

УДК 620.197

С.А. Каримова, Т.Г. Павловская

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ КОСМОСА**

*Применительно к условиям эксплуатации изделия «Буран», с учетом его конструктивных особенностей, разработана специальная методика, проведены коррозионные испытания металлических материалов (алюминиевых сплавов, титанового сплава, сталей) и изучена коррозионная активность фетра, теплозащитных материалов, резин, клеев, смазок и масел.*

*Разработаны способы защиты от коррозии с использованием анодно-оксидных и гальванических покрытий, смазок, и технология подготовки поверхности алюминиевого сплава при склеивании клеем Эластосил.*

**Ключевые слова:** термоциклирование, неметаллические материалы, металлические материалы, клеи, анодно-оксидные покрытия, коррозионные испытания, низкотемпературные смазки, анаэробная композиция.

*A special technique was developed, corrosion tests of metallic materials (aluminum alloys, titanium alloy, steels) were carried out and also corrosion efficiency of felt, heat-protective materials, rubbers, adhesives, lubricants and oils was studied as applied to the service conditions of «Buran» spaceship and to its structural features.*

*Methods of corrosion protection using anode-oxide and galvanic coatings, lubricants and a technology for preparation of aluminum alloy surface prior to adhesion with Elastosil adhesive were developed.*

**Key words:** temperature cycling, non-metallic materials, metallic materials, adhesives, anode-oxide coatings, corrosion tests, low-temperature lubricants, anaerobic composition.

Проблема обеспечения коррозионной стойкости конструкций относится к числу наиболее важных проблем, обеспечивающих надежность и календарный срок эксплуатации изделий. Теперь, спустя три десятилетия с момента полета «Бурана», после запуска и эксплуатации международных космических станций можно твердо сказать, что не правы были те специалисты, которые считали, что работа материалов в космосе значительно облегчается отсутствием влияния коррозионных факторов атмосферы.

Пилотируемые аппараты, в которых необходимо обеспечить условия для жизнедеятельности человека, создание экологически чистого микроклимата, требуют применения особых, в ряде случаев более эффективных средств защиты. В еще большей степени это относится к возвращаемым аппаратам, проходящим предполетную подготовку на Земле. Условия эксплуатации многократно космического корабля «Буран» имеют ряд особенностей, определяющих повышенные требования к применяемым материалам и покрытиям: обеспечение герметичности материалов и покрытий в условиях глубокого вакуума; отсутствие деструкции и «схватывания» покрытий; повышенные защитные свойства покрытий, обеспечивающие отсутствие коррозионных поражений при воздействии внешней среды и конденсата; сохранение свойств покрытий после воздействия эксплуатационных нагревов при наличии значительных перегрузок.

Целью работы коллектива специалистов ВИАМ по коррозии и защите металлов явилась разработка способов защиты от коррозии многократного космического корабля «Буран», что

включало всесторонние исследования по влиянию эксплуатационных факторов на свойства материалов и покрытий, разработку новых технологий нанесения покрытий и новых методов испытаний, изучение коррозионной активности неметаллических материалов: герметизирующих, анаэробных и теплозащитных, углепластиков, органитов и тканей, – а также рабочих и технологических сред для исключения непредвиденного возникновения коррозионных поражений.

До сентября 1981 года научное руководство этими работами осуществлял В.П. Батраков, в дальнейшем – А.Д. Жирнов. Координатором и ответственным исполнителем являлась Т.Г. Павловская.

**Методы исследования и материалы**

Для исследований использованы в основном металлические материалы промышленной поставки [1, 2], рекомендованные для изготовления корабля «Буран»: теплопрочный алюминиевый сплав 1201-T1 [3] системы алюминий–медь, сплав АМг6 [4] системы алюминий–магний, сплав Д16-T1 [5] системы алюминий–магний–медь, высокопрочная сталь ВКС-210 – применительно к крепежным деталям и др.

Исследовались защитные свойства серноокислотных (Ан.Окс.нхр) [6] и хромовокислотных (Ан.Окс.хром) анодно-оксидных покрытий после термовакуумных и коррозионных испытаний образцов из алюминиевых сплавов Д16-T1 и 1201-T1 (Т.Г. Павловская).

Исследовалась коррозионная активность целого ряда неметаллических материалов: фетра АТМ-15ПК, теплозащитного материала ТЗМК и ВТНК [7], резин 5И-23, 5И-30, клея Эластосил

137-175М и подслоя из К-10С, клея ВК-20МП, анаэробной композиции Унигерм УГ-1К [8], пластичных низкотемпературных смазок НИРА и НИКА, масел ИПМ-10 и ВТ-301 [9]. Испытания клеев, подслоя К-10С, анаэробной композиции и пластичных низкотемпературных смазок проведены Э.М. Шитовой и В.А. Петровой при периодическом воздействии условий повышенной влажности, термоциклирования и пониженного давления ( $133,3 \cdot 10^{-6}$  Па).

Испытания конструктивных образцов панелей с гибкой теплозащитной изоляцией (ТЗИ) проведены по методике, учитывающей специфику эксплуатации изделия «Буран», включающей чередующиеся коррозионные испытания, вакуум и термоциклирование.

Разработаны способы защиты стального крепежа, в том числе из высокопрочной стали ВКС-210 применительно к условиям эксплуатации изделия (Л.И. Прибылова, З.В. Логачева).

Проведены испытания конструктивных образцов трубопроводов гидросистемы из титанового сплава ПТ-7М [10], системы СОЖ и СОТР из сплава АМгЗМ [11] и стали 12Х18Н10Т с различными теплоносителями (В.Я. Белоус, Л.И. Шубадева, Л.Н. Пивоварова).

Влияние подготовки поверхности алюминиевого сплава Д16-Т1, наличие подслоя К-10Т на прочность склеивания клеем Эластосил 137-175М [12] и усталостные характеристики клеевых соединений исследованы Т.Г. Павловской.

Защитные свойства смазок ВНИИ НП-225, ВНИИ НП-282, ВНИИ НП-232, ВНИИ НП-274н [9], а также средств бельгийской фирмы «СРС» в качестве возобновляемых средств защиты изучили В.А. Петрова и Л.В. Понамаренко.

#### Исследование влияния термовакуумной обработки на защитные свойства анодно-оксидных покрытий

При длительной эксплуатации материалов в космических условиях возможна избирательная

сублимация легирующих элементов и деструкция оксидных покрытий, что может особенно заметно проявляться на контактирующих поверхностях. В связи с этим были проведены исследования образцов с целью определения возможности применения анодно-оксидных покрытий в условиях воздействия повышенных температур ( $160\text{--}200^\circ\text{C}$ ) и глубокого вакуума ( $133,3 \cdot 10^{-6}$  Па) для защиты от коррозии алюминиевых сплавов многоэтажного космического корабля. Образцы из сплавов Д16-АТ, 1201-АТ, Д16-Т1, 1201-Т1 [13] подвергались анодному оксидированию в сернокислотном электролите с уплотнением покрытия в растворе бихромата калия (Ан.Окс.нхр) и в хромовокислотном электролите (Ан.Окс.хром). Анодное оксидирование проводили в соответствии с НТД ВИАМ в лабораторных и производственных условиях. Толщина анодно-оксидного покрытия, определенная весовым методом, – как для сплава 1201, так и Д16 – составляла  $7\text{--}10$  мкм для покрытия Ан.Окс.нхр и  $1,5\text{--}2$  мкм – для покрытия Ан.Окс.хром. После анодного оксидирования часть образцов подвергали термовакуумной обработке в камере в течение 6 ч при температуре  $160^\circ\text{C}$ , давлении  $133,3 \cdot 10^{-6}$  Па, часть – при  $200^\circ\text{C}$  и таком же давлении. Оценку влияния термовакуумной обработки проводили по внешнему виду и потере массы анодно-оксидных покрытий (табл. 1). После термовакуумной обработки образцы с покрытиями проходили экспозицию в течение 90 сут в камере солевого тумана (КСТ) по режиму: непрерывное распыление раствора 5%-ного NaCl при температуре  $35^\circ\text{C}$ , влажности 98% (табл. 2). После термовакуумной обработки внешний вид образцов практически не изменился, а потери массы покрытия Ан.Окс.нхр составили  $5\text{--}10\%$ , покрытия Ан.Окс.хром:  $1\text{--}3\%$ , что обусловлено потерями воды, содержащейся в порах анодно-оксидных покрытий. Потеря массы покрытий контрольных образцов после воздействия нагрева  $200^\circ\text{C}$  при нормальном атмосферном давлении заметно меньше для покрытия Ан.Окс.нхр и со-

Таблица 1

Изменение массы анодно-оксидных покрытий после термовакуумной обработки (вакуум  $133,3 \cdot 10^{-6}$  Па, температура  $160\text{--}200^\circ\text{C}$ , выдержка 6 ч)

Сплав, термообработка	Покрытие	Толщина покрытия, мкм	Потери массы покрытия после нагрева $200^\circ\text{C}$ , 6 ч		Потери массы покрытия после термовакуумной обработки при температуре, $^\circ\text{C}$			
			мг/дм <sup>2</sup>	% от массы пленки	160		200	
					мг/дм <sup>2</sup>	% от массы пленки	мг/дм <sup>2</sup>	% от массы пленки
Д16-АТ1	Ан.Окс.нхр	10,0	3,0	3,0	6,0	5,0	6,0	5,0
Д16-Т1		7,0	6,0	5,0	9,0	7,0	8,0	6,8
Д16-АТ1	Ан.Окс.хром	2,0	3,0	3,0	2,0	2,0	1,0	1,0
Д16-Т1		1,5	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0	2,0
1201-АТ1	Ан.Окс.нхр	10,0	4,0	3,5	7,0	6,0	6,0	5,0
1201-Т1		7,0	9,0	7,0	13,0	10,0	13,0	10,0
1201-АТ1	Ан.Окс.хром	2,0	3,0	3,0	1,0	1,0	3,0	3,0
1201-Т1		1,5	2,0	2,0	1,0	1,0	3,0	3,0

Таблица 2

## Влияние термовакуумной обработки на защитные свойства анодно-оксидных покрытий

Сплав, термообработка	Покрытие	Состояние поверхности образцов после экспозиции в КСТ в течение 90 сут		
		Термовакуумная обработка (вакуум $133,3 \cdot 10^{-6}$ Па) при температуре, °С		Без выдержки в вакууме, при температуре 200°С
		160	200	
Д16-АТ1	Ан.Окс.нхр	Незначительные продукты коррозии, белёсость	Незначительные продукты коррозии, белёсость	Сильная белёсость
Д16-Т1		Единичные начальные очаги коррозии, белёсость	Единичные начальные очаги коррозии, белёсость	Слабая коррозия (5%), сильная белёсость
Д16-АТ1	Ан.Окс.хром	Слабая коррозия (15%), слабая белёсость	Слабая коррозия (15%), слабая белёсость	Слабая коррозия (10–15%), сильная белёсость
Д16-Т1		Сильная коррозия (100%)	Сильная коррозия (100%)	Сильная коррозия (100%)
1201-АТ1	Ан.Окс.нхр	Незначительные продукты коррозии, сильная белёсость	Незначительные продукты коррозии, сильная белёсость	Сильная белёсость
1201-Т1		Слабая коррозия (15%)	Слабая коррозия (15%)	То же
1201-АТ1	Ан.Окс.хром	Сильная коррозия (100%)	Сильная коррозия (100%)	Сильная коррозия (100%)
1201-Т1		То же	То же	То же

ставляет 3–7%, для покрытия Ан.Окс.хром потери массы практически не отличаются от потерь после термовакуумной обработки: 2–3%. Результаты осмотра образцов после экспозиции в КСТ показали (см. табл. 2), что наблюдается деструкция покрытия в виде белёсости в большей степени в результате действия нагревов (контрольные образцы), чем при совместном действии нагрева в вакууме. Результаты испытаний подтвердили, что и после термовакуумной обработки защитные свойства сернокислотных анодно-оксидных покрытий существенно превосходят покрытия хромоокислотные.

#### Исследование комплексной системы защиты внешней и внутренней поверхностей изделия «Буран»

Исследование систем защиты внешней и внутренней поверхностей многоазового космического корабля «Буран» проводилось на конструктивных образцах с целью подтверждения гарантийных сроков эксплуатации изделия. Проведено испытание образцов панелей с ТЗИ, имитирующей конструкцию обшивки планера. Описание материалов и покрытий образцов панелей приведено в табл. 3. Внешний вид панелей показан на рис. 1.

Одной из основных проблем явилось обеспечение герметичности соединений и стыковых узлов (С.А. Каримова, Т.Г. Павловская). Известно, что сернокислотные анодно-оксидные покрытия (Ан.Окс.нхр), применяемые для защиты алюминиевых сплавов и обладающие высокими антикоррозионными свойствами, имеют пористость 40–60% – в зависимости от технологии нанесения покрытия. Для уплотнения материала применяют водные растворы ингибиторов. Но как будут вести себя такого рода покрытия в условиях глубокого ваку-

ума ( $133,3 \cdot 10^{-6}$  Па) и повышенной температуры, насколько может пройти сублимация и деструкция, как будет влиять шероховатость, создаваемая в процессе нанесения покрытия, будут ли сохранены защитные свойства покрытия? Все это было чрезвычайно важно для защиты от коррозии теплопрочного сплава 1201-Т1, имеющего пониженную коррозионную стойкость. Для ответов на эти вопросы была разработана специальная методика, имитирующая эксплуатационные условия. В основе ее лежат чередующиеся три этапа (I–II–III): коррозионные испытания, сушка и термоциклирование в вакууме. Схема испытаний приведена на рис. 2.

Этап I представляет собой 30 циклов климатических испытаний общей продолжительностью 720 ч в камере влажности КТК 3000 по режиму: относительная влажность  $\phi=98-100\%$ , нагрев с 20 до 50°С в течение 1 ч, выдержка при температуре +50±5°С в течение 8 ч, охлаждение до 20°С в течение 15 ч.

Этап II – сушка в той же камере при температуре 120°С в течение 3 ч.

Этап III – выдержка в вакуумной камере при давлении  $P=133,3 \cdot 10^{-6}$  Па с одновременным термоциклированием (50 циклов, общей продолжительностью 550 ч) по режиму: выдержка 1 ч при температуре 120±5°С, снижение температуры до -130±5°С в течение 8 ч со скоростью 30°С/ч.

После проведения испытаний в полном объеме с трехкратным чередованием этапов I–II–III был проведен осмотр наружной поверхности панелей под ТЗИ, для чего механически были удалены фетр и ТЗИ. На наружной поверхности панелей и крепеже следов коррозии обнаружено не было. На внутренней поверхности образцов-панелей типа I (табл. 4) обнаружена незначительная коррозия колец болт-заклепок из сплава В65, что вызвано

Таблица 3

**Материалы и покрытия конструктивных образцов-панелей  
(материал деталей внутреннего набора – сплав Д16-Т1)**

Условное обозначение типа образца	Количество образцов	Материал обшивки	Покрытие внешней поверхности	Материал крепежа	Покрытия крепежа	Примечание
1	8	1201-Т1 + + фетр АТМ-15ПК + + ТЗИ (клей Эластосил 137-175М)	Ан.Окс.нхр + + грунт ЭПО214 (2 слоя, горячей сушки)	Болт-заклепка В65 Стержень ВТ16	Ан.Окс.нхр Ан.Окс.	Весь крепеж устанавливался на сырой грунтовке ЭПО214, выступающие части крепежа покрывались 1 слоем грунта ЭПО214 холодной сушки
2	4	То же	То же	Болт ВТ16 Заклепка 16ХСН Заклепка В65 Гайка 16ХСН Шайба ОТ4	Ан.Окс. Кдб.хр Ан.Окс.нхр Кдб.хр Ан.Окс.	
3	6	-«-	-«-	Заклепки В65	Ан.Окс.нхр	

Таблица 4

**Результаты испытаний конструктивных образцов-панелей с ТЗИ**

Условное обозначение типа образцов	Количество образцов	Состояние внутренней поверхности	Состояние крепежных деталей
1	8	Коррозия отсутствует, отслаивания ЛКП нет	На двух образцах по 3 точки коррозии на острых краях колец из сплава В65
2	4	Коррозия отсутствует, на всех образцах отслаивание грунтовки ФЛ-086	Коррозия отсутствует
3	6	Коррозия отсутствует, отслаивания ЛКП нет	То же

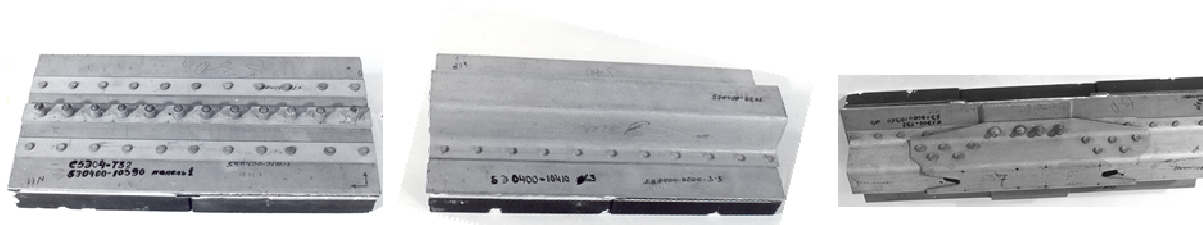


Рис. 1. Внешний вид конструктивных панелей с внутренней стороны (снаружи ТЗИ)

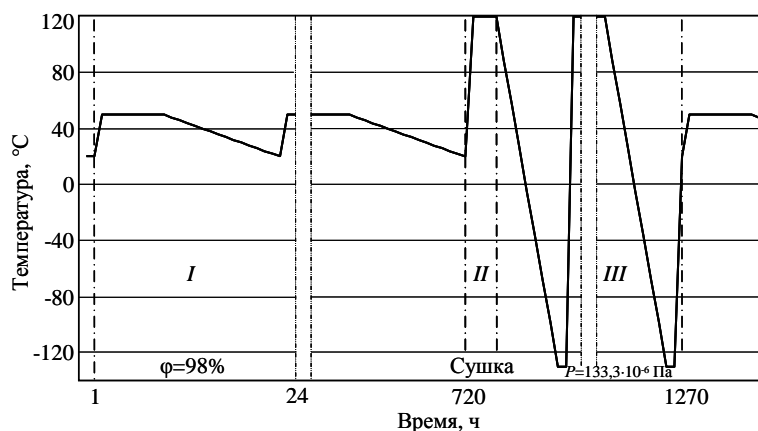


Рис. 2. Схема ускоренных испытаний конструктивных панелей:  
I, II, III – этапы испытаний, имитирующие эксплуатационных условия

нарушением защитного покрытия на острых кромках при установке крепежа. На образцах типа 2 обнаружено отслаивание грунтовки ФЛ-086.

Разработанная методика позволила оценить свойства применяющихся в промышленности анодно-оксидных покрытий, скорректировать режимы нанесения покрытий, сформулировать требования к покрытиям и защите от коррозии узлов для обеспечения герметичности. Разработанные рекомендации были апробированы на конструктивных образцах (без ТЗИ и с ТЗИ) с проведением термовакуумных и коррозионных испытаний и с последующей оценкой герметичности соединений на специальной установке с использованием масс-спектрометрического гелиевого течеискателя (Т.Г. Павловская). Испытания на герметичность образцов из сплава 1201-Т1 с различными анодно-оксидными покрытиями показали, что покрытие Ан.Окс.хром не удовлетворяет требованиям по герметичности из-за повышения шероховатости поверхности на 0,2–0,3 мкм в процессе ее подготовки и нанесения покрытия, – это связано с повышенным содержанием меди в сплаве (5,8–6,8%) и повышенной неравномерной травимостью сплава при нанесении хромовокислотного покрытия.

В результате исследования установлено, что для обеспечения герметичности и защитных свойств необходимо использовать анодное оксидирование в сернокислотном электролите с ограничением температуры и продолжительности оксидирования. Разработанные системы покрытий обеспечивают защиту от коррозии внешней и внутренней поверхностей планера, клепаных и болтовых соединений, стыков конструкции.

### Исследование эффективности защиты от коррозии крепежа из стали ВКС-210

Для исследования эффективности защиты крепежа болты из стали ВКС-210 подвергали кадмированию и фосфатированию в соответствии с НТД ВИАМ (Л.И. Прибылова, З.В. Логачева). Постановку болтов осуществляли в разъемные струбины из сплава Д16-Т с покрытием Ан.Окс.нхр + 1 слой ЭП-0215 горячей сушки и в струбины из стали 30ХГСА с покрытием фосфатирование + 1 слой ЭП-0215 горячей сушки. Постановку болтов в пакеты осуществляли с применением составов, приведенных в табл. 5.

После постановки болтов пакеты окрашивались вторым слоем грунта ЭП-0214. Испытания болтовых соединений проходили по следующему режиму: выдержка в вакууме  $133,3 \cdot 10^{-6}$  Па в течение 140 ч и 30 циклов термоциклирования. Цикл при термоциклировании включал выдержку в течение 1 ч при температуре  $-70^{\circ}\text{C}$ , подъем температуры до  $130^{\circ}\text{C}$  и выдержку при этой температуре в течение 1 ч. Воздействие вакуума контролировали весовым методом. Образцы после выдержки в вакууме и термоциклирования подвергались испытаниям в камере тропиков (КТ) в течение 60 сут.

Как показали результаты испытаний, воздействие вакуума практически не вызывает потерь массы указанных материалов. За время испытаний постановочные материалы обеспечивают защиту от коррозии болтового соединения по сопрягаемым поверхностям.

На основании проведенных исследований было установлено, что кадмиевое покрытие, являющееся основным защитным покрытием стальных деталей в авиации, не может быть применено для

Таблица 5

Результаты испытания пакетов с крепежом из стали ВКС-210

Постановочный материал	Выдержка в вакууме ( $133,3 \cdot 10^{-6}$ Па) в течение 140 ч		Термоциклирование + коррозионные испытания (60 сут) в КТ	
	Потеря массы болта, мг	Внешний вид	Состояние поверхности по сопрягаемым поверхностям	Внешний вид крепежа
Анаэробная композиция УГ-1К	1,2	Без изменения	Коррозия отсутствует	На некоторых болтах 1–2 точки коррозии по острым кромкам выступающих болтов
Анаэробная композиция ВАК-1Ф	1,3	То же	То же	
Грунт ЭП-076	0	«-»	«-»	
Смазка ВНИИНП-225	0	Изменение рельефа масляного слоя	«-»	

Таблица 6

Эффективность защиты стали ВКС-210-ИД от коррозионного растрескивания

Тип смазки	Защитное покрытие	Время до растрескивания, сут	
		во влажной атмосфере	в камере тропиков (КТ)
91Г-46Н	Без покрытия (после шлифования)	74; ост. >105	46; ост. >105
	Оксидное фосфатирование (УВФ)	>105 (без разрушения)	39; >105
ВНИИНП-504	Без покрытия (после шлифования)	>105 (без разрушения)	>105 (без разрушения)
	Оксидное фосфатирование (УВФ)	>105 (без разрушения)	>105 (без разрушения)
Без смазки	Без покрытия	46–51	35–50

защиты стального крепежа в условиях воздействия вакуума и повышенных температур, так как происходит сильная сублимация кадмия: при температуре выше 90°C в вакууме  $133,3 \cdot 10^{-6}$  Па скорость сублимации составляет более 15 мкм в год.

Для деталей редуктора исследовали эффективность защиты от коррозии и коррозионного растрескивания стали ВКС-210-ИД с применением пластичной смазки 91Г-46Н и твердосмазочного покрытия ВНИИНП-504 (табл. 6). По результатам испытаний даны рекомендации по применению для деталей редуктора из стали ВКС-210-ИД твердосмазочного покрытия ВНИИНП-504.

Применение в конструкции корабля «Буран» большого количества неметаллических материалов потребовало проведения испытаний для определения их коррозионной активности по отношению к контактирующим с ними металлическим материалам (Л.В. Понамаренко). Испытанию подвергались теплозащитные материалы различных марок, войлоки, герметики, резины, клеи, подслои под клеи и герметики, анаэробные композиции, смазки, масла, твердосмазочные материалы, углепластики, стеклопластики, пенопласты и др. Испытания проводили в соответствии с ОСТ1.90.119 с учетом технологических и расчетных эксплуатационных нагревов. Испытания клеев, подслоя К-10С, анаэробной композиции и пластичных низкотемпературных смазок впервые

проведены также при периодическом воздействии условий повышенной влажности, термоциклирования с конденсацией влаги и глубокого вакуума ( $133,3 \cdot 10^{-6}$  Па).

Полученные результаты позволили исключить из числа предполагаемых к применению те материалы, которые показали повышенную коррозионную активность, а для остальных – рекомендовать материалы в качестве допустимой контактной пары.

Исследованы защитные свойства временных средств защиты: смазок ВНИИНП-225, -282, -232, -274Н – и аналогичных средств защиты бельгийского производителя «СРС», представляющих собой ингибированные нефтяные составы, образующие тонкую прозрачную маслянистую пленку. Установлено, что эти средства достаточно эффективны при условии их периодического обновления.

Разработаны способы защиты от коррозии изделия «Буран» с выпуском производственной инструкции (ПИ), которая включает защиту внешней и внутренней поверхностей, мест контактов, деталей агрегатов и систем жизнеобеспечения, межоперационную защиту, защиту зон, где покрытия должны наноситься в процессе сборки изделия, а также зон с повышенными требованиями по герметичности [14].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. 7–17.
2. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 157–167.
3. Сплавы алюминиевые с медью и марганцем /В кн.: Авиационные материалы: Справочник в 12-ти томах. Т. 9. М.: ВИАМ. 2011. С. 189–208.
4. Сплавы алюминия с магнием (магналии) свариваемые /В кн.: Авиационные материалы: Справочник в 12-ти томах. Т. 9. М.: ВИАМ. 2011. С. 29–32.
5. Сплавы с алюминием, с медью и магнием (дуралюмины) конструкционные /В кн.: Авиационные материалы: Справочник в 12-ти томах. Т. 9. М.: ВИАМ. 2011. С. 75–80.
6. Аверьянов Е.Е. Справочник по анодированию. М.: Машиностроение. 1988. С. 58–60.
7. Материал ВТНК. /В кн.: Авиационные материалы: Справочник в 12-ти томах. Т. 9. М.: ВИАМ. 2011. С. 34.
8. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Клеи и герметики в конструкции изделия Буран //Клеи. Герметики и технологии. 2009. №1. С. 27–31.
9. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник /Под ред. В.М. Школьников. М.: Техинформ. 1999. С. 168, 172, 328, 331, 335.
10. Братухин А.Т., Калачев Б.А., Садков В.В. и др. Технологии производства титановых самолетных конструкций. М.: Машиностроение. 1995. С. 25, 30, 55.
11. Сплавы алюминия с магнием (магналии) свариваемые /В кн.: Авиационные материалы: Справочник в 12-ти томах. Т. 9. М.: ВИАМ. 2011. С. 44–54.
12. Petrova A.P., Lukina N.F. Adhesives and Sealants Application in shuttle Buran structure //Polymer Science. D. 2009. V. 2. №3. P. 166–169.
13. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 167–182.
14. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» /Под общ. ред. акад. РАН Е.Н. Каблова. М.: Фонд «Наука и жизнь». 2013. 128 с.