

УДК 629.7.023.22

Е.В. Иванов

СОЗДАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ И АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ «БУРАН»

Разработаны и выбраны для изготовления деталей узлов трения сплавы и стали: ВЖЛ16, ВНС-5, ВНС-17, ВЖ122, 95Х18, 13Х15Н4АМ3 и 07Х16Н6Ш, которые характеризуются сочетанием таких свойств, как высокая износостойкость, твердость, прочность, жаростойкость и коррозионная стойкость.

Разработаны состав и технология изготовления антифрикционного композиционного покрытия Та–Аг–ВАП-2, работоспособного на воздухе и в вакууме, при температуре от -130 до +300°С и удельных нагрузках до 200 МПа, обеспечивающих ресурс до 100 полетов и надежность работы узлов трения с коэффициентом трения до 0,2.

Коррозионные испытания образцов с покрытиями Та–Аг–ВАП-2 в камере солевого тумана КСТ-3 с распылением 5%-ного раствора NaCl при температуре 35°С (5 мин – распыление, 20 мин – пауза) показали, что антифрикционное композиционное покрытие не подвергается коррозии и не провоцирует коррозию подложки.

Проведена проверка воздействия облучения величиной 2,68 и 2,8 МГр на антифрикционные свойства покрытия ВАП-2. Испытания показали, что прочностные и антифрикционные свойства покрытия ВАП-2 практически не изменялись от воздействия радиации.

Ключевые слова: антифрикционное композиционное покрытие, износостойкость, фреттингостойкость, коэффициент трения, адгезионная прочность, несущая способность, коррозионная стойкость, наполнитель, режимы отверждения.

A number of steels and alloys, such as VZHL16, VNS-5, VNS-17, VZH122, 95H18, 13H15N4AM3 and 07H16N6Sh were developed and selected for manufacture of friction components. These materials combine high wear resistance, hardness, strength, heat resistance and corrosion resistance.

Chemical composition and manufacturing process of antifriction composite coating (Ta–Ag–VAP-2) workable in air and in vacuum at temperatures from -130 up to +300°С under specific loads up to 200 MPa were developed to provide service life up to 100 flights and reliability of friction units with the friction coefficient up to 0,2.

Corrosion tests of samples coated with Ta–Ag–VAP-2 in salt spray chamber KST-3 with spraying a 5% NaCl solution at 35°С (5 minutes – spraying, 20 minutes – pause) showed that the antifriction composite coating does not corrode and does not cause corrosion of the substrate.

An effect of radiation exposure (2,68 and 2,8 MGy) on antifriction properties of VAP-2 coating was investigated. The tests have shown that the strength and antifriction properties of VAP-2 coating remained practically unchanged upon the exposure under radiation.

Key words: antifriction composite coating, wear resistance, fretting resistance, friction coefficient, adhesion strength, load bearing capacity, corrosion resistance, filler, curing conditions.

Ни одно из «земных» антифрикционных средств не годится для использования на космическом корабле многоразового использования. Слишком широк диапазон условий, в которых он работает – от глубокого вакуума до нормального атмосферного давления, от криогенных температур до температур, превышающих температуру плавления многих металлов. Тем не менее смазочные и антифрикционные материалы совершенно необходимы для обеспечения работоспособности механизмов корабля. И такие материалы для «Бурана» были созданы в ВИАМ.

Условия работы пар трения космического корабля «Буран» характеризуются широкими диапазонами рабочих температур (от -130 до +500°С) и удельных нагрузок (до 200 МПа). Давление воздуха изменяется в пределах от 0,1 МПа (760 мм рт. ст.) до глубокого космического вакуума. Все узлы трения и различные крепежные сочленения изде-

лия «Буран» при его эксплуатации испытывают высокие вибрационные и радиационные воздействия. Эти экстремальные условия создают значительные трудности при выборе вида смазки для трущихся пар. Обычные жидкие масла и пластичные смазки здесь совершенно непригодны, так как их верхний температурный предел использования не превышает 150°С, а при понижении температуры до -130°С они замерзают и становятся твердыми. В вакууме любая смазочная жидкость быстро испаряется, и в результате поверхности трения оказываются полностью лишены смазки, что приведет к схватыванию поверхностей трения и заклиниванию узла.

Для обеспечения надежности и ресурса (100 полетов) министр авиационной промышленности П.В. Дементьев поручил ВИАМ выполнить ответственную задачу – обеспечить эффективными износостойкими материалами и антифрикционны-

ми покрытиями космический корабль «Буран». Особенность этой задачи заключалась в том, что необходимо было создать износостойкие материалы и антифрикционные покрытия совершенно нового класса, работоспособные при эксплуатации на воздухе и в вакууме, при температуре от -130 до $+500^{\circ}\text{C}$ с коэффициентом трения до 0,2. Именно показатели коэффициента трения и износостойкости определяют – «быть или не быть «Бурану» бездвиженным». Так сформулировал задачу создания материалов и покрытий для узлов трения Генеральный конструктор НПО «Молния» Г.Е. Лозино-Лозинский.

Для выполнения поставленной задачи был использован имеющийся в ВИАМ научный задел и опыт создания износостойких сплавов и антифрикционных композиционных покрытий. Сотрудниками НПО «Молния» и ВИАМ были сформулированы основные технические требования к материалам и покрытиям для узлов трения космического корабля «Буран»:

- обеспечение ресурса и надежности работы узлов трения;
- низкий коэффициент трения в динамике и при страгивании;
- стабильность коэффициента трения при изменении температуры, атмосферного давления (Земля–космос) и удельных нагрузок;
- работоспособность на воздухе и в вакууме при температуре от -130 до $+500^{\circ}\text{C}$ и удельных нагрузках до 200 МПа;
- обеспечение фреттингостойкости крепежных соединений;
- высокая адгезия покрытий к металлической поверхности (адгезионная прочность);
- высокие коррозионная и радиационная стойкость.

Сложными и различными оказываются кинематические схемы пар трения и их конструктивное оформление. Здесь присутствуют пары трения скольжения при вращательном, возвратно-вращательном и поступательном движении, при скольжении с проскальзыванием, шестеренчатые пары, сферические шарниры, сложной геометрии замки, номинально неподвижные крепежные соединения и т. д.

Специалистами НПО «Молния» и ВИАМ была проведена классификация пар трения, при которой учитывались параметры их нагружения и обеспеченность стендовым испытательным оборудованием. Для каждой из групп рекомендован испытательный стенд, приведены его основные характеристики. Учитывая весьма большую номенклатуру пар трения, в том числе отличных от пар, работающих по схеме вал–втулка, было решено провести их систематизацию и анализ, что позволило, во-первых, оценить оснащенность испытательным оборудованием и наметить пути его модернизации, во-вторых – значительно сократить номенклатуру испытаний. Кроме того,

систематизация и анализ дали возможность сформировать требования к вновь разрабатываемому стендовому оборудованию, создание которого позволило бы охватить испытаниями практически всю номенклатуру рассматриваемых узлов.

На этапе отборочных испытаний исследовались фрикционные характеристики антифрикционных покрытий (АФП) при повышенных (положительных) и низких (отрицательных) температурах на воздухе, в вакууме при различных нагрузках. Испытания позволили выявить принципиальную возможность применения выбранных покрытий и уточнить материал металлических подложек. Одновременно корректировалась технология нанесения АФП, отрабатывалась методика термовакуумных испытаний и уточнялись оценочные критерии работоспособности покрытий при испытаниях на стендах. Итогом этапа отборочных испытаний явился выбор материалов подложки и антифрикционных покрытий.

При подборе и разработке износостойких сплавов для узлов трения космического корабля «Буран» специалисты ВИАМ (Л.А. Чатынян, Т.А. Соловьева, В.П. Мигунов, Е.В. Иванов и др.) исходили из того, что структура материалов трения должна противостоять тому многообразию физических процессов, которые происходят в зоне фактического контакта. В качестве основы для создания и выбора новых износостойких сплавов были изучены двойные и тройные сплавы, легированные тугоплавкими металлами, с расчетом образования карбидных, боридных, интерметаллидных фаз, обладающих большой твердостью и менее склонных к схватыванию. Для получения комплекса свойств при высоких температурах, необходимо иметь более твердые опорные карбидные, боридные и интерметаллидные фазы. Наличие в составе сплавов таких легирующих элементов, как молибден, вольфрам, железо и хром, обеспечивает образование сложных (двойных) карбидов и интерметаллидов. Двойные карбиды выделяются в виде крупных включений преимущественно в дендритных пространствах или по границам зерен, образуя, как правило, непрерывную жесткую сетку. Такое расположение карбидов снижает вязкость. Высокое содержание молибдена значительно снижает склонность сплава к схватыванию при трении в условиях высоких температур не только в воздушной среде, но и в вакууме.

При введении в никелевые сплавы кремния растут износостойкость и антифрикционные свойства, так как в сплаве образуется твердая износостойкая фаза Лавеса. При этом кремний способствует образованию в процессе трения специфических поверхностных оксидных пленок и повышению прочности их сцепления с основным металлом, улучшает антифрикционные свойства сплавов, способствует образованию и стабилизации твердых износостойких фаз, являющихся

опорными включениями в основе сплава. Чем больше твердость этих фаз, тем выше износостойкость сплавов, работающих в условиях сухого трения при высоких температурах. Кроме того, кремний повышает жаростойкость и литейные свойства сплавов.

На основе проведенных исследований в институте были разработаны и выбраны для дальнейших испытаний следующие сплавы и стали: ВЖЛ16, ВНС-5, ВНС-17, ВЖ122, 95Х18, 13Х15Н4АМ3 и 07Х16Н6Ш, которые характеризуются сочетанием таких свойств, как высокая износостойкость, твердость, прочность, жаростойкость и коррозионная стойкость.

Для разработки антифрикционных композиционных покрытий были изучены отечественные и зарубежные образцы различных износостойких материалов и твердо-смазывающих антифрикционных покрытий. Разработана схема конструктивного устройства многослойного покрытия, в которой каждому слою отводилась своя функциональная роль при взаимодействии с сопряженной поверхностью. В качестве первого слоя электроискровым методом наносился тантал, который повышал твердость и обеспечивал нужную шероховатость поверхности. Вторым слоем состоял из мягкого серебра, нанесенного методом электролитического осаждения. Третий слой составляла антифрикционная твердая смазка.

Метод электроискрового легирования металлических поверхностей разработан сотрудниками ВИАМ (Н.И. Лазаренко, В.П. Разумов, Е.В. Иванов и др.). При нанесении тантала в качестве первого слоя учитывалось, что электроискровое легирование металлических поверхностей основано на использовании явления, сопровождающих мгновенное освобождение электрической энергии. Этот процесс всегда характеризуется высокой температурой канала искры и ионизацией межэлектродного пространства, но протекает в слоях микронной (микрометры) толщины и не отражается на свойствах основного металла. Как следствие этого, во-первых, происходит изменение структуры чрезвычайно тонкого поверхностного слоя металла с увеличением твердости металлической поверхности. Во-вторых, наличие высокой ионизации межэлектродного промежутка создает благоприятные условия для протекания на металлической поверхности целого ряда химических реакций, что приводит к изменению состава поверхностных слоев металла.

Под воздействием электрического поля и возникающих электродинамических сил размягченные объемы металла переносятся с анода на катод и, внедряясь в него, вступают в химическое соединение с материалом катода. Переносимый в этом случае на катод металл образует на его поверхности слой покрытия, физико-химические свойства которого близки к свойствам материала анода.

Поверхностные слои металлов и сплавов после электроискрового легирования различными материалами обладают рядом положительных свойств:

- образовавшиеся на поверхности при электроискровом легировании новые слои чрезвычайно прочно сцепляются с основным металлом;
- в переходном слое наблюдаются элементы диффузии и образование твердых растворов и сплавов;
- электроискровым методом могут быть нанесены как чистые металлы так и их соединения, в том числе тугоплавкие, например карбиды;
- износостойкость электроискровых покрытий всегда выше износостойкости металла подложки;
- при нанесении электроискровых покрытий деталь даже небольших размеров и с тонкими краями разогревается не более чем на 100°С;
- может быть обработана часть поверхности детали без ограничения ее геометрии, без какой-либо защиты поверхности и без прогрева всей детали.

Интенсивность процесса электроискрового легирования зависит от величины энергии, выделяющейся в межэлектродном промежутке. В используемых установках имеются режимы обработки, отличающиеся энергией импульсов и регулируемые величиной напряжения. Различные режимы обработки применяются в зависимости от требований, предъявляемых к обработанной поверхности, ее чистоте, сплошности получаемого покрытия, толщине и пористости нанесенного слоя, а также допустимой толщине подслоя.

Нанесение электроискровых покрытий проводили ручным, механизированным или автоматизированным способом на установках типа ЭФИ и ЭЛИТРОН. Установки имеют генераторы с энергией единичного импульса 0,02; 0,05; 0,11; 0,19; 0,3 или 0,6 Дж и частотой импульсов 50–200 Гц. В качестве электродов используются прутки или квадратные в сечении бруски металлического тантала соответственно с диаметром 2,0–4,0 мм или со стороной 2,0–3,5 мм и длиной 30–60 мм. Шероховатость покрываемых поверхностей R_a составляла не более 0,9 мкм и сопрягаемых поверхностей – не более 0,63 мкм. Нанесение тантала на рабочие поверхности деталей осуществлялось по следующему режиму: ток разряда 0,4–0,6 А; удельное время легирования 4 мин/см²; толщина покрытий 12–19 мкм. Шероховатость покрытий (R_a) составила от 2,4 до 5,4 мкм. Анализ микроструктуры образцов показывает, что при электроискровом легировании в воздушной среде на мягких режимах получают слои толщиной 10–20 мкм, тесно связанные с легированным материалом. Имеет место диффузионное насыщение, образование твердых растворов и механическое перемешивание. Поверхность после электроискрового легирования покрыта хаотично расположенными че-

чевицеобразными лунками и совершенно одинакова во всех направлениях.

Второй слой конструктивного многофункционального трехслойного покрытия состоит из мягкого серебра, нанесенного методом электролитического осаждения. Покрытия из чистых мягких металлов при высоких температурах заполняют все неровности, поры, шероховатые участки твердых покрытий и прочно удерживаются на поверхности. При трении в результате контактного взаимодействия мягких легкоплавких металлов с твердыми сплавами образуются новые соединения, обладающие более высокими смазывающими свойствами. Указанный принцип создания композиционных покрытий позволил определить оптимальный состав и предложить пары трения с покрытием для работы в воздушной среде и в вакууме. Тантал с серебряным покрытием при трении в вакууме обладает высокими антифрикционными свойствами, в этом случае серебро не взаимодействует с танталом и является хорошей смазкой. При работе на воздухе серебряные покрытия при трении показали более высокое значение коэффициента трения, чем при трении в вакууме. Это связано с термической и окислительной стабильностью указанных покрытий при высоких температурах (до 500°C). Метод и технология электролитического осаждения серебра разработаны в ВИАМ (Е.В. Плассеев, Т.И. Павленко, Н.Н. Мамонтова и др.).

Третьим слоем композиционного покрытия является антифрикционное покрытие пленкообразующего состава ВАП-2. Состав, технология изготовления суспензии и технология нанесения покрытия также разработаны в ВИАМ (О.Е. Кестнер, О.Н. Михеева, Е.В. Иванов, З.А. Белова и др.). Покрытие применяется в узлах трения для снижения трения и износа, а в номинально-неподвижных вибронгруженных сочленениях – для предотвращения схватывания и фреттинг-коррозии. Покрытие ВАП-2 имеет высокие физико-механические свойства и работоспособно на воздухе и в вакууме при температуре от -130 до +250°C. Прочность при прямом ударе составляет 500 Н/см. Прочность при обратном ударе после выдержки в жидком азоте снижается до 400 Н/см. Отработаны технологические режимы нанесения на детали трения пленкообразующего состава твердосмазочного покрытия ВАП-2 и его полимеризации. Суспензия представляет собой раствор дисульфида молибдена в эпоксидном связующем. Непосредственно перед нанесением покрытия детали обезжириваются и затем на поверхность наносится пленкообразующий состав. Покрытие полимеризуется при температуре 200±10°C. Толщина покрытия 10–20 мкм. Контролируется адгезионная и когезионная прочность, а также степень отверждения – пробой на «смываемость». Разработана и выпущена технологическая рекомендация по нанесению анти-

фрикционного покрытия ВАП-2 на поверхности деталей трения. Покрытие имеет гладкую матовую поверхность темно-серого цвета, хорошую адгезию к металлу, хорошо сопротивляется удару, эластично (не растрескивается при изгибе вокруг стержня $\varnothing 1$ мм).

Покрытие водостойко и стойко в нефтепродуктах: в керосиновых топливах, маслах типа МК-8; гидрожидкостях типа АМГ-10; бензине Б-70, этиловом спирте, ацетоне, ксилоле, этилцеллозольве, в смеси этих растворителей, РДВ и других. Покрытие ВАП-2 не защищает от коррозии и не вызывает коррозии металлов. Коэффициент трения при работе в паре со сталью в условиях сухого трения изменяется от 0,09 до 0,15 в зависимости от удельных нагрузок. Жаростойкость покрытия ВАП-2 определялась нагревом образцов на 200°C (выдержка 300 ч) и 300°C (выдержка 100 ч) с их последующим испытанием. Физико-механические и антифрикционные свойства покрытия после нагрева по сравнению со свойствами в исходном состоянии практически не изменились.

Была проведена проверка воздействия облучения величиной 2,68 и 2,8 МГр на антифрикционные свойства покрытия ВАП-2. Испытания показали, что прочностные и антифрикционные свойства покрытия ВАП-2 практически не изменяются от воздействия радиации. Следует отметить, что величина облучения 2,68 и 2,8 МГр значительно превышает величину космического облучения.

Сотрудники ВИАМ (С.З. Бокштейн, М.Б. Бронфин, В.А. Маричев) провели расчеты потери массы антифрикционного покрытия ВАП-2 в вакууме при изотермических выдержках в интервале температур 200–300°C. Для чистых металлов, упругость пара которых и коэффициенты испарения известны, такой расчет не представляет трудности и производится по формуле Лангмюра. Однако в данном случае нужно было определить потери массы синтетических конструкционных материалов типа эпоксидных смол с различными наполнителями. Задача усложнялась тем, что неизвестно поведение отдельных составных частей таких композиций при повышенных температурах в вакууме. Поэтому экспериментальное определение потери массы материалов является более простым и надежным путем по сравнению с расчетным. Сульфид молибдена является термодинамически устойчивым соединением и при температурах до 300°C превращений не претерпевает, поэтому всю потерю массы при изотермических выдержках в вакууме следует отнести за счет продуктов разложения эпоксидной смолы и остатков растворителя. Опыты проводились на высоковакуумной установке для исследования сублимации материалов методом непрерывного взвешивания.

Экспериментальным путем получены кинетические кривые удельной потери массы покрытия ВАП-2 при изотермических выдержках при 200, 250 и 300°C в вакууме. Общим для всех трех кри-

вых является падение скорости потери массы с увеличением продолжительности изотермической выдержки. При нагревании происходит частичная термическая диссоциация эпоксидной смолы и удаление газообразных продуктов распада. В том случае, когда лимитирующим звеном является «транспорт» летучего компонента к поверхности образца, потеря массы покрытия должна быть пропорциональна квадратному корню из времени отжига. При потере массы, не превышающей $4,5 \cdot 10^{-5}$ г/см² (что соответствует ~5% массы покрытия), экспериментальные точки располагаются на прямой, т. е. свидетельствуют о прямолинейной зависимости. Это подтверждает предположение о лимитирующей роли диффузии летучих продуктов распада в начальной стадии процесса сублимации покрытия ВАП-2. Ограниченность данных о поведении синтетических материалов в глубоком вакууме не позволила сделать определенных выводов о природе превращений покрытия ВАП-2 в процессе отжига. Описанные результаты оказались полезными при расчете потери массы покрытия в процессе эксплуатации изделия.

Исследована поверхность образцов титанового сплава с антифрикционными композиционными покрытиями после испытаний на трение. После испытаний на всех образцах структура поверхности неоднородна. Наряду с сохранившимися областями, имеющими практически такую же структуру, как в исходном состоянии, отмечаются неравномерно расположенные по трущейся поверхности области с измененной структурой и со вторичными структурами, образовавшимися при трении (рис. 1). Фазовый состав вторичных структур после сухого трения одинаков: твердый раствор молибдена и основная фаза – сульфид молибдена (MoS_2).

Установлено, что антифрикционное покрытие состоит из эпоксидной матрицы и включений частиц дисульфида молибдена. Исследования подтверждают, что в кристаллической решетке слоистых структур атомы располагаются в виде плоских слоев или гофрированных параллельных пакетов, состоящих из нескольких слоев. Основная масса частиц имеет размер 3–5 мкм. Открытая пористость покрытия составляет 15–20%. Напол-

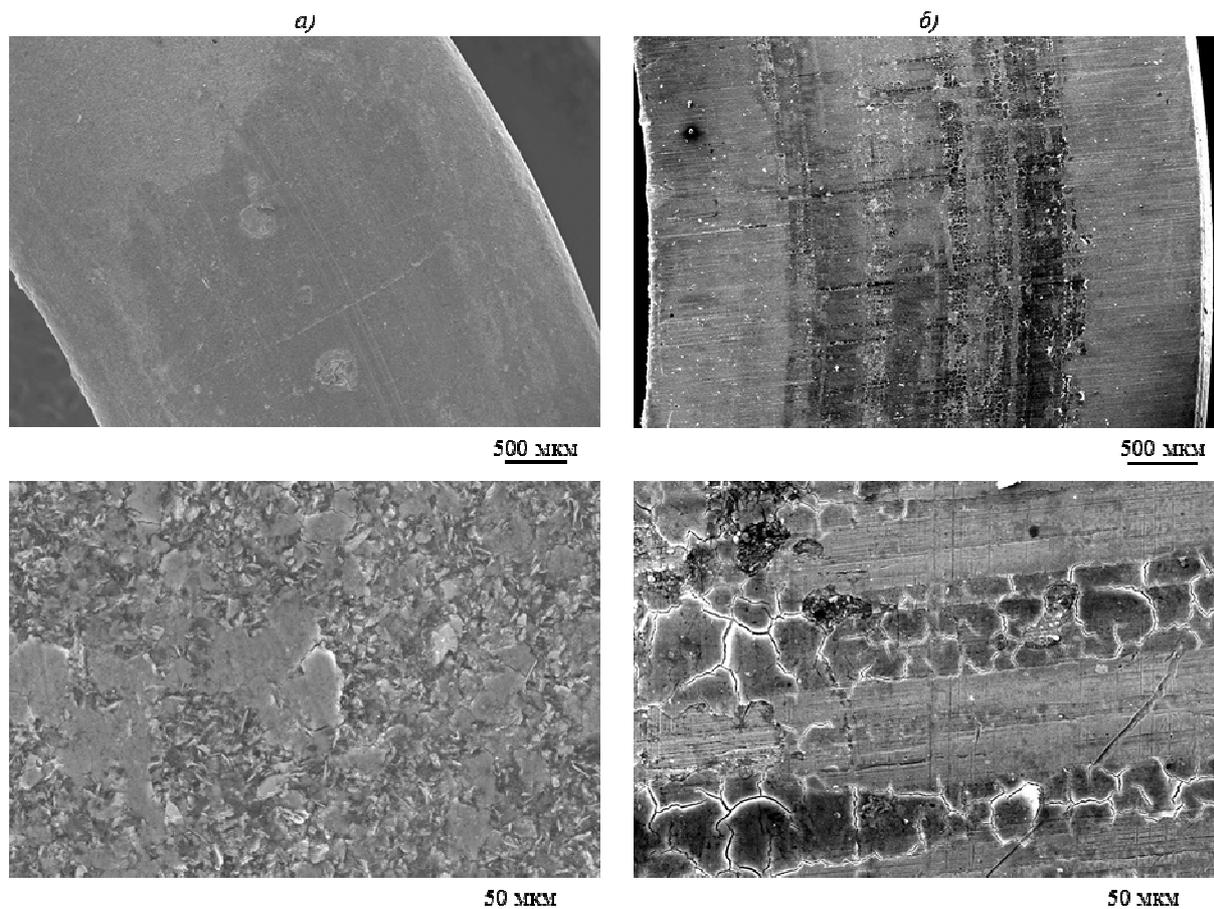


Рис. 1. Поверхность трения и слой вторичных структур после испытаний на воздухе:
a – покрытие Та–Аг–ВАП-2; *б* – контртело

нителю хорошо закреплены в эпоксидной матрице, что создает благоприятные условия для повышения удельных нагрузок в условиях эксплуатации. Результаты исследования позволяют утверждать, что при тяжелых режимах трения происходит химическое взаимодействие указанных смазок с внешней средой, вследствие чего образуются сульфиды и оксиды металлов, свойства которых определяют смазочную способность покрытия.

Проведены коррозионные испытания образцов с покрытиями Та–Ag–ВАП-2 в камере солевого тумана КСТ-3 с распылением 5%-ного раствора NaCl при температуре 35°C (5 мин – распыление, 20 мин – пауза). Длительность испытания 3 мес, осмотр образцов через 7–10 сут.

Для испытаний на коррозионную стойкость были представлены образцы размером 60×20×3 мм. На одну сторону каждого образца нанесено антифрикционное покрытие, два образца без покрытия (контрольные). Осмотр образцов из стали Х18Н9Т с покрытиями показал, что за время испытаний (90 сут) не было обнаружено продуктов коррозии и нарушений покрытия. Проведенные испытания показали, что антифрикционные твердосмазывающие покрытия не подвергаются коррозии и не провоцируют коррозии подложки, но не защищают ее от коррозии, так как являются пористыми и легко пропускают влагу и воду к подложке.

Вторым этапом работы явилось проведение фрикционных и ресурсных испытаний выбранных покрытий в парах трения вал–втулка с воспроизведением основных эксплуатационных параметров узлов трения изделия: удельной нагрузки, температуры и давления окружающей среды, кинематики и характера взаимодействия элементов пары. Целью этих испытаний являлась оценка фрикционных характеристик пар трения в динамике и при страгивании, износа в течение заданного ресурса, а также выдача заключения о применении в конструкторских испытаниях натуральных узлов.

Для обеспечения систематического исследования проблемы трения и изнашивания в условиях эксплуатации космического корабля «Буран», в ВИАМ, НПО «Молния», МВТУ им. Н.Э. Баумана, НИИ ТрансМаш и ИМАШ были созданы комплексы специального испытательного и технологического оборудования, разработаны методики для испытаний пар трения скольжения.

Все испытания проводились в основном в парах трения вал–втулка при температурах от -130 до +250°C, удельных нагрузках до 200 МПа, в вакууме и воздушной среде. Параметры испытаний – характер движения, удельные нагрузки, температура и давление среды – выбирались таким образом, чтобы они были максимально приближены к эксплуатационным условиям. По каждой позиции проводились три испытания – два ресурсных и одно на страгивание. Каждое испытание проводилось при двух значениях температур, соответствующих крайним значениям температурного интер-

вала эксплуатации узла трения. Для каждой пары трения изготавливались по три комплекта стеновых втулок (подшипников) и валов (две втулки и один вал в каждом комплекте). Критериями оценки работоспособности пар трения являлись: величина коэффициента трения, износа (весового и линейного) и состояние поверхностей трения.

Для всех испытанных пар характерен стабильный коэффициент трения (в пределах 0,03–0,2) в течение заданного ресурса как в вакууме, так и на воздухе при температурах от -130 до +300°C. Металлографическими исследованиями и внешним осмотром испытанных образцов установлено:

- дорожки трения валов и втулок гладкие, блестящие, задиры и глубоких рисок не наблюдается. После испытаний при нагрузках 2,2, 4 и 8 МПа покрытие ВАП-2 сохранилось почти полностью, при нагрузках 14; 20; 50 и 56 МПа покрытие ВАП-2 сохранилось в виде тонкой пленки. Следов схватывания на поверхности трения нет. Обнажения серебряного слоя нет;

- шероховатость в зоне трения $R_a=0,4$ мкм.

Исследования показали, что образцы с антифрикционными покрытиями Та–Ag–ВАП-2 на сталях и сплавах выдержали испытания на трение и износ при заданных выше условиях, поэтому были рекомендованы для дальнейших конструкторских испытаний в составе узлов трения в условиях воздействия всех эксплуатационных факторов (регламент полетов, ударные и вибрационные нагрузки, радиация и др.).

Технология нанесения антифрикционных композиционных покрытий была внедрена на авиационных заводах отрасли (ТМЗ, НАЗИЧ, САЗ и др.). На период организации производств на заводах отрасли, освоения технологии нанесения покрытий и для оценки качества антифрикционных композиционных покрытий совместными решениями предприятий была создана комиссия в составе: от ВИАМ – Е.В. Иванов (председатель комиссии), В.И. Жизнякова, Н.М. Вознесенская, Н.А. Крутогина, В.П. Разумов, Л.Н. Леонова, С.А. Соловьева, Т.И. Павленко, Н.Н. Мамонтова и др.; от НПО «Молния» – К.Н. Сергеев (зам. председателя комиссии), Л.В. Вульфвич, Н.П. Дудник, В.М. Кондратьев и др.; от НИАТ – А.Я. Лабурдов. Члены комиссии постоянно вели работы с заводами по комплексным программам экспериментальной отработки технологических приемов производства деталей с покрытиями. Постоянно проводились авторские проверки по качеству покрытий на заводах, составлялись замечания и планы мероприятий по повышению качества покрытий. По результатам авторских надзоров и положительным зачетным стендовым испытаниям предприятия ТМЗ, НАЗИЧ и САЗ прошли аттестацию с положительными результатами по уровню свойств (коэффициента трения и износостойкости) деталей с антифрикционными композиционными покрытиями.

В соответствии с действующей на серийных заводах технологической документацией были изготовлены детали узлов трения с антифрикционными композиционными покрытиями Та–Ag–ВАП-2 для натуральных испытаний. Толщина слоя танталового покрытия составила 10–15 мкм, серебряного покрытия: 6–9 мкм и покрытия ВАП-2 – до 25 мкм.

По программе испытаний в камере термовакуумной установки проведено испытание замков продольного и поперечного стыка в составе комбинированных спецустройств на полный ресурс функционирования в условиях пониженного атмосферного давления (вакуум) и температур от -94 до +100°C (элементы замковых устройств) и от -20°C до +20°C (нагрузочные устройства).

Замковые устройства продольного и поперечного стыка отработали в камере 320 циклов (полный ресурс) при имитации нагрузки на замки в соответствии с исходными данными на проектирование. До проведения испытаний на полный ресурс указанные замковые устройства отработали в нормальных условиях 180 циклов – отказов в функционировании не было.

При внешнем осмотре деталей и узлов замковых устройств продольного и поперечного стыка установлен кондиционный вид сопрягаемых деталей, гладкая рабочая поверхность без рисок (небольшое потемнение серебряного покрытия; потертости в месте контакта 10–15%) и только в зоне посадки подшипника (яблока) – потертости слоя ВАП-2 (до 80%). В контакте с кривошипом на крайних участках оси покрытие имеет отдельные потертости до тантала (суммарно до 60%) – поверхность гладкая.

По результатам испытаний подписан протокол совещания (рис. 2) и сделаны следующие выводы:

– пары трения замковых устройств поперечного и продольного стыка испытания на ресурс выдержали и находятся в удовлетворительном состоянии – обеспечили штатное, функционирование замков при отработке полного ресурса в нормальных условиях и в условиях экстремальных температур и вакуума. Изменения потребного момента на валу электромеханизма не наблюдалось;

– учитывая положительные результаты испытаний подшипника крюка ШС17Ю2УТ, установленного на вал с трехслойным покрытием и имеющего возможность вращаться по внутреннему диаметру и сфере, в целях дальнейшего повышения надежности рекомендовать подшипники этого типа устанавливать на оси с обеспечением вращения (покрытие – катодное фосфатирование+ВАП-2; толщина ВАП-2 – до 10 мкм).

Предприятиями НПО «Молния» и ВИАМ был подписан и утвержден технический акт (рис. 3).

По результатам всех натуральных испытаний был выпущен итоговый отчет о технической готовности конструкции подвижных узлов (пар трения) к первому полету космического корабля «Буран». Отчет был составлен в соответствии с типовыми

требованиями к содержанию итогового отчета и стал документом, обобщающим весь объем проведенных испытаний по экспериментальной отработке конструкции подвижных узлов (пар трения), предусмотренный программой (КПЭО) с учетом технических решений. В отчете дана положительная оценка готовности конструкции подвижных узлов к первой натурной работе изделия. В заключении итогового отчета записано: «Испытаниями подтверждена техническая готовность пар трения к испытаниям в составе изделия «Буран» с ресурсом на одно применение».

В ноябре 1986 г. был проведен запуск орбитального воздушно-космического корабля «Буран». Через два дня после полета разработчики провели осмотр состояния узлов трения корабля. Значительная часть узлов трения была осмотрена и освидетельствована на пригодность для дальнейших полетов. Все сопряженные поверхности были гладкими, не имели каких-либо дефектов и были пригодными для последующих полетов. Впервые в мире в автоматическом режиме осуществлены спуск и посадка многоразового космического корабля. Все системы управления полетом корабля работали в штатном режиме. Космический корабль «Буран» четко выполнил все команды по маневрированию при заходе на посадку и осуществил посадку в классическом стиле, что подтвердило высокую надежность конструкций систем управления полетом и высокую надежность разработанных в ВИАМ материалов и антифрикционных композиционных покрытий в том числе.

Полученный опыт создания износостойких сплавов и антифрикционных композиционных покрытий для узлов трения космического корабля «Буран» был широко использован в ВИАМ (Е.В. Иванов, И.С. Солнцева) в последующих разработках антифрикционных покрытий, работоспособных в широком интервале температур и нагрузок, – при создании современных летательных аппаратов многоразового использования [1–6].

Базой современной модели фрикционного контактного взаимодействия твердых тел при трении являются три наиболее важных положения, изложенных в фундаментальной работе И.В. Крагельского «О трении несмазанных поверхностей», в которой заложена основа молекулярно-механической теории трения. Она учитывает действующую природу сил трения, которые обусловлены как преодолением сил межмолекулярного взаимодействия между контактирующими поверхностями, так и формоизменением рельефа соприкасающихся тел за счет «пропахивающего» действия неровностей шероховатых поверхностей. Введено понятие о третьем теле, формирующемся между трущимися телами. Обязательным условием внешнего трения является формирование на поверхности твердого тела тонкой пленки, менее прочной, чем лежащие глубже слои. Формирова-

"Утверждаю"
 Руководитель организации
 п/я В-2512
А.С.Сысцов
 ".....".....1986г.

Руководитель организации
 п/я Г-4323
Р.С.Король
 ".....".....1986г.

Руководитель организации
 п/я Г-4296
В.Д.Талалаев
 ".....".....1986г.

И.о. руководителя организации
 п/я А-1838
В.Ф.Лантев
 ".....".....1986г.

ПРОТОКОЛ

совещания на предприятии п/я В-8058 по вопросу обеспечения работоспособности узлов трения изд.ПФ35.

Присутствовали:

от п/я Р-6209 т.т. Петраков А.Ф., Иванов Е.В.;
 от п/я В-8058 т.т. Погопалов А.В., Башилов А.С, Вульфович Л.В.;
 от п/я М-5671 т.т. Якушкин И.А.; от п/я М-1287 т.т. Логунов А.В., Снегов В.А.;
 от п/я А-П32 т.т.Медведев И.О., Зуев И.А.;
 от п/я Г-4621 т.т. Мирошкин А.М., Стычинский В.В., Микишанов В.В.;
 от п/я Г-4744 т.т. Бобрицкий Н.И., Гурович Р.И..

С целью обеспечения ресурса и надежности работы узлов трения изделия 11Ф35 с изд. 001 и с изд. 1.01 совещание решило:

1. Завершить комплекс научно-исследовательских работ, направленных на разработку и внедрение многослойных (композиционных) антифрикционных покрытий (ТА+Ао+ВАП2; Катодный фосфат.+ВАП2).
2. Завершить комплекс ресурсных испытаний узлов трения с антифрикционными покрытиями.
3. Разработать и внедрить технологию автоматизированного нанесения тантала.
4. Завершить аттестацию технологий нанесения покрытия на предприятиях-изготовителях изделия.

Проведение указанных работ подтвердит работоспособность узлов трения изд. ИФ35 в экстремальных условиях эксплуатации, оконч. работ-I кв.87г.,

Учитывая значительную сложность, объем и важность проводимой работы за ее выполнение установить в соответствии с Постановлением Совета Министров СССР от 08.01.60 г. №28-10 премию 6-й степени 40000 руб., в том числе:

п/я В-8058 - 9 тыс.руб.,
 п/я Р-6209 - 9 тыс. руб.,
 п/я А-П32 - 6 тыс. руб.,
 п/я Г-4744 - 6 тыс. руб.,
 п/я Г-4621 - 6 тыс. руб.,
 п/я Ж-1287 - 2 тыс. руб.,
 п/я М-5671 - 2 тыс. руб.

От п/я В-8058  Г.Е. Лозино-Лозинский
 От п/я Р-6209  Р.Е. Шалин
 От п/я М-5671  П.Н. Белянин
 От п/я А-П32  С.Г. Арутюнов
 От п/я Г-4621  М.Г. Абрамичев
 От п/я Г-4744  М.К. Сагалаев
 От п/я Ж-1287  Б.В. Карасев

Рис. 2. Протокол совещания по узлам трения изделия «Буран»

<p>"УТВЕРЖДАЮ"</p> <p>ГЛАВНЫЙ КОНСТРУКТОР</p> <p>ПРЕДПРИЯТИЯ П/Я В-8058</p> <p><i>А.Т.Тарасов</i></p> <p><u>А.Т.ТАРАСОВ</u></p> <p>30.09.88</p>	<p>"УТВЕРЖДАЮ"</p> <p>ЗАМ. РУКОВОДИТЕЛЯ</p> <p>ПРЕДПРИЯТИЯ П/Я Р-6209</p> <p><i>А.Ф.Петраков</i></p> <p><u>А.Ф.ПЕТРАКОВ</u></p> <p>30.09.88</p>
---	---

ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ

Мы, нижеподписавшиеся, представители предприятия п/я Р-6209 зам. нач. подразделения Иванов Е.В. и с.н.с. Жизнякова В.И. и представители предприятия п/я В-8058 начальник отдела Вульфович Л.В. и нач. бригады Климентова Е.В. составили настоящий акт в том, что в соответствии с "Положением-75" СТП 660.09-84 и с целью оценки готовности конструкций подвижных узлов к первой натурной работе изделия 11Ф35 предприятиями п/я В-8058, Р-6209 и др. подготовлен и выпущен итоговый отчёт В 5.00.0002.1Ю0.0ТИ 2, о технической готовности конструкции подвижных узлов (пар трения) к ИКІ, который обобщает весь объём проведённых испытаний и экспериментальной отработки конструкции подвижных узлов (пар трения).

От предприятия
п/я 8058

Нач. отдела 59
Л.В.Вульфович Л.В.Вульфович
Нач. бригады
Е.В.Климентова Е.В.Климентова

От предприятия
п/я Р-6209

Зам. начальника лаб. I4
Е.В.Иванов Е.В.Иванов
С.н.с. *В.И.Жизнякова*
В.И.Жизнякова

Рис. 3. Технический акт о готовности конструкции подвижных узлов

ние на поверхности трения некоторой шероховатости является третьим фундаментальным положением работы. Внешнее трение невозможно для идеально гладких однородных поверхностей, так как к ним не будет поступать окружающая среда, необходимая для формирования третьего тела. Такое трение также невозможно для очень шероховатых тел, так как вместо трения будет зацепление (речный эффект), поэтому шероховатость должна иметь некоторое промежуточное значение.

За последние годы разработан состав, технология изготовления антифрикционного покрытия ВАП-4 и фреттингостойкого покрытия ВФП-5 на основе эпоксидных смол с твердосмазочными наполнителями с коэффициентом трения 0,08–0,12, износостойкостью более $1 \cdot 10^{-8}$, работоспособных в условиях морского климата. Покрытия выдержали трехмесячные испытания в камере солевого тумана КСТ-35. Разработана технология нанесения покрытий на поверхности стальных деталей.

Разработано высокоэффективное функциональное твердосмазочное антифрикционное композиционное покрытие ВАФКП-2 и технология его нанесения на поверхности стальных деталей узлов трения. Покрытие ВАФКП-2 обеспечивает повышение удельных нагрузок на детали трения более чем на 25% вследствие повышения модуля упругости в 1,6 раза и прочности покрытия при сдвиге – в 2,3 раза. Коэффициент трения не превышает значения 0,1, износостойкость составляет $1 \cdot 10^{-9}$. Покрытие ВАФКП-2 работоспособно при температурах от -80 до +250°C и нагрузках до 150 МПа, обладает высокой коррозионной стойкостью (не провоцирует коррозию на металлах при контакте с ними), выдержало испытания в камере солевого тумана КСТ-35 в течение более 6 мес.

Разработано антифрикционное композиционное покрытие ВАФКП-3, состоящее из молибденового слоя, наносимого электроискровым мето-

дом, адгезионно-активного слоя и антифрикционного покрытия пленкообразующего состава ВАП-5. Разработаны технологические режимы нанесения антифрикционного композиционного покрытия ВАФКП-3 на поверхности титановых сплавов ВТ6 и ВТ22, обеспечивающие прочность покрытий при ударе 400–500 Н·см, эластичность при изгибе – не более 3 мм, прочность (сетчатый надрез) – не более 2 баллов.

Определены трибологические свойства покрытия ВАФКП-3: коэффициент трения – от 0,06 до 0,13; износостойкость – $J_{\text{изн}} \leq 5 \cdot 10^{-9}$; фреттингостойкость – более 4 ч. Покрытие работоспособно на воздухе в интервале температур от -80 до +250°C и удельных нагрузках до 50 МПа. Титановые образцы с покрытиями ВАФКП-3 выдержали коррозионные испытания с периодическим распылением 5%-ного раствора хлористого натрия в камере КСТ-35 в течение 6 мес без следов коррозии.

Разработанные покрытия ВАФКП-2 и ВАФКП-3 обеспечат повышение ресурса деталей трения из стали и титановых сплавов, работающих в морских условиях, более чем в 3 раза:

Материал	Износостойкость
ВАП-2 (серийный)	$5,3 \cdot 10^{-8}$
ВАФКП-2	$1 \cdot 10^{-9}$
ВАФКП-3	$3 \cdot 10^{-9}$

Фреттингостойкое покрытие ВФП-5 широко известно в КБ и на заводах авиационной промышленности, а антифрикционные покрытия ВАП-4 и ВАФКП-2 внедрены в изделия РД-33. Антифрикционные композиционные покрытия ВАФКП-2 и ВАФКП-3 рекомендованы для перспективных изделий новой техники. Использование покрытий позволит повысить ресурс деталей трения и агрегатов до ресурса эксплуатации изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машгиз. 1962. 383 с.
2. Стукач А.В., Башкарев А.Я., Букреев В.В. Технологические режимы формирования антифрикционных покрытий из композитов //Металлообработка. 2001. №4. С. 25–28.
3. Сытар В.И., Стовпник А.В., Ранский А.П., Панасюк А.Г., Дудка А.Н. Разработка и исследование антифрикционных покрытий на основе ароматического полиамида фенилона, модифицированного комплексными соединениями гетероциклических тиоамидов //Вопросы химии и химической технологии. 2007. №4. С. 120–127.
4. Дегтярев М.Г., Поликарпов А.В. Антифрикционные покрытия с твердыми смазками при восстановлении деталей машин //Вестник Орловского государственного аграрного университета. 2010. Т. 22. №1. С. 9–10.
5. Кудряшов А.Е., Левашов Е.А., Ветров Н.В., Шалькевич А.Б., Иванов Е.В., Солнцева И.С. Новый класс электроискровых покрытий для изделий из титановых сплавов, работающих в экстремальных условиях эксплуатации //Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2008. №3. С. 34–45.
6. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» /Под общ. ред. акад. РАН Каблова Е.Н. М.: Фонд «Наука и жизнь». 2013. С. 84–92.