

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
КИЕВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

На правах рукописи

МАРЧУК ВЛАДИМИР ЕФРЕМОВИЧ

УДК 621.891

ПОВЫШЕНИЕ ТРИВОСТОЙКОСТИ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ
МОДИФИЦИРОВАНИЕМ НАПЫЛЯЕМЫХ ПОРОШКОВЫХ
КОМПОЗИЦИЙ

Специальность 05.02.04 - Трение и износ в машинах

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

К и е в - 1 9 9 4



AB 31.259

Работа выполнена в Киевском институте ВВС

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент В.В. Щепетов

Научный консультант:

кандидат технических наук, доцент В.Ф. Лабунец

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Е.А. Марковский

кандидат технических наук, в.н.с. А.И. Духота

Ведущая организация:

Институт сверхтвердых материалов Национальной Академии наук Украины

Защита состоится " 9 " декабря 1994 г. в 10 часов на заседании специализированного совета К 072.04.03 в Киевском Международном университете гражданской авиации по адресу: 252058, Киев, проспект Космонавта Комарова, 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан " 4 " ноября 1994 г.

Ученый секретарь

специализированного ученого совета

кандидат технических наук, доцент

В.Ф. ЛАБУНЕЦ В.Ф. ЛАБУНЕЦ

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Среди комплекса проблем, решение которых весьма актуально в современных условиях перехода народного хозяйства на принципы рыночной экономики, одной из важнейших является повышение надежности и долговечности деталей машин, работающих в условиях трения. Одним из направлений в ее решении, с учетом тенденции перехода от объемно-структурного упрочнения к поверхностному, является использование защитных износостойких покрытий. В настоящее время, среди многочисленных методов формирования износостойких покрытий, определяющих эксплуатационную надежность узлов трения, значительный практический интерес представляют технологии, использующие порошковые материалы, и в частности, детонационно-газовое напыление.

Детонационный метод нанесения покрытий позволяет получать высококачественные, практически беспористые покрытия с высоким уровнем адгезионной прочности с материалом основы. Применение детонационных покрытий позволяет улучшить и даже полностью изменить поверхностные свойства деталей, получить заранее прогнозируемые свойства рабочих поверхностей с тем, чтобы наилучшим образом удовлетворить условиям эксплуатации.

Детонационные износостойкие покрытия могут широко использоваться не только для повышения надежности и долговечности узлов трения при изготовлении, но их применение крайне эффективно и в ремонтной практике при восстановлении изношенных деталей, в том числе изделий из цветных металлов и сплавов.

Внедрение детонационных покрытий для повышения износостойкости деталей машин тормозится вследствие отсутствия научных сведений о закономерностях процессов их изнашивания, а также областей рационального технико-экономического применения.

При общей положительной оценке эффективности и целесообразности использования детонационных покрытий для защиты узлов трения от износа их широкое применение сдерживается, кроме того, ограниченной номенклатурой порошковых материалов, выпускаемых промышленностью.

Таким образом, для применения детонационных покрытий при упрочнении и восстановлении изношенных деталей машин необходимо проведение исследовательских работ, ставящих своей целью расширение ассортимента порошковых материалов для детонационного напыления.

Однако создание новых порошковых материалов для детонационно-газового напыления является сложным и трудоемким процессом, требующим значительных материальных затрат и времени. Более перспективным способом получения износостойких покрытий является модифицирование уже имеющихся, разработанных и апробированных технологией получения композиционных порошков.

Цель и задачи исследований. Целью данной работы является повышение триботехнических свойств детонационных покрытий за счет модифицирования исходных порошковых композиций, исследование закономерностей изнашивания модифицированных покрытий при трении без смазочного материала и в присутствии смазочной среды при различном сочетании пар трения в широком диапазоне нагрузочно-скоростных характеристик и определение границ их оптимальной работоспособности как в нормальных, так и в экстремальных условиях эксплуатации.

В соответствии с вышеизложенным, основными задачами исследований являются:

1. Обоснование применения модифицирующей добавки и определение ее рационального содержания в порошковых композициях для напыления детонационных покрытий.

2. Исследование физических аспектов формирования покрытий, напыляемых композиционными порошками, содержащими в качестве структурной составляющей модифицирующую добавку.

3. Исследование закономерностей механизмов трения и изнашивания модифицированного покрытия и определение кинетики формирования структуры поверхностного слоя в условиях отсутствия смазочного материала.

4. Исследование закономерностей процесса изнашивания модифицированного покрытия, напыленного композиционным порошком при трении в условиях граничной смазки.

5. Исследование фазового состава, тонкой кристаллической

структуры покрытия с добавлением модифицирующей добавки и ее влияния на развитие процессов сопротивления износу.

6. Изучение влияния внутреннего напряженного состояния поверхностных модифицированных слоев на характеристики трения и изнашивания.

7. Исследование совместимости модифицированного покрытия в триботехнических парах с антифрикционными и конструкционными материалами при трении без смазочного материала и в условиях граничной смазки.

8. На основании анализа полученных результатов разработать научно-обоснованные и практические рекомендации по повышению долговечности и надежности узлов трения, напыленных износостойкими детонационными модифицированными покрытиями и определить границы их оптимальной технико-экономической работоспособности.

Научная новизна

1. Обосновано применение тетраборнокислого натрия в качестве модифицирующей добавки и определено его рациональное содержание в порошковой композиции на основе никеля для напыления детонационных покрытий.

2. Изучено внутреннее напряженное состояние поверхностных модифицированных слоев детонационного покрытия.

4. Раскрыт механизм изнашивания модифицированного детонационного покрытия в условиях трения без смазочного материала и в присутствии смазочных сред, а также совместимость его с конструкционными и антифрикционными материалами.

5. Определен фазовый и химический состав структуры модифицированного покрытия и его влияние на развитие процессов сопротивления износу.

Практическая значимость и реализация результатов работы

1. Предложен способ модифицирования исходных порошковых композиций для напыления покрытий и определено рациональное содержание тетраборнокислого натрия в исследуемом детонационном покрытии.

2. Экспериментальными данными, приведенными в работе, установлено, что модифицированное покрытие обладает высоким

триботехническими характеристиками и может успешно заменить в узлах дорогостоящие вольфрамсодержащие покрытия из сплава ВК-15.

3. Даны рекомендации по способу модифицирования порошков тетраборнокислым натрием для детонационно-газового напыления покрытий, а также по совместимости модифицированного покрытия с конструктивными и антифрикционными материалами как при трении без смазочного материала, так и в условиях граничной смазки.

4. Внедрение модифицированного покрытия, нанесенного детонационным методом, позволило уменьшить расход дефицитных материалов и увеличить работоспособность деталей нефтеперерабатывающего оборудования в 1,8-2,3 раза.

Основные положения выносимые на защиту.

1. Обоснование применения модифицирующей добавки в виде тетраборнокислого натрия и определение его рационального содержания в композиционном порошке на основе никеля для детонационного напыления покрытий.

2. Влияние тетраборнокислого натрия на физико-механические свойства исследуемого покрытия.

3. Результаты экспериментальных исследований процессов изнашивания модифицированного покрытия при трении без смазочного материала и в условиях граничной смазки и кинетику формирования структуры поверхностного слоя.

4. Результаты исследований совместимости модифицированного покрытия в триботехнических парах с антифрикционными и конструктивными материалами.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и одобрены на следующих конференциях и семинарах: IV Всесоюзная научно-техническая конференция "Композиционные покрытия" (г. Житомир, 1991г.); XXXII внутривузовская военно-научная конференция КИ ВВС (г. Киев, февраль 1993г.); XXXIII внутривузовская военно-научная конференция КИ ВВС (г. Киев, 1993г.); на расширенном заседании кафедры "Материаловедения, технологии и ремонта авиационной техники" КИ ВВС (г. Киев, 1994г.); специализированном семинаре отдела

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 12 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы и приложений. Содержание работы изложено на 230 страницах машинописного текста и содержит 72 рисунка и 15 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 182 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, проводится аннотация работы, указаны основные положения, определяющие научную и практическую значимость работы.

В первой главе диссертации, на основании выполненного обзора, рассмотрены основные представления о механизме трения и изнашивания материалов. Показано, что в настоящее время достигнуты значительные успехи в теоретическом описании и экспериментальном изучении природы трения и изнашивания.

Дан анализ газотермических методов поверхностного упрочнения деталей. Более подробно рассмотрены свойства, недостатки и преимущества детонационно-газового напыления.

Рассмотрены основные принципы создания износостойких металлических покрытий. Делается вывод, что разработка новых композиционных порошков для напыления покрытий является достаточно сложным и трудоемким процессом. Более перспективным способом получения износостойких покрытий является модифицирование широко применяемых в промышленности порошковых композиций для детонационного напыления покрытий с целью расширения области их промышленного применения.

Проанализирована роль поверхностных явлений при фрикционном взаимодействии контактирующих поверхностей. Показано, что процессы, происходящие на поверхностях трения, характеризуются сложностью их протекания и зависят от структурного состава и свойств вторичных структур.

Физической основой разработки износостойких детонационных покрытий и оптимального подбора пар трения является обеспечение их совместимости и реализация структурной приспособляемости в заданном диапазоне нагружения. На основании выполненного обзора работ рассмотрены основные положения совместимости трущихся поверхностей, которые определяются физическими процессами на поверхностях трения. Показана необходимость учитывать совместимость материалов в триботехнических парах не только при трении со смазочными материалами, но и при их отсутствии.

На основании проведенного анализа определена цель и задачи исследований.

Во второй главе изложены средства и методы проведения экспериментальных исследований. Методической основой настоящей работы являлось комплексное изучение механо-химических процессов, предполагающее исследование структуры и фазового состава поверхностных слоев трущихся материалов с использованием современных методов материаловедческого анализа, исследование влияния технологических остаточных напряжений на процессы трения и изнашивания и исследование адгезионной прочности покрытия.

Напыление исследуемых детонационных покрытий осуществлялось на детонационно-газовой установке "Перун-С", разработанной в ИСМ НАН Украины.

Исследование триботехнических характеристик покрытий проводилось на универсальной машине трения УМТ-1 с использованием торцевой пары схемы "кольцо-кольцо" с коэффициентом взаимного перекрытия 0,5. В процессе эксперимента регистрировали износ образцов, температуру поверхности трения и момент трения. В качестве критерия оценки износа была принята величина интенсивности изнашивания единицы объема истраемого образца за 1000 м пути, отнесенная к площади трения.

Металлографические исследования процессов, происходящих на поверхностях трения проводили на оптическом микроскопе ММ-8.

Фрактографические исследования проводили с использованием метода растровой электронной микроскопии на микроскопе-микроанализаторе "CamScan -4DV" с применением системы

рентгеновского дисперсионного анализа - миникомпьютера "Link-860".

Изучение химических особенностей поверхности трущихся образцов, осуществляли следующими основными методами:

- качественного определения химического состава, позволяющая определять разницу в содержании отдельных элементов;
- методика количественного определения содержания химических элементов ZAF-4/FLS;
- методика полуколичественного распределения элементов по площади (программа "Digimap") и выдачи информации на принтер в виде химической карты;
- методика определения химического взаимодействия между легирующими элементами в покрытии (подпрограмма "M"), которая позволяет присваивать химическим элементам определенный цвет и его интенсивность, в результате чего возникают определенные соотношения интенсивности цветовых гамм, соответствующие взаимодействию и концентрации химическим элементам.

Рентгенофазовый анализ образцов осуществлялся на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2,0. Съемка проводилась в широком угловом диапазоне в монохроматизированном $\text{Cu K}\alpha$ -излучении. Исследование микрорельефа поверхности покрытий проводилось с помощью профилометра модели 296.

При определении механических свойств материалов с покрытиями были использованы методы испытаний на растяжение, определение прочности сцепления покрытия с основой и определение микротвердости поверхностных слоев покрытий.

Испытания на растяжение проводили на универсальной испытательной машине УТС-10. Обработка результатов осуществлялась автоматически на ЭЭМ с последующей выдачей данных на печатающее устройство в виде диаграммы растяжения. Прочность сцепления покрытия с металлической подложкой определяли штифтовым методом. Исследование микрообъемов поверхностных слоев покрытий проводили на микротвердомере ПМТ-3.

Характер изменения остаточных напряжений в покрытиях, их величину и распределение по глубине определяли по методу Н. Н. Давиденкова.

Результаты комплексного влияния внешних воздействий на износостойкость модифицированного покрытия проводилась веро-

ятностно-статистическими методами математической статистики.

В третьей главе изложены требования, предъявляемые к композиционным порошкам, используемым для детонационно-газового напыления покрытий. Отмечено, что одной из основных причин, препятствующих образованию высокой адгезионной и когезионной прочности детонационных покрытий, является наличие оксидных пленок, образующихся в структуре сформированного покрытия.

Сделан обзор работ, касающийся производства порошков для детонационно-газового напыления покрытий как в нашей стране, так и за рубежом. Отмечено, что в промышленно-развитых капиталистических странах разработке и применению защитных покрытий, наносимых детонационным методом, уделяется значительное внимание. Порошковые материалы производятся серийно десятками наименований.

Обоснован выбор композиционного порошка с целью последующего его модифицирования. В качестве объекта исследований был взят разработанный и апробированный технологией промышленный порошок марки ПС-12 системы Ni-Cr-WC-Si-Fe-B-Al как типичный представитель этого класса порошков.

Обоснован выбор модифицирующей добавки. Отмечено, что среди боратов, наилучшими свойствами, а именно высокая растворяющая способность по отношению к оксидам, обладает тетраборнокислый натрий.

Раскрыты физические аспекты формирования покрытия с участием модифицирующей добавки. Показано, что в результате взаимодействия тетраборнокислого натрия с частицами композиционного порошка происходят сложные электрохимические процессы взаимодействия борного ангидрида (продукта разложения тетраборнокислого натрия) с оксидной пленкой частиц порошка, удаление которой приводит к образованию активной междофазной границы "металл порошка - жидкий тетраборнокислый натрий" и замещение его другим металлом в результате взаимодействия с материалом подложки или слоем покрытия.

В соответствии с комплексной методикой исследовано влияние модифицирующей добавки на уровень и распределение технологических остаточных напряжений и адгезионную прочность исследуемого покрытия. Установлено, что с увеличением степе-

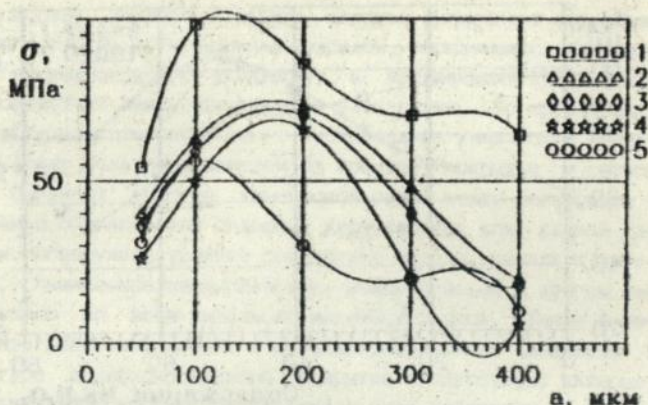


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений в исследуемом покрытии в зависимости от степени модифицирования тетраборнокислым натрием: 1- 0%, 2- 30%, 3- 50%, 4- 50% 5/5, 5- 70%

ни модифицирования технологические остаточные напряжения растяжения, возникающие при формировании покрытия, уменьшаются в 1,5-2,0 раза как по толщине покрытия, так и на границе "покрытие-основа" (рис. 1) при одновременном росте адгезионной прочности покрытия за счет формирования сил химической связи железа с никелем. Максимальной адгезионной прочностью обладает покрытие, модифицированное 48-50% тетраборнокислым натрием (рис. 2), при котором формируется на границе "покрытие-основа" сплошная диффузионная зона толщиной 1,5-2,0 мкм.

Установлен факт увеличения пластичности покрытия при одновременном снижении микротвердости поверхностных слоев в зависимости от процентного содержания модифицирующей добавки в исходном порошке. Незначительное снижение микротвердости характерно для покрытия, модифицированного до 55% тетраборнокислым натрием (рис. 2). Дальнейшее модифицирование приводит к резкому падению микротвердости поверхностных слоев за

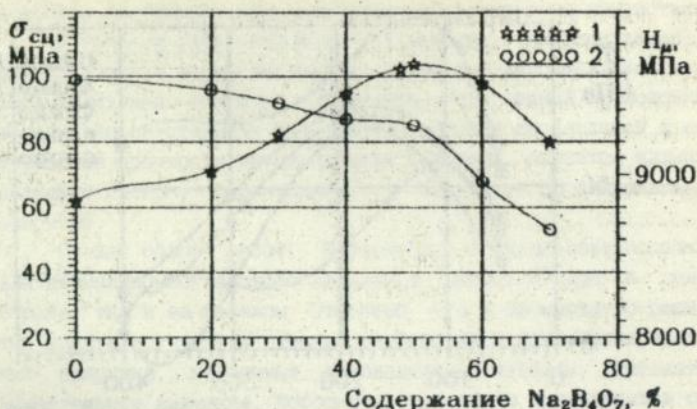


Рис. 2. Зависимости прочности сцепления (1) и микротвердости поверхностных слоев (2) исследуемого покрытия от степени модифицирования $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$

счет снижения внутренних технологических остаточных напряжений растяжений, формируемых при напылении покрытий.

В результате механических испытаний установлено, что максимальная нагрузка разрушения при испытании на растяжение соответствует детонационному покрытию, модифицированному 48-50% тетраборнокислым натрием, что еще раз косвенно подтверждает высокую когезионную и адгезионную прочность покрытия, модифицированного около 50% тетраборнокислым натрием.

Произведена сравнительная оценка адгезионной прочности и микротвердости поверхностных слоев модифицированного покрытия с детонационными покрытиями, широко применяемыми в практике детонационно-газового напыления. Установлено, что модифицированное покрытие превосходит по прочности сцепления детонационные покрытия в 1,5-2,5 раза, однако несколько уступает по микротвердости покрытию ВК-15.

Исследование структуры в исходном состоянии (до испытания на трение) показало, что при модифицировании исследуемо-

го покрытия тетраборнокислым натрием происходит повышение его качества за счет удаления оксидов, образующихся в структуре сформированного покрытия, и активизации химического взаимодействия между легирующими элементами. По сравнению с немодифицированным покрытием, установлена химическая активность между железом и никелем на границе "покрытие - основа". Возникли участки химической связи между вольфрамом и никелем с образованием сплошных диффузионных зон длиной до 10 мкм. Обнаружено тройное соединение железа, никеля и вольфрама. Химическое взаимодействие между железом и хромом не обнаружено во всем диапазоне модифицирования. Также в результате рентгенофазового и металлографического анализов в структуре модифицированного покрытия присутствуют интерметаллидные фазы двойных соединений в виде диборидов и алюминидов никеля, соединений никеля и кремния.

По результатам трибологических исследований установлено рациональное содержание модифицирующей добавки в исследуемом покрытии, удовлетворяющее основным требованиям износостойкости и антифрикционности. Минимальной интенсивностью изнашивания и коэффициентом трения обладает покрытие, модифицированное в пределах 48-53% тетраборнокислым натрием. На основе анализа структуры поверхностного слоя покрытия, литературных источников и по нашим представлениям основной причиной различия триботехнических характеристик исходного и модифицированного покрытий являются разные возможности возникновения точечных дефектов при пластической деформации мелкодисперсных упрочняющих фаз на поверхностях трения со структурами ГПУ и ГЦК решеток.

Даны рекомендации и основные направления научных исследований, направленных на дальнейшее развитие способа модифицирования порошковых композиций и применения его для других методов нанесения покрытий, использующих для напыления высокотемпературный источник энергии.

В четвертой главе представлены результаты исследований модифицированного покрытия в условиях трения без смазочного материала и в присутствии смазочной среды в зависимости от

влияния внешних факторов (скорости скольжения и нагрузки).

Исследование влияния удельной нагрузки на интенсивность изнашивания и коэффициент трения при работе исследуемого покрытия без смазочного материала проводилась при скорости скольжения 0,1 м/с, а влияние скорости скольжения (диапазон 0,1-1,0 м/с) - при постоянной нагрузке 1,0 МПа.

При исследовании детонационного покрытия при работе без смазочного материала во всем нагрузочно-скоростном диапазоне наблюдался ведущий механо-химический износ, за исключением малых скоростей скольжения. Это приводило к возникновению на отдельных участках поверхности трения процессов схватывания, обуславливающих высокие значения интенсивности изнашивания и коэффициента трения. По мере увеличения скорости скольжения происходило подавление процессов схватывания за счет достижения устойчивого динамического равновесия процессов трибоактивации и пассивирования.

По данным рентгеноструктурного анализа защитные пленки, образовавшиеся на поверхностях образцов представляют собой трудноактивируемый комплекс структур в виде соединений типа шпинелей на основе оксидов Ni, Cr, W, Al, Si и борного ангидрида.

По данным рентгеноспектрального анализа установлено, что участки с разрушенными вторичными структурами на поверхностях трения содержат кислорода в 3-4 раза больше, чем участки с не разрушенными. Наличие кислорода в большем количестве в разрушенных участках обусловлено пересыщением защитных пленок вторичных структур пассивирующей средой (кислородом), их охрупчиванием, разупрочнением и последующим разрушением.

Поверхность трения модифицированного покрытия представляет собой мелкодисперсную структуру, которая согласно химическому и рентгенофазовому анализам, а также на основании анализа диаграмм двойных систем металлов, представляет собой мелкодисперсные β -фазы Ni_4W , Ni_2Al_3 , CrB_2 , Ni_3Cr , Ni_2Si , $\beta-Ni_2Si$. Главным фактором, обуславливающим данную структуру

является аддитивное действие высоких давлений и сдвигающих напряжений в зоне контакта. Мелкодисперсность регулируется динамическим равновесием процессов трибоактивации и пассивирования. Обратному процессу роста мелкодисперсных частиц препятствует постоянное действие нагрузки и возникающие в результате диффузии элементов среды - барьеров (новой фазы), равномерно распределенных по всему активному объему поверхностных слоев. В итоге новая структура характеризуется комплексом новых свойств, которые и определяют высокие антифрикционные характеристики модифицированного покрытия.

В качестве сравнения с модифицированным покрытием были использованы детонационные покрытия на основе железа и покрытие ВК-15. В результате исследований установлено, что триботехнические характеристики модифицированного покрытия несколько уступают таковым для покрытий ВК-15 и намного превосходят триботехнические характеристики детонационного покрытия на основе железа.

Для определения влияния смазочной среды на процессы трения и изнашивания были использованы минеральное МС-20 и индустриальное И-50А масла. Скорость скольжения при испытаниях изменялась в диапазоне 0,5-1,2 м/с, нагрузка - от 3,0 МПа до Ркр.

Установлено, что более низкие значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания модифицированного покрытия соответствуют трению в среде минерального масла, обладающего хорошей адсорбцией к поверхности трения за счет высокой кинематической вязкости, по сравнению с трением покрытия в среде индустриального масла.

Как было установлено, высокая работоспособность покрытия в смазочной среде объясняется не только мелкодисперсностью структуры, поддерживаемой динамическим равновесием процессов трибоактивации и пассивации, но и наличием серы на поверхностях трения, выявленных в результате рентгеноспектрального анализа. Сера является своего рода химическим модификатором вторичных структур, приводящая к энергетически вы-

годным химическим реакциям на поверхностях трения в потоке рассеиваемой энергии и, в конечном итоге, способствует повышению защитных свойств структуры покрытия в исследуемом нагрузочно-скоростном диапазоне.

В пятой главе представлены результаты исследований совместимости и приспособляемости модифицированного покрытия в парах с бронзой ВрО14 и сталями 45, ШХ-15, ЗОХГСНА как при трении без смазочного материала, так и в присутствии смазочной среды. Нагрузочно-скоростной диапазон выбирался таким же, как и при трении одноименных пар трения модифицированного покрытия. В качестве смазочной среды использовалось индустриальное масло И-50А.

Исследование закономерностей в этих условиях решило ряд практических вопросов, ставящих своей целью повышение износостойкости покрытий и наиболее рациональное их сочетание в парах трения.

Трибологические исследования покрытия при отсутствии смазочного материала в паре с бронзой показало их высокую работоспособность в исследуемом нагрузочно-скоростном диапазоне. Установлено в результате микрорентгеноспектрального анализа, что контакт пары трения осуществлялся через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой меди, обуславливающий снижение контактных напряжений, низкий коэффициент трения и износ.

Установлено, что поверхность трения контртела из бронзы обогащена медью, в слое которой образуются поры с размерами от 1,0-6,0 мкм. Перенос меди на поверхность модифицированного покрытия при трении происходит за счет процессов схватывания, локализующихся в тонких поверхностных слоях без видимых участков повреждений, что подтверждает низкий и стабильный коэффициент трения.

По данным количественного микрорентгеноспектрального анализа (методика ZAF-4/FLS) установлено, что как при увеличении скорости скольжения, так и при увеличении нагрузки, площадь, занимаемая слоем меди на поверхности трения покри-

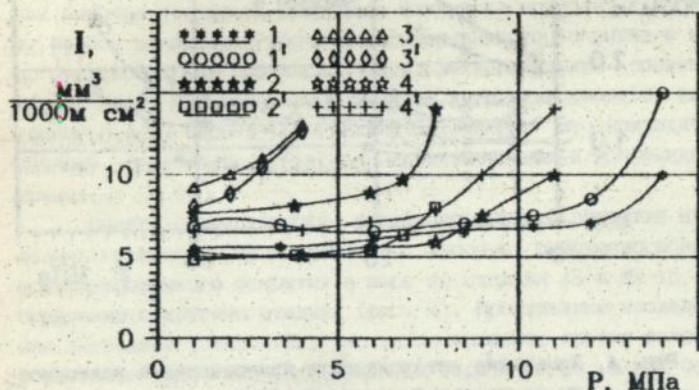


Рис. 3. Изменение интенсивности изнашивания в зависимости от удельной нагрузки, $V=0,1$ м/с: 1-1' - модиф. покрытие - сталь 30ХГСА, 2-2' - модиф. покрытие - ШХ-15, 3-3' - модиф. покрытие - сталь 45, 4-4' - покрытие ВК-15 - сталь 45

тия, увеличивается. Так, при удельной нагрузке 5 МПа количество меди на поверхности трения составило 23-24%, а при 20 МПа - 36-37% от общего процентного содержания элементов на поверхности покрытия.

В качестве сравнения с модифицированным покрытием были испытаны на износостойкость в паре с бронзой покрытие ВК-15, сталь 30ХГСА и азотированная сталь 30ХМФА. Установлено, что лучшей совместимостью и структурной приспособляемостью обладает модифицированное покрытие. Покрытие ВК-15 по износостойкости не уступает модифицированному покрытию, однако диапазон нормального изнашивания по нагрузке уже, а также тре-

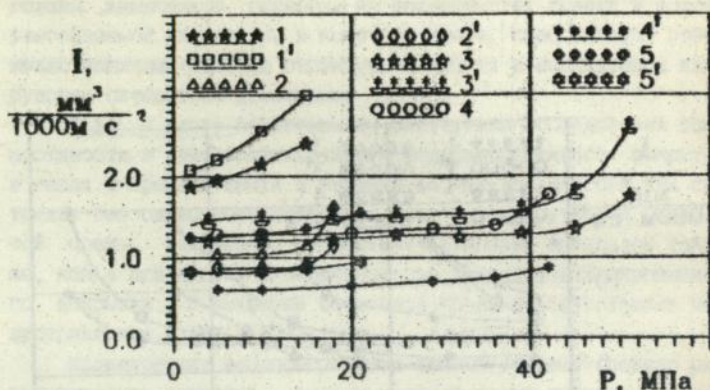


Рис. 4. Изменение интенсивности изнашивания в зависимости от удельной нагрузки, $V=0,8$ м/с, смазочная среда И-50А: 1-1' - модиф. покрытие - бронза БрО14, 2-2' - модиф. покрытие - сталь 30ХГСНА, 3-3' - модиф. покрытие - сталь 45, 4-4' - модиф. покрытие - ШХ-15, 5-5' - модиф. покрытие - сталь ХВГ борированная

ние данной пары вызывает высокий износ материала контртела. Сталь 30ХГСНА и азотированная сталь 30ХМ0А в паре с бронзой обладают худшей совместимостью, так как вызывают усиленный износ бронзы и обладают высокими значениями коэффициента трения и интенсивности изнашивания.

Наилучшей совместимостью и приспособляемостью обладает модифицированное покрытие в паре с закаленной сталью 45, по сравнению с другими сталями, характеризующейся устойчивостью процесса структурной приспособляемости материалов

при трении, в результате чего реализуется низкий и стабильный коэффициент трения и низкий износ (рис. 3). Пара трения "модифицированное покрытие - ШХ-15" характеризуется более узким диапазоном нормального изнашивания по нагрузке, так как высокая твердость материала контртела приводит к высокому износу покрытия. Работа модифицированного покрытия в паре со сталью 30ХГСНА показала неудовлетворительную совместимость, так как при незначительных нагрузках теряется работоспособность пары и наступает схватывание, что приводит к резкому увеличению интенсивности изнашивания и коэффициента трения.

Оценка совместимости модифицированного покрытия в условиях граничной смазки показала высокую работоспособность модифицированного покрытия в паре со сталями 45 и ШХ-15, по сравнению с другими сталями (рис. 4). Проведенные исследования позволили установить, что на поверхности трения покрытия образуются трибохимические участки серы, хлора, а при более высоких нагрузках - фосфора. Это связано с тем, что в условиях граничной смазки на поверхностях трения при больших удельных нагрузках происходит окисление углеводородных смазочных сред. Эти реакции приводят к регенерации окисных пленок на тех участках поверхности трения, где эти пленки разрушены, а образующиеся продукты окисления смазочных сред являются своего рода присадками, уменьшающие изнашивание.

Совместимость модифицированного покрытия в парах со сталями 30ХГСНА и ХВГ борированная несколько хуже. При сравнительно небольших нагрузках происходит задиры сопрягаемых материалов (для пары "модифицированное покрытие - сталь 30ХГСНА") и следы выкрашивания на твердом боридном покрытии (для пары "модифицированное покрытие - сталь ХВГ борированная"), что существенно снижает нагрузочно-скоростной диапазон нормального изнашивания пар трения.

Показано, что более информативным фактором при оценке совместимости пар трения является изменение нагрузки по сравнению со скоростью скольжения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Обоснован выбор тетраборнокислого натрия в качестве модифицирующей добавки, а также композиционного порошка. Раскрыты физические аспекты формирования исследуемого покрытия с участием модифицирующей добавки.

2. Установлено рациональное содержание модифицирующей добавки в исследуемом покрытии по результатам трибологических исследований.

3. Исследовано влияние модифицирующей добавки на физико-механические свойства детонационного покрытия. Установлено, что введение тетраборнокислого натрия значительно уменьшает опасные технологические остаточные напряжения растяжения, увеличивает прочность сцепления покрытия с основой, снижает микротрещины, дость поверхностных слоев.

4. Исследован механизм процесса трения модифицированного покрытия без смазочного материала. Показано, что на интенсивность изнашивания оказывает влияние структура, определяемая природой введенных легирующих элементов с участием модифицирующей добавки и химический состав поверхностных слоев.

5. Исследованы закономерности процессов изнашивания модифицированного покрытия в смазочных средах. Установлено, что минимальной интенсивностью изнашивания и коэффициентом трения обладает покрытие при трении в среде минерального масла, обладающего хорошей адсорбцией к поверхности трения за счет высокой кинематической вязкости.

6. Установлено, что лучшей совместимостью с модифицированным покрытием в условиях трения без смазочного материала обладает бронза и закаленная сталь 45. Сочетание исследуемого покрытия в паре с конструкционной сталью 30ХГСНА показало их неудовлетворительную совместимость, так как при незначительных нагрузках теряется работоспособность пары и наступает схватывание.

7. В среде индустриального масла результаты исследований

показали неудовлетворительную работоспособность покрытия в паре с бронзой. Максимальной износостойкостью модифицированное покрытие обладает в паре со сталями 45 и ШХ-15.

В. По результатам проведенных исследований были разработаны практические рекомендации и определены основные направления в области модифицирования композиционных порошков для детонационного напыления покрытий. Внедрение модифицированного детонационного покрытия позволило уменьшить расход дефицитных материалов и увеличить работоспособность деталей нефтеперерабатывающего оборудования в 1,8-2,3 раза.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Щелетов В.В., Лабунец В.Ф., Марчук В.Е. Композиционные боросодержащие детонационные покрытия. Тезисы: Материалы IV Всесоюзной научно-техн. конф. "Композиционные покрытия". Житомир, 1991, с.16.

2. Марчук В.Е., Мещеряков Ю.М. Повышение надежности деталей авиационной техники за счет применения защитных покрытий, содержащих дисульфид молибдена. // Летательные аппараты и авиационные двигатели. Научно-техн. сборник.- Киев: КИ ВВС. Вып.13, 1992, с.51-56.

3. Мещеряков Ю.М., Носовский О.И., Марчук В.Е. Методика проведения трибологических испытаний. // Летательные аппараты и авиационные двигатели. Научно-техн. сборник.- Киев. Вып.13, 1992, с.62-64.

4. Марчук В.Е., Кисель В.С., Крамар В.Г. Износостойкие покрытия для упрочнения и восстановления деталей авиационной техники. // Летательные аппараты и авиационные двигатели.- Киев: КИ ВВС. Вып.14, 1993, с.34-36.

Б. Марчук В.Е., Кисель В.С., Крамар В.Г. Износостойкие детонационные покрытия на основе никеля. // Летательные аппараты и авиационные двигатели.- Киев: КИ ВВС. Вып.14, 1993, с.36-38.

6. Марчук В.Е., Кисель В.С. Технология изготовления композиционных порошков для нанесения защитных покрытий. // Летательные аппараты и авиационные двигатели. - Киев: КИ ВВС. Вып.14, 1993, с.30-33.

7. Ермолаев В.В., Марчук В.Е. Влияние толщины покрытий на долговечность конструктивных элементов авиационных двигателей. // Сб. статей XXXII военно-науч. конф. Часть I. - Киев: КИ ВВС, 1993. - с.39-40.

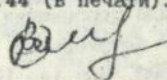
8. Ермолаев В.В., Марчук В.Е. Износостойкие детонационные покрытия для повышения эксплуатационной надежности деталей авиационных двигателей. // Сб. статей XXXIII военно-науч. конф. Часть I. - Киев: КИ ВВС, 1993. - с.41-42.

9. Марчук В.Е., Ващенко А.Н., Градский Ю.А. Повышение эксплуатационных свойств детонационных покрытий за счет модифицирования исходных порошковых композиций. // Летательные аппараты и авиационные двигатели. - Киев: КИ ВВС. Вып.16, 1994, с.102-103.

10. Марчук В.Е., Ващенко А.Н., Градский Ю.А. Трибологическая совместимость модифицированного детонационного покрытия на основе никеля с конструктивными и антифрикционными материалами. // Летательные аппараты и авиационные двигатели. - Киев: КИ ВВС. Вып.16, 1994, с.104-105.

11. Носовский И.Г., Щепетов В.В., Марчук В.Е. Детонационные покрытия для защиты уалов трения от износа // Наука и оборона. - К., 1994. - Вып.2. С.21-31.

12. Лабунец В.Ф., Щепетов В.В., Марчук В.Е. Влияние остаточных напряжений на износостойкость детонационных покрытий // Проблемы трения и изнашивания. - Вып.44 (в печати).



Марчук В.Е. Повышение трибостойкости детонационных покрытий модифицированием напыляемых порошковых композиций.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04. - Трение и износ в машинах, Киевский Международный университет гражданской авиации, Киев, 1994.

Защищено 12 научных работ, которые содержат результаты экспериментальных исследований. Установлено, что модифицирование детонационного покрытия ПС-12 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ снижает технологические опасные остаточные напряжения растяжения, увеличивает адгезионную прочность покрытия. Раскрыт механизм изнашивания модифицированного покрытия в условиях трения без смазочного материала и в присутствии смазочных сред, а также совместимость с конструкционными и антифрикционными материалами. Осуществлено промышленное внедрение модифицированного покрытия, приводятся данные о его эффективности.

Marchuk V.E. Rize of detonational plating triboresistivity by modification of powdery compositions being plated.

The thesis for candidate's degree of technical sciences on the speciality 05.02.04.- Friction and wear and tear in machines. Kiev International University of Civil Aviation, Kiev, 1994.

12 scientific works that contain the results of experimental investigations are supported. It is established that modification of detonational plating PS-12 with $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ reduces dangerous residual technological voltages of tension, increase adhesion plating strength. The mechanism of wear and tear of modificational plating in case of friction without lubricants and with them and also the compatibility with constructional and antifrictional materials was found. Industrial introduction of modificational plating was carried out, the data of its effectiveness are given.

Ключевые слова: модифицированное детонационное покрытие, тетраборнокислый натрий, интенсивность изнашивания, совместимость покрытия, износостойкость.

Подписано в печать 02.II.94. Формат 60x84/16. Бумага типограф.
Офсетная печать. Усл.кр.-отт.7. Усл.печ.л. I,39. Уч.-изд.л. I,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 190-I. Цена . Изд. № 231/Ш.

Издательство КМУГА.

252058. Киев-58, проспект Космонавта Комарова, I.

455120

AB 31.259

AB 31.259