

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ  
ХАРЬКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

**ЛУНЕВ ИГОРЬ ВАЛЕНТИНОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МАШИН И  
ИЗДЕЛИЙ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ СЛОЖНОГО СОСТАВА  
ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ**

05.02.01 – материаловедение в машиностроении

/промышленность/

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Харьковском авиационном институте

Е. Жуковского и Харьковском автомобильно-дорожном институте

учные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор ПАДАЛКА В.Г.,

кандидат технических наук, доцент ГЛАДКИЙ И.П.

официальные оппоненты:

доктор технических наук

Эмий В.И.

кандидат технических наук

Берестнев В.М.

Выдающее предприятие:

ПО "Завод им. Малышева"

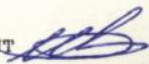
Защита диссертации состоится "28" октября 1993 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании специализированного совета К068.12.01 в Харьковском автомобильно-дорожном институте.

Адрес: 310078, г. Харьков-78, ул. Петровского, 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского автомобильно-дорожного института.

Автореферат разослан "23" сентября 1993 г.

Ученый секретарь специализированного

совета, кандидат технических наук, доцент  И.В. Дощечкина



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Важной проблемой машиностроения является повышение надежности и долговечности машин и механизмов. Решение этой задачи тесно связано с созданием новых конструкционных материалов со специальными физико-механическими свойствами, обеспечивающими повышенные эксплуатационные характеристики изделий. Учитывая, что в большинстве случаев разрушение деталей начинается с поверхности, как, например, при трении, коррозионных процессах и пр., одним из путей повышения срока службы изделий является улучшение свойств поверхности уже существующих конструкционных материалов. Среди известных методов изменения поверхностных свойств изделий важную область занимают ионно-плазменные технологические процессы, которые позволяют получать покрытия с уникальными физико-механическими характеристиками.

В настоящее время развитие ионно-плазменных технологий идет по пути получения покрытий из катодов сложного состава. Использование таких катодов (как металлических, так и диэлектрических) позволяет получать более широкий спектр свойств покрытий путем варьирования параметрами процесса их формирования, которые в данном случае определяют не только структуру (как при использовании моноэлементных катодов), но и состав покрытий. При этом основная трудность заключается в формировании слоев, имеющих элементный состав, аналогичный составу исходного материала. Исследование общих закономерностей получения покрытий сложного состава является научной основой технологических процессов и обеспечивает выбор наиболее оптимальных режимов формирования покрытий.

Нанесение покрытий с оптимальным комплексом свойств позволяет существенно повысить эксплуатационный ресурс изделий машиностроения.

#### Цель работы и задачи исследований

Целью настоящей работы является разработка технологических процессов, обеспечивающих улучшение поверхностных свойств изделий машиностроения путем нанесения покрытий сложного состава ионно-плазменными методами.

В работе были поставлены и решены следующие задачи: на основе комплексных исследований вч-магнетронного разряда разработано высокопроизводительное технологическое оборудование; изучены особенности формирования многокомпонентных слоев заданного состава вч-магнетронным распылением материалов и вакуумно-дуговым методом; исследованы физико-механические свойства конденсатов сложного состава; определены оптимальные режимы получения высококачественных защитных слоев из оксида алюминия и многослойных антифрикционных покрытий на основе сплава свинец-олово-медь; проведены эксплуатационные испытания изделий с ионно-плазменными покрытиями.

#### Научная новизна

1. На основании комплексных исследований зависимости параметров плазмы разряда вч-магнетрона планарного типа от технологических режимов научно обоснованы пути усовершенствования конструкции установки и разработаны способы управления характеристиками плазмы для эффективного нанесения высококачественных диэлектрических покрытий.
2. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена связь между соотношением геометрических параметров вч-магнетронной системы планарного типа и функцией распределения толщины покрытия

по поверхности подложки.

3. На основании исследования процессов, происходящих при получении покрытий сложного состава вч-магнетронным и вакуумно-дуговым методами, установлены закономерности управления формированием покрытий заданного состава как в случае тугоплавких химических соединений, так и в случае легкоплавких сплавов.

4. Для покрытий, имеющих стехиометрический состав  $Al_2O_3$ , полученных вч-магнетронным методом, установлены закономерности влияния технологических режимов нанесения на их фазовый состав и структуру.

#### Практическая значимость результатов работы

1. Даны рекомендации по использованию планарных высокочастотных магнетронов с кольцевой зоной эрозии мишени для получения равно толщинных диэлектрических покрытий достаточно большой протяженности.

2. Разработан метод очистки и активации поверхности слабо термостойких материалов перед нанесением диэлектрических покрытий путем использования тлеющего разряда в среде аргона.

3. Предложена технология формирования защитного покрытия на основе оксида алюминия на деталях прессформ литья под давлением медных сплавов, изготовленных из стали 4Х5МФС.

4. Разработана технология, позволяющая путем нанесения покрытия из оксида алюминия повысить стойкость режущего инструмента из стали Р6М5 при обработке медных сплавов.

5. Даны рекомендации по использованию высокочастотного магнетронного покрытия на основе оксида алюминия в качестве биологически индифферентного защитного слоя на медицинских имплантатах.

6. Разработаны режимы формирования антифрикционных покрытий

на основе сплава медь-олово-свинец в вакуумно-дуговом разряде с интегрально-холодным катодом. Установлена перспективность восстановления антифрикционного слоя на изношенных вкладышах подшипников коленчатых валов тяжелонагруженных дизелей методом осаждения покрытий в вакуумно-дуговом разряде.

#### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Высокая плотность плазмы ( $\sim 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ), высокая температура электронов ( $\sim 10 \text{ эВ}$ ), высокая степень ионизации частиц (до 80%) обеспечивают перспективность использования вч-магнетронного разряда планарного типа для формирования различных диэлектрических защитных покрытий заданного состава.

2. Данные о связи между режимами получения покрытий из оксида алюминия методом вч-магнетронного распыления, их составом, структурой и свойствами позволяют эффективно наносить высококачественные защитные слои, повышающие служебные характеристики изделий, в частности режущего инструмента и деталей прессформ литья под давлением медных сплавов.

3. Результаты исследования зависимости между режимами получения вакуумно-дуговых покрытий на основе сплава свинец-олово-медь, их составом, структурой и свойствами позволяют рекомендовать оптимальные параметры технологического процесса нанесения антифрикционных покрытий вкладышей подшипников коленчатых валов дизелей типа 5Д49.

4. Высокая биологическая индифферентность оксида алюминия определяет целесообразность его применения в качестве покрытий для защиты изделий медицинской техники.

#### Апробация работы.

Основные результаты и положения диссертации доложены на Межот-

раслевым научно-техническом семинаре "Физические основы и новые направления плазменной технологии в микровлектронике" (Харьков, 1989), Всесоюзной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (Новосибирск, 1990), на II Всесоюзном научно-техническом симпозиуме "Современное оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов" (Саратов, 1990), Республиканской научно-технической конференции "Увеличение срока службы изделий методами поверхностного упрочнения" (Харьков, 1991), 56-й научно-технической и научно-методической сессии ХАДИ (Харьков, 1992).

#### Публикации

По результатам исследований на тему диссертации опубликовано 6 работ, получено положительное решение по заявке на изобретение.

#### Объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, изложена на 129 страницах машинописного текста, содержит 7 таблиц и 48 рисунков. Список использованной литературы включает 188 источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материалы, оборудование и методика исследований

Среди методов осаждения покрытий, основанных на генерации потока частиц испарением, наибольшими возможностями обладают вакуумно-дуговые методы, а среди методов, основанных на процессе ионного распыления—магнетронные методы осаждения. Недостатком вакуумно-дугового метода является наличие в генерируемом потоке значительной доли капельной фазы, что резко снижает защитные свойства покрытий, и в частности, не позволяет получать диэлектрические покрытия высокого качества. Поэтому данный метод используется в случаях, когда на пористость покрытий не накладывается существенных ограничений (например в случае антифрикционных слоев). Вч магнетронный метод, хотя и уступает по производительности, однако покрытия, полученные им обладают более высоким качеством (особенно это касается диэлектрических покрытий и покрытий сложного состава).

Для возможности обобщения особенностей осаждения многокомпонентных покрытий в качестве основных объектов исследования были выбраны материалы с резко различающимися свойствами — тугоплавкий оксид алюминия ( $T_{пл} = 2050^\circ\text{C}$ ) и легкоплавкий сплав, состоящий из 3%Cu, 10%Sn и 87%Pb ( $T_{пл} \approx 450^\circ\text{C}$ ).

Для осаждения покрытий на основе  $Al_2O_3$  была сконструирована на базе установки ВУ-1Б вч-магнетронная установка, имеющая источник плазмы планарного типа и усовершенствованные электрические цепи питания, что позволило в 2-3 раза повысить эффективность процесса осаждения покрытий по сравнению с существующими системами.

Осаждение покрытий вакуумно-дуговым методом проводилось на модернизированной установке "Булат-3Т", имеющей дополнительный че-

твертый источник плазмы. Это позволило в едином вакуумном цикле получать покрытия, состоящие из слоев четырех различных материалов.

Границы существования плазмообразующих разрядов, их электрические и физические характеристики исследованы зондовыми и электротехническими методами. В качестве исходных катодных материалов использованы химически чистый  $Al_2O_3$  в порошкообразном и прессованном состояниях, а также баббит состава 3%Cu, 10%Sn и 87%Pb. В случае оксида алюминия изучалось влияние энергетических параметров процесса формирования покрытий (температура подложки  $T_n$ , величина постоянного смещения вч-напряжения на подложке  $U_{см}$ ) на миграционную подвижность атомов по поверхности конденсации и, как следствие, на состав, структуру и физико-механические свойства покрытий. По структуре покрытий, полученных непосредственно осаждением и покрытий, прошедших дополнительный отжиг в вакууме при  $1000^\circ C$  оценивалась степень диссоциации частиц в генерируемом потоке материала и на поверхности подложки, как один из возможных механизмов изменения состава покрытий.

Исследование химсостава покрытий проводилось путем обратного ре-зерфордского рассеяния протонов, спектрофотометрическим и атомно-абсорбционным методами. Структура и фазовый состав покрытий изучались рентгенографически и электронографически. Морфология поверхности и структура покрытий исследовались методами оптической и электронной микроскопии. Пористость диэлектрических покрытий определялась электрохимическим методом. Исследования микротвердости проводились на приборе ПМТ-3. Определение адгезионных характеристик диэлектрических покрытий проводилось склерометрическим методом, а многослойных многокомпонентных покрытий на основе металлов

и сплавов -- методом нормального отрыва.

Стойкость режущего инструмента определялась в производственных условиях. Критерием стойкости служило время нормальной работы инструмента (время до первой перезаточки).

Особенности формирования и некоторые свойства покрытий на  
основе оксида алюминия.

Проведенные исследования показали, что в условиях низкой миграционной подвижности адсорбированных атомов по поверхности подложки происходит формирование метастабильных неравновесных структур со значительным содержанием рентгеноаморфной фазы. Так, в случае  $Al_2O_3$  обнаружено, что при низких значениях температуры подложки ( $\sim 350^\circ C$ ) и энергии ионов ( $\sim 50$  эВ, что достигается при  $U_{ем} \sim 60$  В), бомбардирующих поверхность конденсации (последняя определяется величиной постоянного смещения вч-напряжения на подложке  $U_{ем}$ ), происходит формирование мелкодисперсных поликристаллических покрытий, содержащих метастабильные  $\gamma$ - и  $\chi$ -фазы и рентгеноаморфную фазу. При этом поверхность пленок губчатая с сильно развитой сеткой каналов и пор. Одной из причин такого поведения могло быть обеднение покрытия кислородом в процессе осаждения. Однако, добавление в плазму кислорода не привело к формированию стабильных фаз. Между тем отжиг данных образцов при  $1000^\circ C$  в течение двух часов в вакууме привел к образованию стабильной  $\alpha$ -структуры. Это свидетельствует о соответствии химического состава покрытия составу исходного материала. Условия, обеспечивающие повышение подвижности адатомов приводят к формированию покрытий с более совершенной структурой. Так, увеличение  $U_{ем}$  до  $\sim 200$  В (при этом  $T_n \sim 350+400^\circ C$ ) обеспечивает формирование поликристаллических покрытий, содержащих только  $\alpha-Al_2O_3$ ; шерохо-

ватость поверхности при этом уменьшается. С другой стороны, рост  $T_n$  до  $\sim 600^\circ\text{C}$  (при  $U_{\text{см}} \sim 60\text{ В}$ ) приводит к увеличению в покрытии доли  $\alpha$ -фазы. Однако в этих покрытиях еще присутствует рентгеноаморфная фаза, которую можно устранить еще большим повышением температуры. Но такой путь нетехнологичен, так как при высоких температурах происходит разупрочнение основного металла-подложки и обрабатываемое изделие становится непригодным к эксплуатации.

Исследования показали, что условия конденсации, обеспечивающие формирование стабильной  $\alpha$ -структуры, в случае  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , приводят также к уменьшению сквозной пористости, увеличению микротвердости покрытий и росту степени их адгезионного взаимодействия с подложкой. Так, сквозная пористость покрытий при увеличении  $T_n$  от  $300$  до  $600^\circ\text{C}$  уменьшается почти на порядок и составляет  $10\text{ пор/см}^2$  (средний размер пор  $\sim 0,25\text{ мкм}$ ). Аналогично ведет себя пористость при увеличении  $U_{\text{см}}$ . Так, при  $U_{\text{см}} \sim 200\text{ В}$  плотность сквозных пор снижается до  $\sim 2\text{ пор/см}^2$ . Что касается микротвердости, то рост как температуры осаждения, так и напряжения смещения приводит к ее увеличению, и уже при  $U_{\text{см}} \sim 150+200\text{ В}$  микротвердость покрытия равна микротвердости массивного поликристаллического  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\sim 21\text{ ГПа}$ ).

По своим химическим, теплофизическим и физико-механическим свойствам оксид алюминия может быть с успехом использован в качестве защитного покрытия на ряде изделий машиностроения (режущий инструмент, детали пресоформ ЛПД и др.). Однако в жестких эксплуатационных условиях при значительных колебаниях температуры и нагрузок на границе раздела "пленка-подложка" происходит концентрация напряжений, за счет различия физических характеристик материалов основы и покрытия, что приводит к отслаиванию покрытия

и, следовательно, к его низкой эффективности. Для устранения такого явления между покрытием и основой помещается подслой из материала, имеющего промежуточные значения физико-механических и теплофизических параметров. Были изучены промежуточные слои различной толщины из хрома и титана. Исследования показали, что в данном случае в качестве такого слоя целесообразно использовать титан толщиной  $\sim 1 \mu\text{м}$ .

Поскольку исследовалась возможность использования покрытий на основе  $Al_2O_3$  в качестве упрочняющих защитных слоев на режущем инструменте, то как один из важных параметров защитного покрытия было исследовано адгезионное взаимодействие слоя  $Al_2O_3$  с обрабатываемыми материалами (медью, свинцом, цинком — основными компонентами латуни). Обнаружено, что адгезия расплавов данных металлов с покрытием  $Al_2O_3$  низка, причем ее значения ниже, чем для широко используемого в машиностроении защитного покрытия на основе нитрида титана. Это делает покрытия из  $\alpha-Al_2O_3$  перспективными для применения в качестве защитных, т.к. при низкой адгезии снижается контактное взаимодействие покрытия с контртелом (уменьшается коэффициент трения, коррозионный износ и пр.).

Состав, структура и физико-механические свойства покрытий на основе Pb-Sn-Cu, полученных вакуумно-дуговым методом

Исследованы состав, структура и физические характеристики вакуумно-дуговых покрытий, полученных из катода с составом 3% Cu, 10% Sn и 87% Pb. Определены режимы процесса получения покрытий, имеющих состав, сходный с составом катода; такой состав обеспечивает высокие антифрикционные характеристики покрытий.

Результаты определения элементного состава покрытий на основе

$Pb-Sn-Cu$  показывают, что состав конденсатов может отличаться от состава катода. При этом, концентрация легколетучих компонентов ( $Pb, Sn$ ) в покрытиях больше, а слаболетучих ( $Cu$ ) – меньше, чем в катоде, что вызвано отличием скоростей испарения и диаграмм направленности разлета различных элементов из катодного пятна (легколетучие компоненты характеризуются более широкой диаграммой разлета, чем тугоплавкие). Однако, процессом изменения состава покрытия можно управлять как температурой подложки, так и величиной отрицательного напряжения смещения на ней (последнее является более технологичным). Так, рост величины  $U_{ем}$  приводит к процессам реиспарения легколетучих компонентов и, соответственно, к уменьшению их содержания в покрытии. Видно (рис.1), что при низких значениях  $U_{ем}$  состав покрытия определяется процессами на катоде (т.е. процессами неравномерного испарения компонентов); при  $U_{ем} \sim 40$  В начинают играть роль процессы реиспарения на подложке, и покрытие имеет состав, сходный с составом катода. При  $U_{ем} > 50$  В процессы реиспарения на подложке являются определяющими в формировании состава покрытия. Таким образом, изменение состава материала при генерации потока частиц в катодном пятне может быть устранено за счет повышения (до определенной величины) подвижности адатомов по поверхности конденсации.

Исследования структуры и фазового состава покрытий на основе  $Pb-Sn-Cu$  показали, что покрытия имеют поликристаллическую структуру и состоят из свинцовой матрицы с включениями фазы  $CuSn$ . При этом покрытия отличаются высокой дисперсностью структуры. Средний размер включений  $CuSn$  в покрытии составляет  $\sim 10$  мкм, в то время как средний размер включений в массивном материале составляет  $\sim 100$  мкм. Рост содержания меди в покрытии

при увеличении  $U_{\text{см}}$  приводит к повышению концентрации фазы  $\text{CuSn}$ , а при  $U_{\text{см}} \sim 70$  В в покрытии появляется фаза  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ .

Зависимость состава покрытия на основе сплава  $\text{Pb-Sn-Cu}$  от величины отрицательного напряжения смещения на подложке

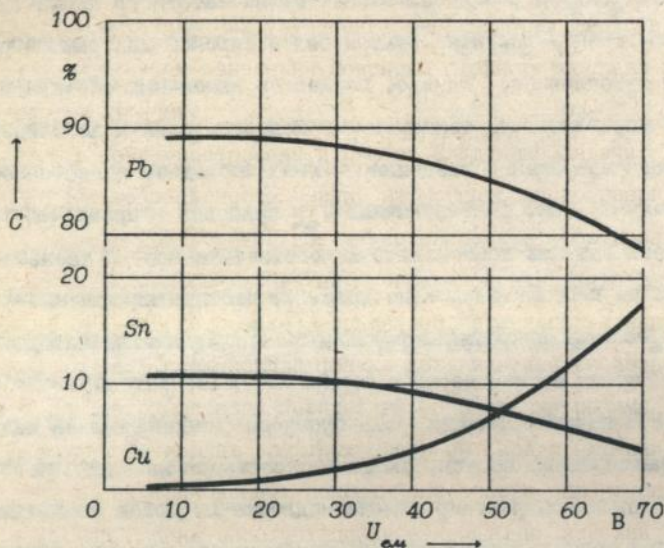


Рис.1.

Ток дуги - 20А, давление в камере -  $1,3 \cdot 10^{-3}$  Па, состав катода - 3,0% Cu, 10,0% Sn, 87,0% Pb.

При этом микротвердость покрытий растет от 96 МПа при  $U_{\text{см}}=10$  В до 165 МПа при  $U_{\text{см}}=70$  В. Зависимость микротвердости от величины тока дуги в интервале 10-30 А

выражена слабее и свидетельствует о слабом изменении соотношения скоростей испарения различных компонентов материала катода. Что касается величины адгезии покрытий на основе  $\text{Pb-Sn-Cu}$ , то, как и в случае оксида алюминия, ее величина возрастает с ростом вели-

чины отрицательного напряжения смещения от 12 при  $U_{см} = 10$  В до 60 МПа при  $U_{см} = 70$  В.

Результаты исследования триботехнических характеристик данных покрытий приведены в таблице 1 (условия испытаний: нагрузка 43 МПа, скорость скольжения 5м/с, путь трения 10000м, смазка М-10, площадь трущейся поверхности  $4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , контртело — чугун ВЧ45, используемый для изготовления коленвалов).

Таблица 1.

Зависимость триботехнических характеристик покрытия Pb-Sn-Cu от величины отрицательного напряжения смещения на подложке.

$U_{см}$ , В	Состав покрытия, %			Коэффициент трения, $\mu(P)$	Износ (P), г	
	Pb	Sn	Cu		покрытие	ось
10	88,50	11,30	0,2	0,07	0,11	0,000
40	87,0	9,5	3,5	0,08	0,016	0,002
70	78,5	4,5	17,0	0,1	0,08	0,008

Видно, что наилучшими параметрами обладают покрытия, полученные при величине  $U_{см} = 40$  В, т.е. имеющие состав, близкий к составу катода (3%Cu, 10% Sn и 87% Pb).

#### Практическое применение покрытий на основе оксида алюминия и баббита

Для опытно-промышленных испытаний были подготовлены партии режущего инструмента из стали Р6М5 и прессформ литья под давле-

нием (ЛПД) медных сплавов из стали 4Х5МФС с покрытием на основе  $\alpha$ -модификации  $Al_2O_3$ . Сталь Р6М5 была выбрана как наиболее употребляемая для изготовления режущего инструмента, а сталь 4Х5МФС – как перспективная для использования в качестве материала прессформ ЛПД медных сплавов. Показано, что стойкость режущего инструмента с покрытием из  $\alpha-Al_2O_3$  и подслоем титана увеличивается примерно в 3,7 раза (резание латуни Л63, рис.2). Стойкость деталей прессформ с покрытием из  $\alpha-Al_2O_3$  с подслоем

Зависимость стойкости резцов из стали Р6М5 с покрытием  $\alpha-Al_2O_3$  от толщины покрытия

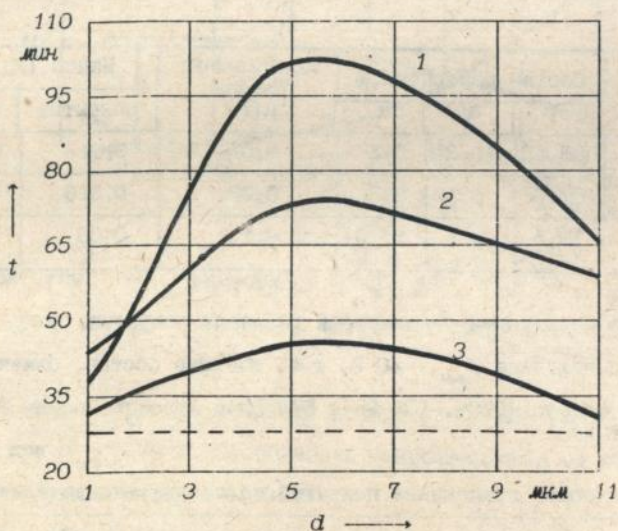


Рис.2.

1 - Р6М5-Ti- $Al_2O_3$ ; 2 - Р6М5-Cr- $Al_2O_3$ ; 3 - Р6М5- $Al_2O_3$ ;  
 ---- - стойкость резцов без покрытия (28 мин).

Скорость резания 50м/мин, подача 0,2мм/об, глубина резания 1мм.

титана в 5 раз превышает стойкость прессформ из стали 4Х5МФС без покрытия и в ~2 раза – стойкость прессформ из дорогой вольфрамсодержащей стали 3Х2В8Ф, которая обычно используется для изготовления таких прессформ (табл.2).

Таблица 2.

Зависимость стойкости прессформ ЛПД медных сплавов, выполненных из стали 4Х5МФС с покрытием  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , от толщины промежуточного слоя титана.

Толщина подслоя титана, мкм	Количество запрессовок
0	3100
0,5	8300
1,0	10100
1,5	8000
2,0	6200
прессформа из стали 4Х5МФС без покрытия	2000
прессформа из стали 3Х2В8Ф без покрытия	5000

Толщина покрытия  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  – 3 мкм, температура подложки при осаждении титана ~400+450 °С).

Исследована также возможность восстановления вкладышей подшипников тяжело нагруженных дизелей в целях экономии сырья, повышения качества изделий, замены вредного гальванического производ-

ства экологически чистым. Восстановление проводилось путем нанесения многослойного антифрикционного покрытия на основе баббита вакуумно-дуговым методом. Восстанавливаемое покрытие состояло из четырех слоев: нижний слой на основе сплава 10+18% Sn и меди толщиной 15+21 мкм, слой никеля толщиной 1+2 мкм, слой, состоящий из свинца с 2+3,5% меди и 8+13% олова толщиной 24+36 мкм и слой олова - 1+3 мкм. Состав, очередность и толщина слоев выбиралась в соответствии с существующим ГОСТом для гальванических антифрикционных покрытий.

Для создания покрытия высокого качества осаждение слоев проводилось в едином вакуумном цикле на модернизированной установке "Булат-3Т", оснащенным четырьмя испарителями металлов. Контроль качества покрытий при выборе режимов осаждения осуществлялся путем измерения их физико-механических параметров. В результате были получены покрытия, удовлетворяющие по своим показателям действующему ГОСТу, разработанному для новых гальванических покрытий этого типа. Стендовые испытания вкладышей с восстановленным вакуумно-дуговым методом антифрикционным покрытием показали их пригодность к эксплуатации.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Комплексные исследования плазмы разряда вч-магнетрона планарного типа показали, что при усовершенствовании конструкции установки (изменении электрических схем питания и геометрических параметров источника плазмы) данный метод может быть эффективно использован для формирования высококачественных защитных диэлектрических покрытий.

2. Установлена зависимость функции распределения толщины покрытия по поверхности подложки от соотношения геометрических параметров зоны эрозии катода. Это позволило определить максимальную площадь подложки, на которую гарантировано нанесение равнотолщинного покрытия.

3. Установлено, что при вч-магнетронном осаждении покрытий на основе оксидов металлов ( $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $SrTiO_3$ ) сохранение элементного состава пленок по сравнению с составом катода наблюдается в интервалах напряжения на катоде - 400+1500 В, напряжения смещения на подложке - 10+200 В и температуры подложки 200+600°С.

4. Показано, что для покрытий, имеющих стехиометрический состав  $Al_2O_3$ , получаемых вч-магнетронным методом, технологические режимы влияют на фазовый состав и структуру конденсатов. Наиболее совершенной структурой обладают покрытия, полученные в условиях высокой подвижности адсорбированных атомов по поверхности конденсации пленки. Эти условия обеспечиваются при величине отрицательного напряжения смещения  $U_{c,м} \geq -150$  В (при температуре подложки ~ 350+400°С).

5. Доказано, что процесс генерации потока плазмы осаждаемого материала в вакуумно-дуговом разряде в случае использования катода из баббита (3%Cu, 10%Sn и 87%Pb) сопровождается значительным изме-

нением состава потока по отношению к составу катода. Концентрацией элементов в осаждаемом покрытии можно управлять путем изменения температуры подложки или энергии ионов, бомбардирующих поверхность конденсации. Это позволяет компенсировать изменения состава плазменного потока и получать покрытия с содержанием элементов, аналогичным составу катода.

6. Разработаны рекомендации по технологии нанесения высококачественных покрытий заданного состава как в случае тугоплавких химических соединений, так и в случае легкоплавких сплавов. Предложен метод очистки и активации поверхности слабо термостойких материалов перед нанесением диэлектрических покрытий путем использования тлеющего разряда в среде аргона.

7. Показано, что стойкость режущего инструмента из стали Р6М5 с нанесенным на его рабочую поверхность покрытием из  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  с подслоем  $\text{Ti}$   $\sim 1$  мкм (при обработке латуни) в  $\sim 3,7$  раза выше стойкости инструмента без покрытия.

8. Доказано, что стойкость деталей прессформ литья под давлением медных сплавов из стали 4Х5МТС с покрытием из  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  с подслоем титана (1 мкм) в  $\sim 5$  раз выше стойкости деталей из этой же стали без покрытия и в  $\sim 2$  раза выше стойкости деталей из стали 3Х2В8Ф.

9. Использование вакуумно-дугового метода для нанесения многослойного антифрикционного покрытия на вкладыши подшипников коленвалов тяжелонагруженных дизелей позволяет улучшить триботехнические параметры вкладышей, а также реализовать процесс восстановления изношенных вкладышей.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Падалка В.Г., Лунев И.В. Высокочастотные магнетронные распылительные системы и возможности их технологических применений// Материалы Межотраслевого научно-технического семинара "Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике".-М.,1989.-С.5-7.
2. Агафонов В.И., Лунев И.В., Падалка В.Г. Некоторые характеристики тонких пленок окислов, полученных методом вч-магнетронного распыления// Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения".-Новосибирск,1990.-С.20.
3. Падалка В.Г., Лунев И.В. Синтез покрытий на основе оксидов алюминия и кремния с помощью вч-магнетронного распыления// Тезисы докладов II Всесоюзного научно-технического симпозиума "Современное электротермическое оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов".-М.:Информэлектро, 1990.-С.28.
4. Падалка В.Г., Лунев И.В., Агафонов В.И. Пористость и электрическая прочность тонких пленок оксидов алюминия и циркония, полученных методом высокочастотного магнетронного распыления// Физика и химия обработки материалов.-1991.-№3.-С.81-84.
5. Коба В.И., Лунев И.В., Падалка В.Г. О равнотолщинности покрытий, нанесенных с помощью вч магнетронного распыления//Физика и химия обраб. материалов.-1992.-№2.-С.94-98.
6. Внутрикостный имплантат/В.Г.Падалка, М.А.Нападов, И.В.Лунев и др.//Пол.решение от 19.04.90 по заявке 4673443/30-14 с приор. от 04.04.89.
7. Исследование, разработка и реализация способа восстановления

ния деталей вкладышей подшипников коленчатых валов дизелей типа  
БД49. - Отчет о НИР № 01.90.0011115/МинВузУССР. - Харьков, 1991. - 64с.

Ответственный за выпуск



к. т. н., доцент

Можаров М. В.

Подписано в печать 28.06.93г. Формат 60x84/16.  
Офсетн. печать. Усл.п.л.0,9. Уч.лзд.л.0,9.  
Тираж 100. Заказ № 304.

---

Харьков-108, ротапринт ХЭТИ.



AB 28.256

**AB 28.256**