

## РАЗРАБОТКА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАР ТРЕНИЯ В ПРЕЦИЗИОННЫХ УЗЛАХ АГРЕГАТОСТРОЕНИЯ

**А.В. Сагалович, В.А. Бабенко, С.Ф. Дудник\*, В.В. Сагалович\*\*,  
А.В. Кононыхин\*\*\*, В.В. Попов\*\*, А.П. Любченко\*\*\*\*, А.К. Олейник\*\*\*\***

*Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины (Харьков), Украина*

*\*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина*

*\*\*НТЦ “Нанотехнология” (Харьков), Украина*

*\*\*\*ОАО “ФЭД” Харьков, Украина*

*\*\*\*\*ГП “Завод им. Малышева” (Харьков), Украина*

Поступила в редакцию 24.09.2007

Проведены исследования по нанесению многокомпонентных многослойных и нанослойных упрочняющих покрытий на основе титана, молибдена и их соединений с азотом методами вакуум-плазменного осаждения с применением эффективных технологических устройств формирования плазменного потока вакуум дугового источника с резко уменьшенной долей “капельной” составляющей для получения покрытий с высоким качеством поверхности. Разработаны низкотемпературные процессы нанесения покрытий, обладающих хорошей адгезией к основе при температурах, не превышающих 200 °С и не приводящие к снижению твердости основы. Проведены трибологические исследования образцов с покрытиями при работе в парах с бронзами разного состава в среде топлива ТС-1, а также сравнительные испытания работы таких бронз в паре с непокрытыми образцами из закаленной стали Х12Ф1 с целью выбора материалов покрытий для пар трения прецизионных узлов агрегатостроения.

### ВВЕДЕНИЕ

С увеличением требований к повышению долговечности и надежности различных деталей и механизмов, работающих в условиях трения, резко возрастают требования к свойствам материалов, работающих в условиях фрикционного контакта, и их триботехническим характеристикам. Наиболее остро вопрос выбора материала с необходимыми свойствами стоит в тех областях, которые являются определяющими для развитых стран, в частности, это касается самолетостроения и связанного с ним агрегатостроения, где во многих случаях традиционные материалы и технологии их получения исчерпали возможности улучшения своих свойств.

Удовлетворить требованиям, часто противоречивым, к свойствам поверхности (высокая твердость и износостойкость, высокие антифрикционные характеристики) и объемным свойствам (высокая прочность и ударная вязкость) можно путем создания композиций с послойным размещением материалов, которые выполняют разные функции.

Высокая точность изготовления деталей прецизионных узлов агрегатостроения, часто

попарная приработка поверхностей трения для обеспечения допусков в зазорах на уровне нескольких микрометров и, соответственно, высокий класс чистоты обработки поверхностей (до значений  $R_a \leq 0,04$ ), при решении задачи повышения ресурса работы пар трения, увеличения допустимых удельных нагрузок на контактирующие поверхности и скоростей скольжения, требуют проведения комплекса научных и технологических исследований.

В большинстве случаев не допускается нанесение покрытий при температурах, которые могут привести к снижению твердости основы, термообработанной на высокую твердость (~55 ÷ 65 HRC<sub>3</sub>). Не допускаются поводки и коробления покрываемых деталей. Температура отпуска используемых сталей может составлять 200 – 250 °С. Поэтому требуется разработка низкотемпературных процессов нанесения покрытий, обладающих хорошей адгезией к основе при температурах, по крайней мере, не превышающих 200 – 250 °С. Кроме того, наносимые покрытия должны обеспечивать существенное повышение ресурса работы пары трения при толщи-

нах, не приводящих к выходу за рамки допусков по размерам деталей, которые могут составлять всего несколько микрометров, и не ухудшать класс чистоты обработки покрываемых поверхностей, определяемой требованиями конструкторской документации, поскольку последующая доработка поверхности деталей после изготовления в большинстве случаев практически невозможна.

Перечисленные выше требования к покрытиям накладывают и соответствующие требования на выбор метода нанесения покрытия и оборудование для его реализации.

Среди методов нанесения покрытий особое место занимают методы формирования покрытий из ионизированных атомарных и молекулярных потоков. Возможность изменять энергию ионизированных частиц потока конденсируемого вещества в широких пределах (от единиц до сотен тысяч эВ) позволяет эффективно влиять на большинство важных в практическом отношении характеристик покрытий (плотность, адгезию, структуру и прочие) и благодаря этому достигать высоких значений соответствующих показателей. Другая важная особенность, которая выделяет ионно-плазменные методы, – возможность создавать многокомпонентные композиционные материалы в неравновесных условиях их формирования. Появляется возможность получать сверхтвердые соединения (карбиды, нитриды, оксиды и их соединения) путем плазмохимического синтеза при значительно более низких температурах, формировать аморфизованные структуры или метастабильные фазы, химические соединения, которые другими методами воссоздать невозможно [1 – 3]. С использованием именно этих методов связано и бурно развивающееся в настоящее время направление получения нанокompозитных материалов и покрытий и соответствующих нанотехнологий их формирования, позволяющих создавать совершенно новые материалы с более высокими, подчас уникальными, свойствами по сравнению с существующими материалами [4, 5].

К числу упомянутых выше методов относится вакуум-дуговой метод, который получил широкое практическое использования во всем мире при нанесении покрытий в инструментальном производстве, машиностроении и других отрас-

лях производства. При всех его достоинствах, наличие “капельной” составляющей в плазменном потоке при использовании обычных вакуум-дуговых испарителей не позволяет получать покрытия с высоким качеством поверхности. Поэтому, в данном случае при использовании вакуум-дугового метода для обеспечения необходимого качества поверхности покрытия требуется применение сепарирующих устройств, убирающих капельную составляющую из плазменного потока [6, 7].

При переходе к получению многокомпонентных, нанослойных покрытий, как наиболее перспективных для достижения необходимых трибологических характеристик контактирующих материалов в узлах трения [8 – 10], требуется оборудование, которое обеспечивало бы контролируемое и воспроизводимое по составу и структуре покрытие с размерами структурных элементов вплоть до нескольких единиц нанометров. Естественно, для этого требуется оборудование, оснащенное, как минимум, автоматизированной системой контроля и управления всеми технологическими параметрами процесса нанесения таких покрытий.

В работе [11] были проведены исследования характеристик трения группы покрытий, получаемых вакуум-дуговым методом, применительно к задаче получения износостойких антизадиристых покрытий на сплаве АК4-1 для деталей цилиндропоршневой группы двигателей. Было показано, что нанокompозитные вакуум-дуговые покрытия соответствующих составов на алюминиевом сплаве имеют низкие значения коэффициентов трения и позволяют предотвратить задиры при работе в паре с гильзовым чугуном в условиях трения скольжения при граничных условиях смазки, соответствующих условиям работы деталей цилиндропоршневой группы двигателей. При этом относительное увеличение стойкости достигает 20 – 80 раз, а износ контртела уменьшается в 4 – 5 раз.

Исследования в настоящей работе являются дальнейшим развитием подходов и технологических приемов, использовав-

шихся в работе [11] при выборе материалов покрытий и отработке процессов их нанесения.

Данная работа посвящена исследованиям, направленным на разработку процессов нанесения многокомпонентных нанослойных упрочняющих покрытий и изучение поведения таких покрытий в парах трения для прецизионных узлов агрегатостроения.

## ПОЛУЧЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

Исследования процесса получения покрытий проводили на модернизированной установке для вакуум-дугового напыления с вакуумной камерой диаметром 800 мм и высотой 780 мм, как в работе [11] с доработками, которые потребовались при решении поставленной задачи в данном случае. Была доработана система автоматизированного управления и регистрации параметров процесса нанесения покрытий [12], что позволило не только управлять в автоматическом режиме процессом нанесения покрытия, но и вести оперативный контроль всех значимых технологических параметров процесса, регистрировать их отклонение от заданных технологических режимов и выводить эту информацию на дисплей в виде, удобном для оператора.

Нанесение покрытий на поверхности с чистотой обработки до 13 класса шероховатости потребовало решения задачи очистки плазменного потока от “капельной составляющей”. Наиболее полно проблема очистки потоков эрозионной плазмы от микрочастиц катодного материала решается с помощью сепарирующих устройств, основанных на разделении траекторий ионных и капельных потоков в криволинейных транспортирующих плазموдах со скрещенными электрическим и магнитным полями. Такие устройства, однако, громоздки, сложны в изготовлении, имеют сравнительно невысокую производительность. Применительно к решаемой задаче нами усовершенствован прямолинейный сепаратор [7], содержащий заслонку и систему колец-ловушек из тугоплавкого материала, обеспечивающих надежную защиту анода от проплавления пятном дуги. Как показали экспериментальные результаты, использование такого прямолинейного сепаратора

обеспечивает формирование плазменных потоков, очищенных от микрочастиц катодного материала, который позволяет осаждать покрытия на поверхности  $V$  11 – 13 класса практически без изменения класса чистоты поверхности.

Нанесение многокомпонентных или композитных покрытий осуществляли по заданной программе с применением однокомпонентных катодов при одновременной работе нескольких источников напыления. Образцы размещались в технологической оснастке планетарного типа, обеспечивающей вращение изделий одновременно вокруг своей оси и центра камеры.

В качестве плазмообразующих материалов (катодов) использованы Ti, Mo, Al. Реакционным газом служил азот. Основной примесью в азоте был кислород, уровень которого не превышал 0,04 ат.%. Состав остаточных газов и примесей в реакционном газе контролировался с помощью масс-спектрометра MX-7304A. Температура подложки контролировалась с применением инфракрасного пирометра производства “Raytek” и в ходе экспериментов не превышала 200 – 250 °С. Время напыления в большинстве случаев составляло от одного до нескольких часов. Контроль всех основных параметров процесса нанесения покрытий осуществлялся в автоматическом режиме.

Толщину покрытий определяли с помощью профилометра – профилографа по величине ступеньки, получаемой на ростовой поверхности образца после снятия плотно прилегающей маски, которая прикрывала часть поверхности образца при нанесении покрытия. По профилограмме, снятой на границе перехода от поверхности подложки к поверхности покрытия, определялась не только толщина покрытия (и по ней скорость роста), но также и шероховатость образцов до и после нанесения покрытий. Такая методика позволяла избежать не точностей при сравнении значений шероховатости подложки и покрытия из-за несовпадения места ее определения. Микротвердость поверхностей образцов с покрытиями определялась при помощи микротвердомера. ПМТ-3 при нагрузке 100 Г.

Твердость материала измеряли на твердомере путем вдавливания алмазного наконечника по методу Роквелла. Адгезия покрытий качественно оценивалась по результатам металлографических исследований областей покрытия вокруг отпечатка от алмазного конуса после измерения твердости по методу Роквелла, а также по состоянию покрытия после трибологических испытаний. Металлографические исследования проводили на микроскопе ММР-4.

Исследования антифрикционных, износных свойств и схватывания проводили на машине трения 2070 СМТ-1 по схеме “плоскость-ролик” при ступенчатом нагружении (увеличение нагрузки на 0,2 кН на каждую последующую ступень) в интервале нагрузок 1–2 кН и линейной скорости скольжения – 1,3 м/сек. Время испытаний на каждой ступени нагружения – 120 с. Смазка трущихся поверхностей осуществлялась окунанием ролика в рабочую среду – топливо ТС-1 ГОСТ10227-86 с температурой –  $70 \pm 5$  °С. В процессе трибологических испытаний регистрировались значения силы трения  $F_{тр}$ , нормальная нагрузка  $N$ , температура топлива ТС-1. Нагружение производилось до предельных значений, при которых происходило резкое увеличение силы трения  $F_{тр}$ , что является признаком начала процессов схватывания поверхностных слоев материалов пар трения. По величине этой нагрузки определяли критическое значения  $P_{кр}$ , при котором происходит схватывание. Коэффициенты трения определялись как  $f = F_{тр}/N$ . Величина износа определялась по глубине выработки образца в месте контакта с роликом после проведения испытаний и по изменению диаметра ролика.

Основные образцы для трибологических испытаний представляли собой кубики размерами 10×10×10 мм, с чистотой обработки поверхности, соответствовавшей 11 – 12 классу. Ролики (контртела) выполнены в виде колец  $D_{н} = 50$  мм,  $D_{вн} = 16$  мм,  $H = 12$  мм из различных бронз, наиболее часто используемых для изготовления пар трения в агрегатостроении. Рабочие поверхности контртел окончательно обрабатывали шлифованием, шероховатость соответствовала  $R_a = 0,16$  мкм.

Для отработки процессов нанесения покрытий были изготовлены образцы из стали Х12МФ в виде дисков диаметром 30 мм и толщиной 2 мм или кубиков размерами 10×10×10 мм, термообработанных на твердость 59 – 60 HRC<sub>3</sub>. После термообработки образцы дополнительно шлифовались и полировались до получения поверхности с шероховатостью  $R_a = 0,04 – 0,02$  мкм (V12 класс). Покрытия наносились как на неподвижные подложки, которые размещались на расстоянии 150 мм от торцевой части сепаратора, так и на совершавшие планетарное движение вокруг центра вакуумной камеры. Были получены покрытия из чистых металлов титана, молибдена, их соединений в виде нитридов, а также многокомпонентные покрытия на основе соединений титана и алюминия с азотом при одновременной работе двух источников напыления с мишенями из титана и алюминия. Величина тока вакуумно-дугового разряда с молибденовым катодом составляла 140 – 150 А, соответственно с титановым или алюминиевым катодом 100 – 110 А. При напылении покрытий в среде азота его давление было в пределах  $(1,3 – 3) \cdot 10^{-1}$  Па. Ионно-плазменная обработка поверхности образцов, предшествовавшая нанесению покрытий, велась в импульсном режиме для предотвращения нагрева образцов выше 200 – 250 °С.

Предварительно были проведены эксперименты по определению скорости роста различных покрытий, полученных как на неподвижных подложках, так и на подложках, осуществляющих планетарное движение. Полученные данные о скорости роста покрытий в дальнейшем были использованы при составлении программ управления установкой для нанесения различных вариантов нанослойных покрытий.

Сравнение шероховатости подложки и покрытия по профилограммам показало, что покрытие имеет незначительное увеличение шероховатости, которое практически не выходит за пределы одного класса в соответствии с классификацией по классам шероховатости покрытия на основе титана имеют несколько большую шероховатость, по сравнению с покрытиями на основе молибдена, обусловленную большей каплевой составляющей и

большими размерами капель по сравнению с плазмой, генерируемой дугой с молибденовым катодом. Металлографические исследования образцов после нанесения покрытий разного состава показывают, что отработанные режимы обеспечили формирование качественных покрытий. Покрытия имели хорошее сцепление с материалом подложки. Случаев отслоения покрытий при нанесении сетки царапин, а также при измерении твердости по методу Роквелла не наблюдалось. Твердость и микротвердость материала основы в выбранных режимах нанесения покрытия не снижаются по сравнению с исходным состоянием.

В табл. 1 приведены характеристики по шероховатости и микротвердости исходных образцов и образцов после нанесения покрытий.

Приведенные значения микротвердости поверхности образцов с покрытием отражают суммарный эффект повышения микротвердости поверхности за счет более твердого покрытия, а не истинные значения микротвердости покрытий, которые составляют  $>2000 \text{ кг/мм}^2$  [11]. Для определения микротвердости тонких покрытий ( $<4 \text{ мкм}$ ) необходимо применение наноиндентеров. Измерения микротвердости одного из серии образцов с покрытием (Ti-Al-N) толщиной  $1,4 \text{ мкм}$  в Institute for terotechnology (г. Радом, Польша) с помощью нанотвердомера фирмы CSM (Швейцария) при нагрузке  $0,6 \text{ Г}$  с использованием модели Оливера-Фара дали значение  $2187 \text{ кг/мм}^2$ .

По отработанным режимам были нанесены покрытия на образцы для проведения трибологических испытаний.

## ПРОВЕДЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Абсолютные значения коэффициентов трения, предельных нагрузок до начала задира в парах трения, скорости износа трущихся поверхностей зависят как от режимов и условий испытаний, так и применяемой схемы испытаний. Нами выбрана схема испытаний “плоскость-ролик”, которая позволяет проводить испытания до достаточно высоких удельных нагрузок и значений PV в условиях граничного трения, что характерно для требований к условиям работы большинства наиболее нагруженных узлов трения различных агрегатов. Учитывая специфику подобных испытаний, весьма трудно проводить корректно сравнение результатов, полученных другими авторами и давать сравнительную оценку эффективности того или иного покрытия. Поэтому нами проведена серия “нулевых” испытаний трущихся пар из традиционных материалов, которые используются в реальных конструкциях агрегатов, или рассматриваются как возможные для применения в агрегатостроении. Образцы были изготовлены из стали X12Ф1, термообработанной на твердость  $59 - 60 \text{ HRC}$ . Контртела были выполнены из бронзы Бр. О10 С2НЗ, бронзы Бр. Су3НЗЦС20Ф0,2 (ВБ23НЦ), бронзы Бр. Су6Ф0,9 (ВБ24). Поверхности части роликов была модифицирована по технологиям, используемых в производстве на предприятии ФЭД.

Результаты “нулевых” испытаний показали, что испытываемые пары трения имеют достаточно большое различие по коэффициентам трения, величинам износа и критическим нагрузкам задираобразования. На рис. 1 при-

Таблица 1

Характеристики исходных образцов и образцов с покрытиями

Состав	Исходные параметры		Конечные параметры		
	Шероховатость подложки, мкм	Микротвер. основы, $H_{\mu}$	Толщина, мкм	Шероховатость покрытия, мкм	Микротвер. поверх. образцов с покрытием $H_{\mu}$
Покрытия Ti-N	0,018	770 – 800	1,0	0,036	780 – 830
Покрытия Mo-N	0,016	770 – 800	1,0	0,025	830 – 860
Покрытия (Ti-Al-N)	0,026	770 – 800	1,4	0,004	830 – 860

ведены зависимости коэффициента трения от нагрузки. Самые высокие значения коэффициента трения и низкие значения критической нагрузки задирообразования ( $\approx 8$  МПа) показала пара с бронзой Бр. 010С2НЗ. Самые низкие значения по коэффициентам трения имели пары с модифицированной поверхностью бронз. Это бронза Бр. Су6Ф0,9 (ВБ24), модифицированная покрытием ВАП-2, а также с бронзы Бр. 010С2НЗ и Бр. Су6Ф0,9, модифицированные по технологии ИТ 25.60 – 2003 (формирование модифицированных слоев на поверхностях трения путем обработки абразивными дисперсными материалами). При испытаниях этих пар критическая нагрузка задирообразования не была достигнута даже при предельном нагружении, которое позволяло оборудование. Однако по изнашивающей способности бронзы с модифицированной поверхностью показали неудовлетворительные результаты.



Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от нагрузки для образцов без покрытия

На рис. 2 и 3 приведены сравнительные данные по величине износа трущихся пар. Минимальной изнашивающей способностью обладает бронза Бр.Су3НЗЦС20Ф0,2, хотя износ самой бронзы максимальный. Высокие значения износа бронзы Бр. Су6Ф0,9 (ВБ24), модифицированной покрытием ВАП-2, обусловлены низкой износостойкостью покрытия как такового. Визуальный осмотр поверхности трения ролика показал, что покрытие ВАП-2 местами снято до бронзы.

Проведенные “нулевые” испытания определили область значений по коэффициентам трения, величинам износа и предельным нагрузкам до задирообразования, от которых можно отталкиваться при оценке результатов испытаний пар трения с покрытиями.

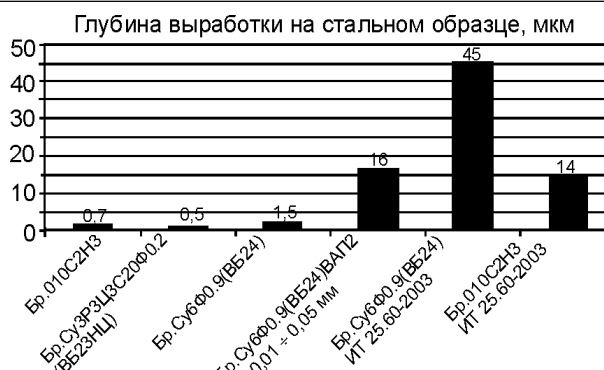


Рис. 2. Гистограмма износа образцов без покрытия.

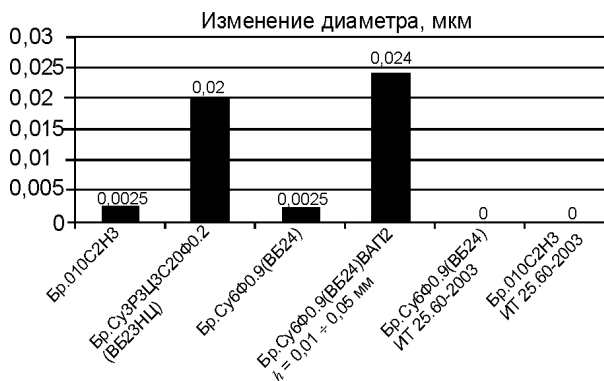


Рис. 3. Гистограмма износа бронзы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ “СТАЛЬ С ПОКРЫТИЕМ - БРОНЗА”

С целью определения влияния монослойных покрытий на трибологические характеристики пар трения с бронзой и получения исходных данных для разработки многокомпонентных нанослойных наноструктурных покрытий на образцы из стали были нанесены покрытия на основе составов Ti-N и Mo-N.

На рис. 4 приведены результаты испытаний пар трения с бронзой Брос.010С2НЗ и с бронзой ВБ-24. Видно, что наличие покрытий привело к существенному повышению значения  $P_{кр}$  задирообразования по сравнению с испытаниями образцов без покрытия с этими бронзами, но при этом возросли и значения коэффициента трения. Покрытия на основе Mo-N в паре трения с бронзой Брос.010С2НЗ имеют по сравнению с покрытиями на основе Ti-N более низкие значения коэффициента трения.

Бронза ВБ-24 при работе в паре с покрытием показала, как и в случае работы с непокрытым образцом, более низкие значения коэффициента трения и более высокие значения

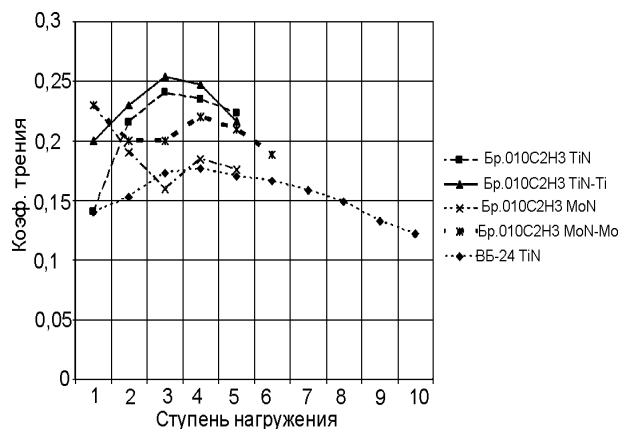


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от нагрузки для пар трения “сталь с покрытием – бронза”.

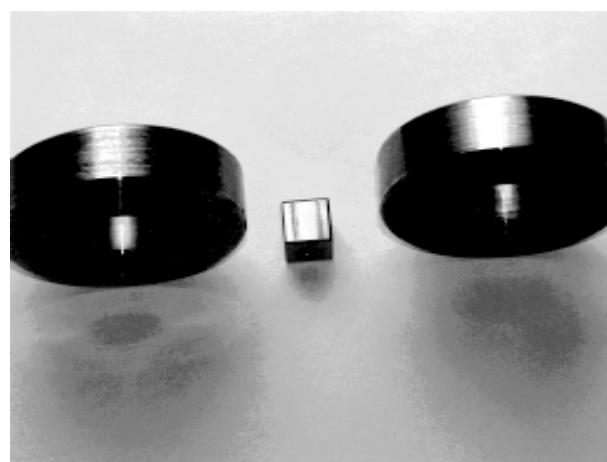
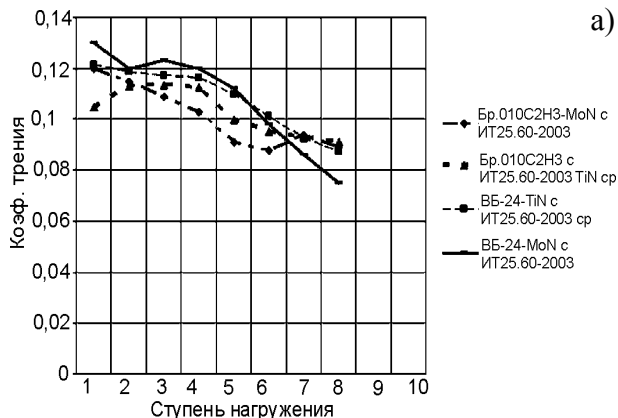
$P_{кр}$  задиробразования по сравнению с бронзой Бр.010С2НЗ, о чем свидетельствует не только увеличение нагрузки при испытаниях до предельной, но и ход зависимости коэффициента трения от нагрузки, который после некоторого подъема с увеличением нагрузки до 0,6 – 0,8 кН понижался вплоть до максимальной нагрузки 2 кН.

В целом, нанесение покрытий привело к значительному увеличению  $P_{кр}$  задиробразования и уменьшению износа образца по сравнению с результатами испытаний этих бронз со сталью, однако коэффициенты трения возросли. Высокая стойкость покрытий к износу позволила считать целесообразным провести испытания, пар трения с бронзами, обработанными по ИТ 25.60-2003, которые, несмотря на неудовлетворительные результаты по изнашивающей способности по отношению к стали, показали более низкие коэффициенты трения.

Как показали предварительные испытания, образцы с покрытиями при работе в контакте с бронзой, обработанной по ИТ 25.60-2003 выдерживают нагружения без задиробразования вплоть до максимально возможных нагрузках (2 кН), что при пересчете на PV составляет > 2600 кГм/сек. Это с избытком перекрывает реальные значения PV в большинстве случаев условий работы пар трения в агрегатах. Поэтому в дальнейших испытаниях нагрузка ограничивалась величиной 1,6 кН (8 ступеней нагружения).

На рис. 5 приведены результаты испытаний пар трения: сталь с покрытиями на основе составов Ti-N и Mo-N – бронза Бр.010С2НЗ, обработанная по ИТ 25.60.2003

и аналогичных образцов с покрытиями в паре трения с бронзой ВБ-24, обработанной по ИТ 25.60.2003



б)

Рис. 5. а) – зависимость коэффициента трения от нагрузки для пар трения образцов с покрытиями Ti-N и Mo-N при работе в парах трения с бронзами – Бр.010С2НЗ и ВБ-24, обработанными по ИТ 25.60.2003. б) – образцы с покрытиями (Ti-Al-N) после трибологических испытаний в парах трения с бронзой Бр.010С2НЗ, обработанной по ИТ 25.60.2003.

Значение коэффициентов трения для всех видов покрытий имеют достаточно близкие значения и при нагрузках более 1,0 кН они все находятся в пределах от 0,1 до 0,08. В целом, значения коэффициентов трения близки к значениям для пары “сталь-бронза ВБ23НЦ”, имевшей самый низкий коэффициент трения в группе “нулевых испытаний” для бронз без модификации поверхности.

Рабочая поверхность роликов из бронзы БР.010С2НЗ и ВБ24 с обработкой по ИТ 25.60.2003, как и в случае “нулевых испытаний”, не имела выработки, которую можно было бы зафиксировать по изменению диаметра ролика или изменению профиля у края дорожки трения. Величина же износа на об-

разцах с покрытием была не менее чем в 20 – 40 раз меньше по сравнению с образцами без покрытий, и находилась в пределах от 0,8 до 0,5 мм.

В работе [11] при исследовании стойкости разных покрытий в парах трения с гильзовым чугуном, в том числе, покрытий составов Ti-N и Mo-N, наибольшую стойкость показали нанокompозитные покрытия (Ti-Al-N) и покрытия AlN, имевших и наибольшую микротвердость (соответственно, 35 и 30 ГПа). В этом отношении представляло интерес испытать подобные покрытия и в данной работе. На образцы были нанесены покрытия двух типов, нанокompозитные покрытия (Ti-Al-N) и покрытия (Ti-Al-N) с менее твердым наружным слоем AlN для улучшения прирабатываемости трущихся поверхностей в процессе испытаний. Результаты испытаний пар трения с этими покрытиями и бронзой Бр.010С2НЗ, обработанной по ИТ 25.60.2003, а также результаты испытаний аналогичных образцов с покрытиями в паре трения с бронзой ВБ-24, обработанной по ИТ 25.60.2003, представлены на рис. 6.

В целом, характер поведения кривых  $F_{тр}$  от нагрузки сходный как для пар трения с бронзой БР.010С2НЗ, так и с бронзой ВБ-24, обработанными по ИТ 25.60.2003. Величина коэффициента трения стала еще ниже по сравнению со значениями, полученными при испытаниях образцов с покрытиями Ti-N и Mo-N в паре с этими бронзами. Наименьший коэффициент трения имели пара с бронзой ВБ-24, обработанной по ИТ 25.60.2003, ис-

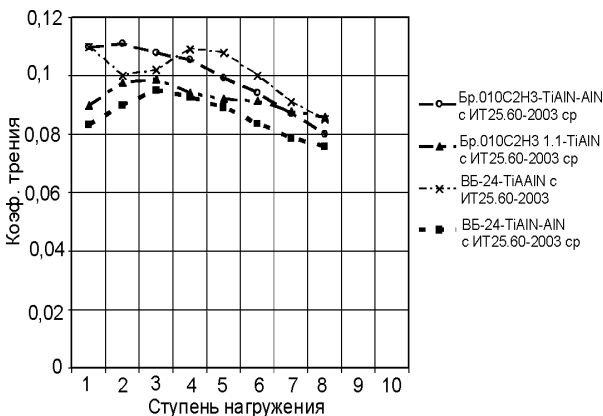


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от нагрузки для пар трения образцов с покрытиями (Ti-Al-N) при работе в парах трения с бронзами Бр.010С2НЗ и ВБ-24, обработанными по ИТ 25.60.2003.

пытывавшиеся с покрытием (TiN-AlN)-AlN. Его величина не превышала 0,095 во всем диапазоне нагрузок, а при максимальной нагрузке составляла 0,075, что соответствует минимальному значению полученному в данной работе для пар трения с исследованными покрытиями. Величина износа покрытий в парах трения не превышала 0,6 мкм. Что же касается износа роликов, то, как и в предыдущем случае, выработки по изменению диаметра ролика или изменению профиля у края дорожки трения зафиксировано не было. На рис. 7 приведена фотография поверхности образца с покрытием (Ti-Al-N) и ролика из бронзы Бр.010Н2СЗ, обработанной по ИТ 25.60.2003 после испытания.

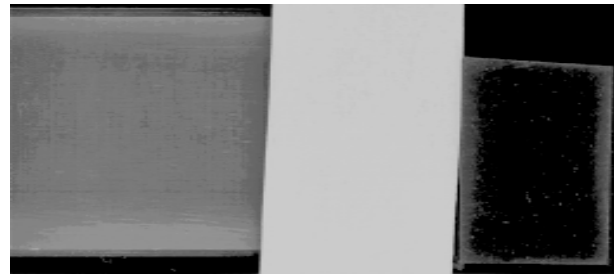


Рис. 7. Поверхности пар трения (Ti-Al-N) с бронзой Бр.010Н2СЗ обработанной по ИТ 25.60.2003.

Поверхность трения на образце имела шероховатость  $R_a = 0,04$  мкм, т.е. не изменилась по сравнению с исходным значением, а шероховатость поверхность ролика стала еще меньше по сравнению с исходной ( $R_a = 0,16$  мкм) и имела значение  $R_a = 0,1$  мкм. Близкие к этим значениям имели шероховатость и другие испытывавшиеся из этой серии пары трения. Это свидетельствует о хорошей прирабатываемости рабочих поверхностей в таких парах трения и устойчивости трибологических характеристик в процессе их эксплуатации.

Все образцы с покрытиями в испытаниях показали исключительно высокую стойкость к износу, по сравнению с испытаниями непокрытых образцов. На рис. 8 представлена гистограмма износа образцов с покрытиями после испытания в парах трения с бронзами, обработанными по ИТ25.60.2003.

Как видно из гистограммы (рис. 9.), стойкость покрытий при работе в парах с бронзами, имевшими обработку по ИТ 25.60.2003, увеличивается в ряду покрытий Ti-N, Mo-N, (Ti-Al-N).



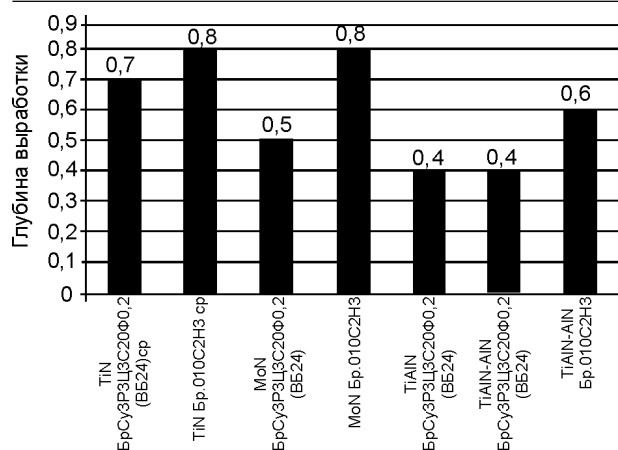


Рис. 8. Гистограмма износа образцов с покрытиями после испытания в парах трения с Бр.010С2Н3 и ВБ-24, обработанными по ИТ 25.60.2003.

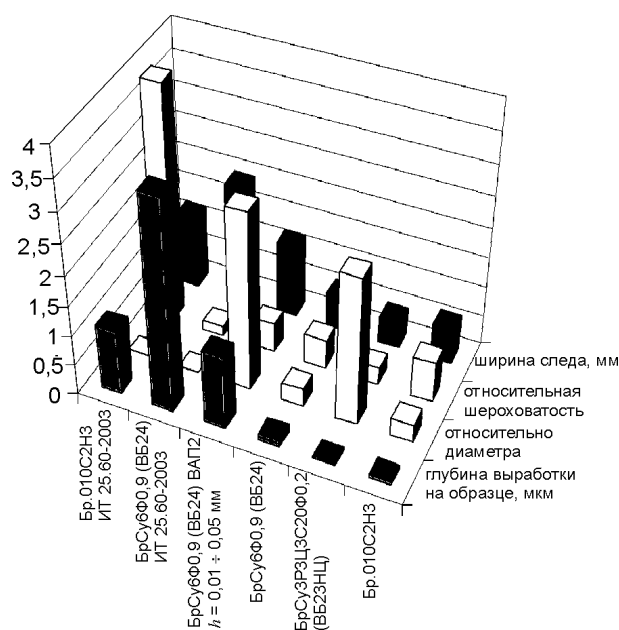


Рис. 9. Гистограмма износа образцов после испытания в парах трения с ВБ24, обработанной по ИТ 25.60.2003.

Сравнение поверхности бронзы после испытаний с различными типами покрытий показало, что покрытия (Ti-Al-N) обеспечивают наилучшую прирабатываемость ролика среди испытанных пар трения. С другой стороны величина износа покрытия этого типа имеет минимальные значения, что, в целом, позволяет эту пару рассматривать как наилучшую по результатам испытаний, проведенных в данной работе.

## ВЫВОДЫ

1. Отработаны технологические режимы и приемы получения методами вакуум-плазменного осаждения многокомпонентных покрытий с высоким качеством поверхности. для выбора материалов покрытий, ориенти-

рованных на применение в парах трения прецизионных узлов агрегатостроения, обладающих хорошей адгезией к основе при температурах, не превышающих 200 °С, не приводящие к снижению твердости основы

2. Проведенные трибологические исследования многокомпонентных покрытий на основе титана, молибдена, алюминия и их соединений с азотом при работе в парах с бронзами разного состава и различной обработкой поверхности в среде топлива ТС-1 показали, что многокомпонентные многослойные покрытия имеют более высокие показатели износостойкости и трибологические характеристики по сравнению с однослойными покрытиями на основе одного соединения.

3. Наиболее высокие трибологические характеристики пар трения были достигнуты при упрочнении, с одной стороны, поверхности образцов из стали, а с другой стороны, при соответствующей модификации поверхности бронз, т. е. при комплексном подходе к решению задачи оптимального выбора материалов для пар трения и способов их обработки.

4. На основании проведенных исследований многокомпонентные многослойные покрытия системы Ti-Al-N и бронзы ВБ24, Бр.010С2Н3, обработанные по ИТ 25.60.2003, можно рассматривать как одни из наиболее перспективных материалов для использования в парах трения прецизионных узлов агрегатостроения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – М.: Энергоиздат, 1989.
2. Bunshah R.F., Deshpandy C.V. Plasma assisted physical vapor deposition process: A review//J. Vac. Sci. Technol. A. – 1985. – Vol. 3, № 3, pt.1. – P. 553-560.
3. Костржицкий А. И. и др. Многокомпонентные вакуумные покрытия. – М.: Машиностроение, 1987.
4. Veprek S., Veprek-Hejman M.G.J., Kavrankova P., Prohazka J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites//Thin Solid Films. – 2005. – Vol. 476. – P. 1-29.
5. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии – М.: Физматлит, 2005.– 416с.

6. Аксенов И.И. Формирование радиальных потоков сепарированной эрозионной плазмы вакуумной дуги//Вопросы атомной науки и техники, серия "Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение"– 2001. – № 4.– С. 90-96.
7. Аксенов И.И., Белоус В.А., Васильев В.В. и др. Прямолинейный сепаратор углеродной плазмы вакуумной дуги//Вопросы атомной науки и техники, серия "Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение". – 2002.– № 2. – С. 127-130.
8. Gorban' V. F. et al. Tribological Characteristics of Multi-Layer Ion-Plasma Coatings, Based on Chromium and Titanium Nitrides//Proc. 1<sup>st</sup> Int. Congress on Rad. Phys.– 2000.– Vol. 3. – P. 494-496.
9. Haurt R., Patscheider J. From alloying to nanocomposites – improved performance of hard coatings//Advanced Engineering Materials.– 2000.– Vol. 2, № 5. – P. 247-259.
10. Leyland, Matthews A. On the significance of the H/E ratio in wear control: A nanocomposite approach to optimized tribological behavior//Wear. – 2000. – Vol. 246. – P. 12-28.
11. Дудник С.Ф., Сагалович А.В., Сагалович В.В., Любченко А.П., Олейник А.К. Исследование характеристик трения и износа ионно-плазменных покрытий, полученных на алюминиевом сплаве//Физическая инженерия поверхности. – 2004. – Т. 2, № 1-2. – С. 110-114
12. Сагалович А.В., Дудник С.Ф., Сагалович В.В. Автоматизированная система нанесения функциональных нанопокровтий//Оборудование и инструмент. – 2005. – Т. 12. – С. 2-3.

**РОЗРОБКА БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ  
ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ  
ІЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ПАР  
ТЕРТЯ В ПРЕЦИЗІЙНИХ ВУЗЛАХ  
АГРЕГАТОБУДУВАННЯ**

**А.В. Сагалович, В.А. Бабенко, С.Ф. Дудник,  
В.В. Сагалович, А.В. Кононіхін,**

**В.В. Попов, А.П. Любченко, А.К. Олійник**

Проведено дослідження з нанесення багатокомпонентних багатосарових і наносарових зміцнюючих покриттів на основі титану, молибдену та їхніх з'єднань із азотом методами вакуумно-плазмового осадження з застосуванням ефективних технологічних пристроїв формування плазмового потоку вакуумно-дугового джерела з різко зменшеною часткою "капельної" складової для одержання покриттів з високою якістю поверхні. Розроблені низькотемпературні процеси нанесення покриттів, які володіють гарною адгезією до основи при температурах, що не перевищують 200 °С, які не приводять до зниження твердості основи. Проведені трибологічні дослідження зразків з покриттями при роботі в парах із бронзою різного складу в середовищі палива ТС-1, а також порівняльні випробування роботи такої бронзи в парі з непокритими зразками з загартованої сталі Х12Ф1 з метою вибору матеріалів покриттів для пар тертя прецизійних вузлів агрегатобудування.

**MULTICOMPONENT COATINGS FOR  
PRECISE TRIBOLOGICAL PAIRS  
WORKING IN FRICTION ASSEMBLY  
OF MACHINE BUILDING AND AVIATION**  
**A.V. Sagalovych, V.A. Babenko, S.F. Dudnik,  
V.V. Sagalovych, A.V. Cononyhin, V.V. Popov,  
A.P. Lubchenko, A.C. Olejnik**

Investigation dealing with deposition of multilayer and nanolayered strengthening coatings on the titanium base of titanium, molybdenum and their compositions with nitrogen by means of vacuum plasma deposition methods utilizing novel effective plasma flow forming technological devices for the vacuum arc deposition source with highly decreased part of "droplets" in order to obtain coatings with high adhesion to the base under the temperature 220C avoiding decreasing base hardness were worked out. Tribological investigations of coated samples in pairs with bronzes of different composition in the media of aviation fuel TC-1 in the model of boundary lubrication and comparative tests of such bronzes in pairs with uncoated samples made of hardened steel X12Ф1 with the object of selection coating materials for precise tribological pairs working in friction assembly of machine building and aviation were carried out.