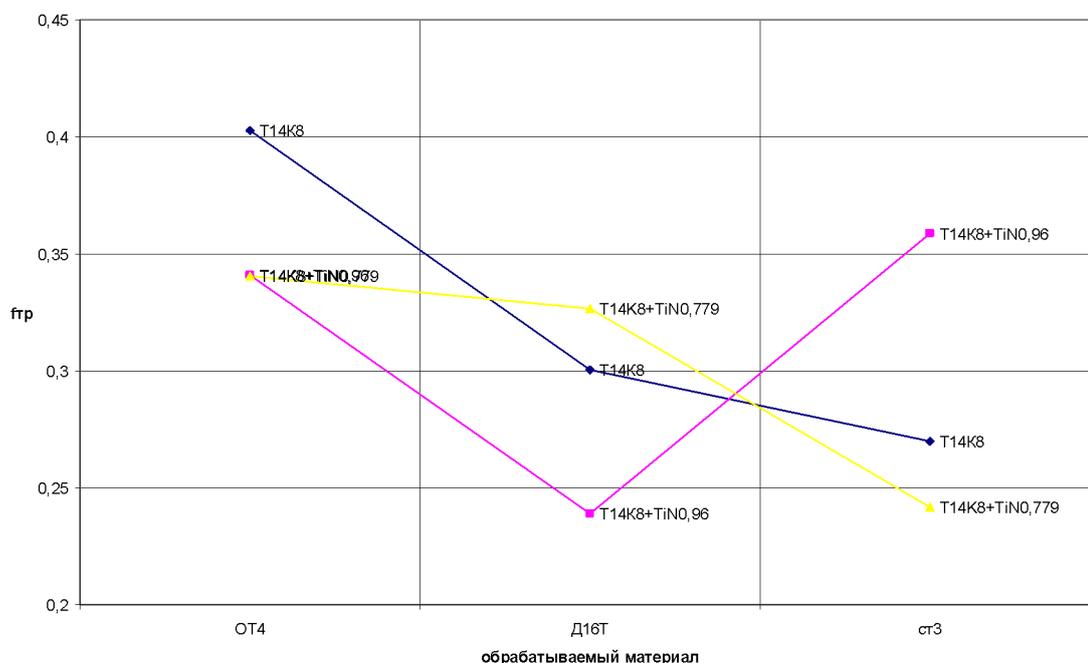


Рис 4.3. Зависимость коэффициент трения  $f_{тр}$  от нестехиометрического состава покрытия и обрабатываемого материала

Так же из рис. 4.3 видно, что для обработки алюминия лучше использовать резец с покрытием  $TiN_{0,96}$ . Самый низкий коэффициент трения имеет пара  $TiN_{0,779}$ -Ст3

Далее был проведен эксперимент со вторым видом образцов из Р9К5, на которые также были нанесены нестехиометрические покрытия (табл.4.10, рис.4.4). Эксперимент проводился в таких же условиях.

Таблица 4.10

Измерение величины коэффициента трения в зависимости от марки обрабатываемого материала и нестехиометрического состава покрытий

| Нестехиометрический состав покрытий | Коэффициент трения $f_{тр}$ |      |      |
|-------------------------------------|-----------------------------|------|------|
|                                     | ОТ4                         | Д16Т | Ст3  |
| $TiN_{0,96}$                        | 0,32                        | 0,21 | 0,23 |
| $TiN_{0,779}$                       | 0,31                        | 0,23 | 0,22 |

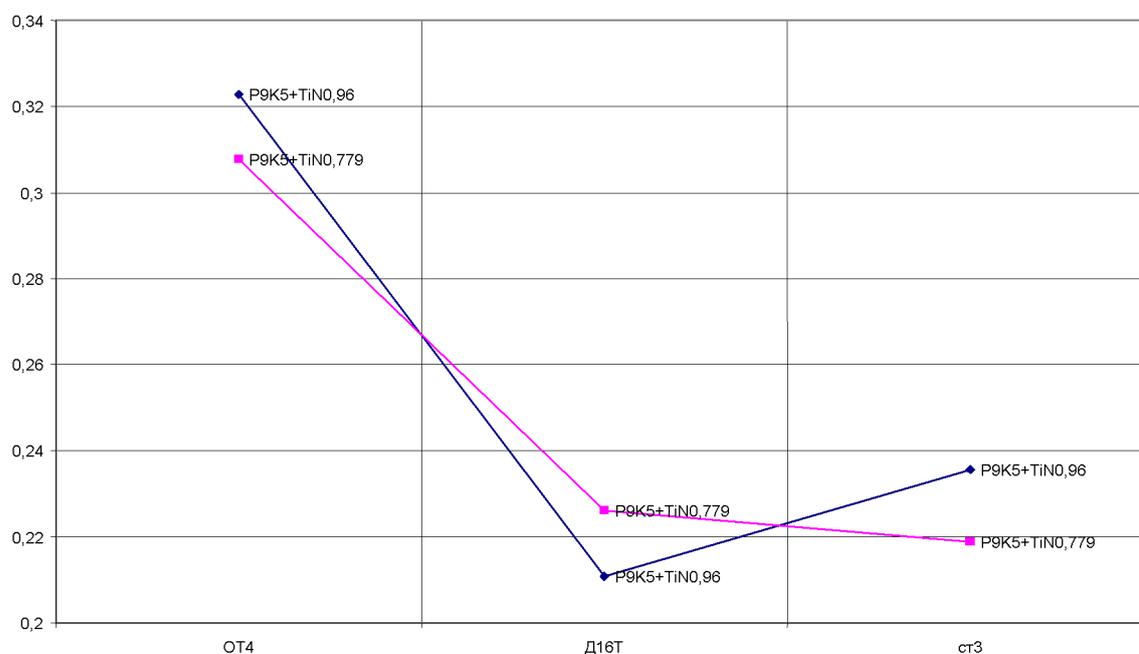


Рис 4.4. Зависимость коэффициент трения  $f_{тр}$  от нестехиометрического состава покрытия и обрабатываемого материала

Из полученных данных что покрытия нанесенные на P9K5 имеют более низки коэффициент трения чем T14K8. но также мы можем наблюдать такую картину, что самый низкий коэффициент трения, что для P9K5 и T14K8 имеет пара  $TiN_{0,96}$ -Д16Т.

Так как в процессе резания происходит нагрев заготовки и режущего инструмента, нам необходимо выяснить как влияет температура на коэффициент трения.

Для данного эксперимента мы нагрели образец и обрабатываемый материал до  $t=200^{\circ}\text{C}$ , измерение температуры происходило с использованием термопары. В данном эксперименте так же участвовали сплавы Р9К5 и Т14К8. (табл. 4.11-4.12, рис. 4.5-4.7)

Как и на первом этапе эксперимента в первую очередь мы рассмотрим коэффициент трения между Т14К8 (без покрытия) и обрабатываемым материалом.

Таблица 4.11

Изменение величины коэффициента трения в зависимости от марки обрабатываемого материала и величины нагрузки (Р) ( $t=200^{\circ}\text{C}$ )

| Вес груза Р, гр                                      | Обрабатываемый материал          |      |      |                                    |      |      |
|--|----------------------------------|------|------|------------------------------------|------|------|
|  | Сила трения $F_{\text{тр}}$ , гр |      |      | Коэффициент трения $f_{\text{тр}}$ |      |      |
|  | ОТ4                              | Д16Т | Ст3  | ОТ4                                | Д16Т | Ст3  |
| 20   | 11                               | 8    | 6    | 0,55                               | 0,4  | 0,3  |
| 30   | 13,5                             | 10,4 | 10   | 0,45                               | 0,35 | 0,33 |
| 60   | 22                               | 21   | 16,9 | 0,37                               | 0,35 | 0,28 |
| Среднее значение коэффициента трения $f_{\text{тр}}$ |                                  |      |      | 0,45                               | 0,36 | 0,31 |

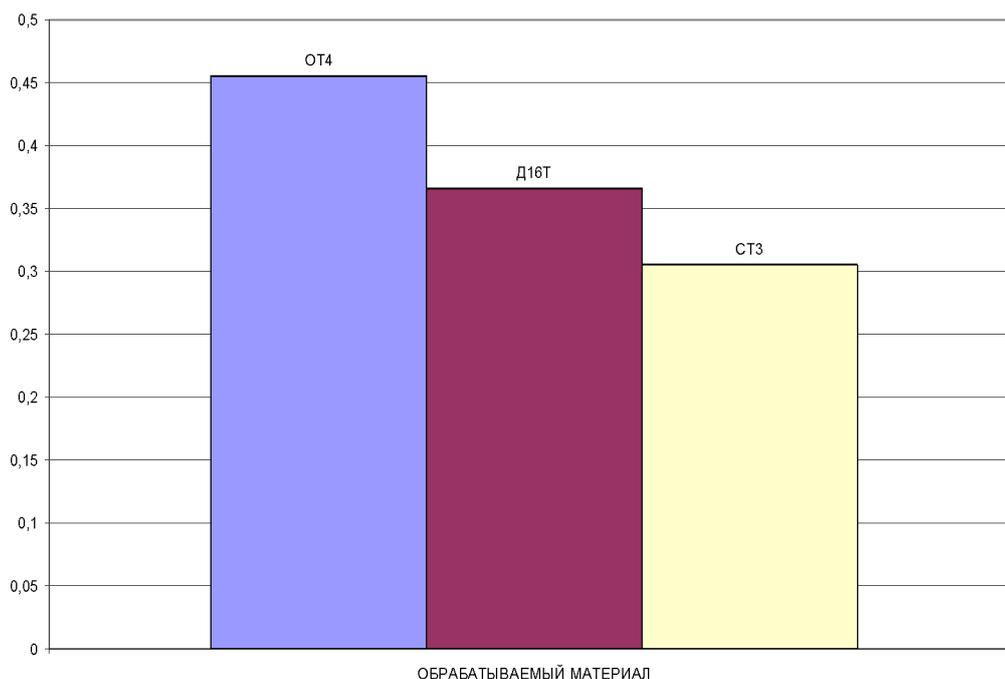


Рис 4.5. Изменение величины коэффициента трения в зависимости от марки обрабатываемого материала ( $t=200^{\circ}\text{C}$ )

По экспериментальным данным мы видим, что коэффициент трения с нагревом увеличился.

Как изменяется коэффициент трения в зависимости от нестехиометрического состава покрытия на сплав Т14К8 при нагреве образцов рассмотрена в (табл. 4.12, рис. 4.6).

Таблица 4.12

Измерение величины коэффициента трения в зависимости от марки обрабатываемого материала и нестехиометрического состава покрытий при  $t=200^{\circ}\text{C}$

| Нестехиометрический состав покрытий | Коэффициент трения $f_{тр}$ |      |      |     |
|-------------------------------------|-----------------------------|------|------|-----|
|                                     | Обрабатываемый материал     | OT4  | D16T | CT3 |
| $\text{TiN}_{0.96}$                 |                             | 0,36 | 0,31 | 0,3 |
| $\text{TiN}_{0.779}$                |                             | 0,43 | 0,36 | 0,3 |

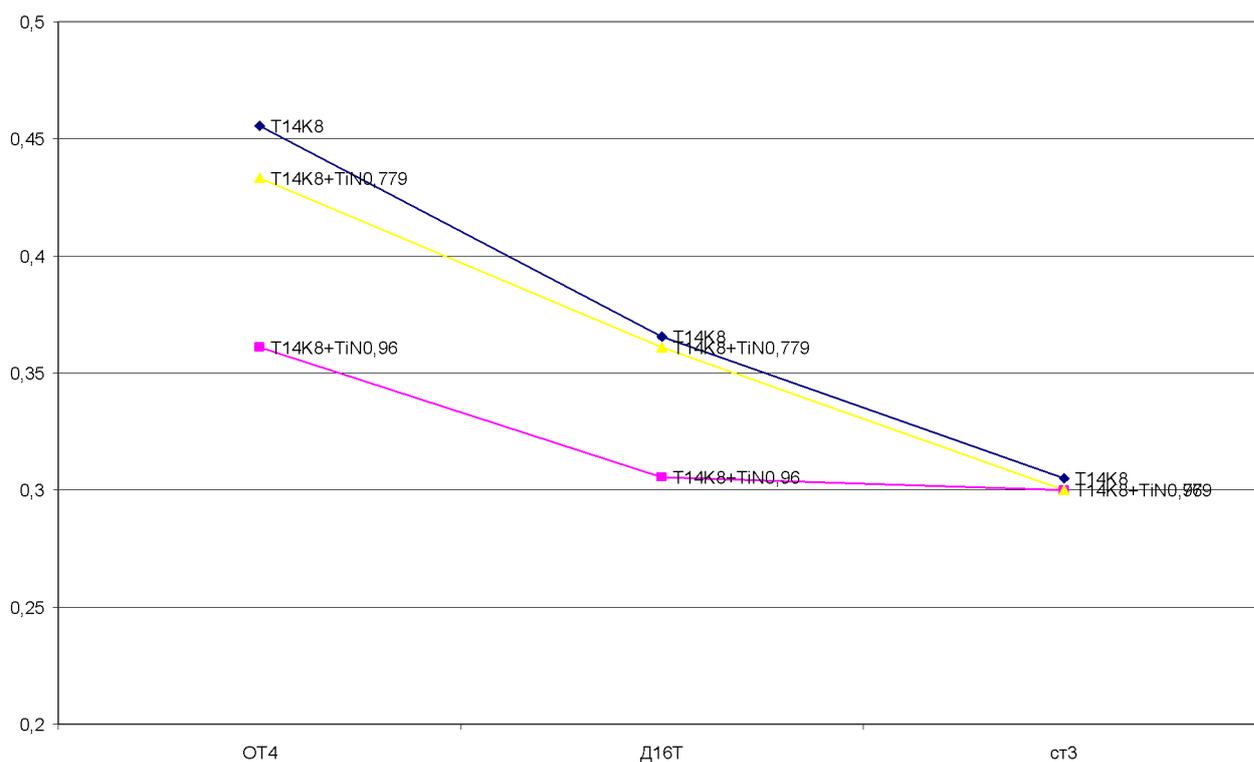


Рис 4.6. Зависимость коэффициент трения  $f_{тр}$  от нестехиометрического состава покрытия и обрабатываемого материала  $t=200^{\circ}\text{C}$

Из рис. 4.6. видно, что при нагреве на  $t=200^{\circ}\text{C}$  коэффициент трения для образцов с покрытие и без него по Ст3 практически одинаков. Как и без нагрева наименьший коэффициент трения имеет пара  $\text{TiN}_{0.96}$ -Д16Т.

Сплавы из Р9К5 с покрытиями мы также нагрели, и получили следующие результаты (табл. 4.13, рис. 4.7).

Таблица 4.13

Измерение величины коэффициента трения в зависимости от марки обрабатываемого материала и нестехиометрического состава покрытий при  $t=200^{\circ}\text{C}$

| Нестехиометрический состав покрытий | Коэффициент трения $f_{тр}$ |       |       |       |
|-------------------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|
|                                     | Обработываемый материал     | OT4   | Д16Т  | Ст3   |
| TiN <sub>0.96</sub>                 |                             | 0,397 | 0,29  | 0,294 |
| TiN <sub>0.779</sub>                |                             | 0,394 | 0,334 | 0,272 |

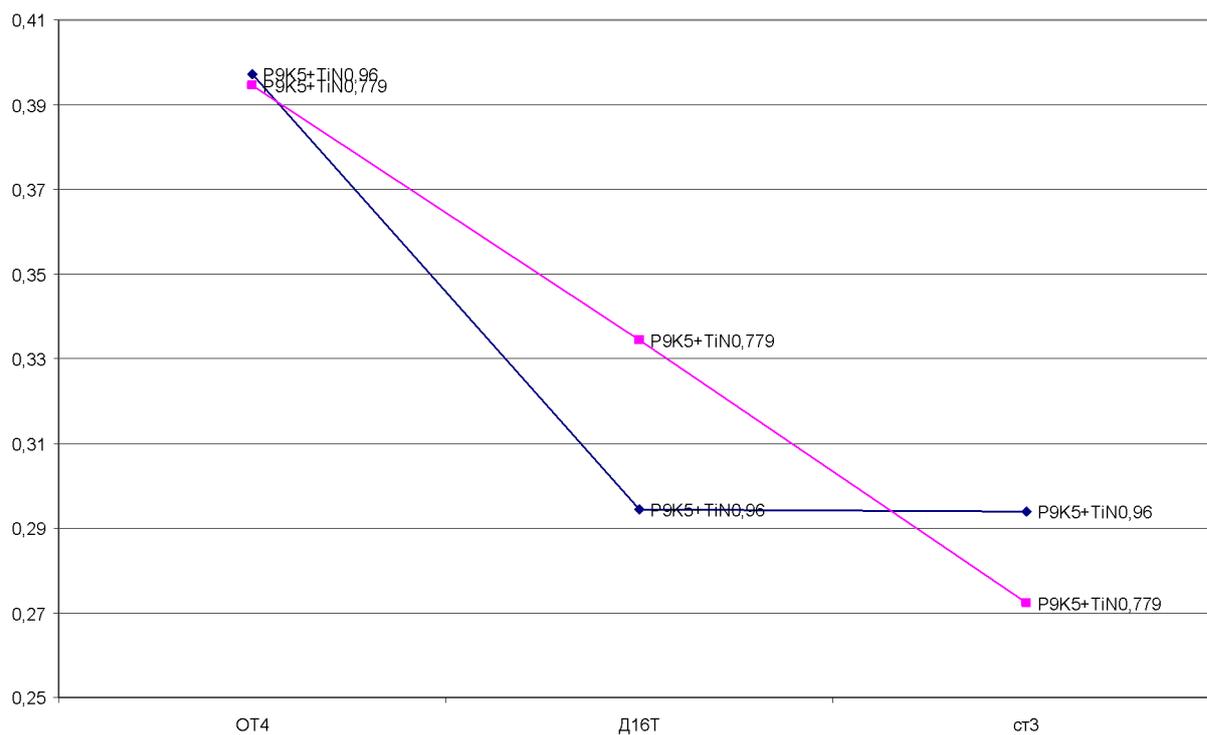


Рис 4.7. Зависимость коэффициент трения  $f_{тр}$  от нестехиометрического состава покрытия и обрабатываемого материала  $t=200^{\circ}\text{C}$

На рис. 4.7.наблюдается иная картина коэффициент трения по OT4 не зависит от нестехиометрического состава покрытий.

## ВЫВОДЫ

Ионно-плазменным методом были получены покрытия с нестехиометрическими составами  $TiN_{0,96}$  и  $TiN_{0,779}$ . и изучено их влияние на фрикционные свойства.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. изменение нестехиометрического состава весьма существенно влияет на эксплуатационные свойства покрытий, в частности на фрикционные свойства;
2. нестехиометрический состав оказывает влияние на коэффициент трения, так например при обработке Ст3 коэффициент трения  $f_{тр}=0,358712$  для  $T14K8+TiN_{0,96}$  и  $f_{тр}=0,241667$  для  $T14K8+TiN_{0,779}$ ;
3. коэффициент трения зависит не только от состава покрытия, но и от материала основы (подложки);
4. наименьший коэффициент трения установлен при обработке сплава Д16Т режущим инструментом из Р9К5 с покрытием нестехиометрического состава  $TiN_{0,96}$   $f_{тр}=0,210795$ , а при обработке сплава ОТ4-  $TiN_{0,779}$   $f_{тр}0,307765$ .

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев А.П. Металловедение: Учебник для вузов. -Изд. 6-е. – М.: Металлургия, 1986.
2. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения. -М.: Металлургия, 1976.
3. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Гинсбург А.Г., Игнатъев З.В. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар. -М.: Наука, 1979.
4. Машков Ю.К. Трибология конструкционных материалов. -Омск: ОмГТУ, 1996.
5. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. -Киев: Наукова думка, 1980.
6. Специальные материалы в машиностроении: Учебник для вузов./ Под ред. Ю.П. Солнцева. – С. –Петербург: Химиздат, 2004.
7. Чичинадзе А.В., Матвиевский Р.М., Браун Э.Д. Материалы в триботехнике и в нестационарных процессах. – М.: Наука, 1986.
8. Материаловедение и конструкционные материалы: Справочник./ Под ред. В.А. Белого. –Минск: Высшая школа, 1989.
9. Машков Ю.К. и др. Полимерные композиционные материалы в триботехнике. – М.: Недра. 2004.
10. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. М.: Машиностроение, 1990. 384с.
11. Верещака А. С., Третьяков И. П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1986. 192с.
12. Волин Э. М. Ионно-плазменные методы получения износостойких покрытий //Технология легких сплавов. 1984. N 10. С.55-74.
13. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 72с.

14. Прогрессивный обрабатывающий инструмент и методы повышения его качества / Под. общ. ред. Кершенбаума В. Я. Центр "Наука и техника". М., 1991. 377 с.
15. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент. / Под. общ. ред. Ю. Н. Внукова Киев.: Техника, 1992. 143 с.
16. Сайдахмедов Р. Х., Карпман М. Г., Фетисов Г. П. Многокомпонентные нитридные ионно-плазменные покрытия на основе титана, ванадия и хрома // Металловедение и термическая обработка металлов. 1993. № 9. С. 8-10.
17. Белый А. В., Карпенко Г. Д., Мышкин Н. К. Структура и методы формирования поверхностных слоев. М.: Машиностроение, 1991. 208 с.
18. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме / Кострицкий А. И., Карпов В. Ф., Кабанченко М. П., Соловьева О. Н. М.: Машиностроение, 1991. 176 с.
19. Ховсепян П. Е., Букеев А. И., Кынев М. Й. Серия установок для нанесения покрытий методом электродугового ионно-плазменного испарения в вакууме // Новые процессы и оборудования для газотермического и вакуумного покрытия. Киев, 1990. С. 101-105.
20. [www.ulvac.ru](http://www.ulvac.ru)
21. Мацевитый В. М. Покрытия для режущих инструментов. Изд. Харьковского государственного университета. 1987. 128 с.
22. Барвинок В. А., Богданович В. И., Бунова Г. З. Основы управления технологическим процессом нанесения плазменных покрытий в вакууме // Прогрессивные методы в технологии производства авиадвигателей. Куйбышев. 1986. С. 76-84.
23. Верещака А. С., Третьяков И. П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.
24. [www.jeol.ru](http://www.jeol.ru)
25. Под ред. Баженова М. Ф. Твердые сплавы // М.: Металлургия. 1978 с. 182

26. Сайдахмедов Р. Х., Карпман М. Г., Фетисов Г. П. Многокомпонентные нитридные ионно-плазменные покрытия на основе титана, ванадия и хрома. // Металловедение и термическая обработка металлов. 1993. N 9. С. 8 – 10.
27. Геллер Ю.А. Инструментальные стали// М.: Металлургия. 1975 с.584
28. Под ред. Раскатова В.М. Машиностроительные материалы// М.: Машиностроение. 1980 с.491
29. Под ред. Сорокина В.Г. Марочник талей и сплавов//М.: Машиностроение. 1989 с.640
30. Геллер Ю. А., Рахштадт А. Г. Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи. 6-е изд. М.: Металлургия, 1989. 456с

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Введение   | 2  |
| 1. Методы регулирования фрикционных свойств пар трения                                     | 5  |
| 1.1. Конструкционные материалы узлов трения  | 5  |
| 1.1.1. Металлические антифрикционные материалы   | 6  |
| 1.1.2. Антифрикционные материалы, получаемые из порошков и пласт-<br>масс                  | 8  |
| 1.2. Методы воздействия на поверхность деталей ЛА с целью улучшения<br>фрикционных свойств | 12 |
| 1.2.1. Методы получения износостойких покрытий   | 14 |
| 2. Исследование износостойкости и фрикционных свойств покрытий                             | 27 |
| 2.1.1. Фрикционные свойства покрытий   | 27 |
| 3. Методика проведения эксперимента  | 36 |
| 3.1. Выбор материала образца   | 36 |
| 3.2. Подготовка микрошлифов  | 38 |
| 3.3. Технологический процесс нанесения покрытий  | 40 |
| 3.4. Измерение шероховатости образцов с покрытиями   | 44 |
| 4. Экспериментальные исследования фрикционных свойств покрытий                             | 51 |
| 4.1. Экспериментальные исследования химического состава образцов                           | 51 |
| 4.2. Экспериментальные измерение шероховатости   | 53 |
| 4.3. Экспериментальные исследования фрикционных свойств                                    | 54 |
| Выводы   | 63 |
| Список использованной литературы   | 64 |