

ВЫБОР И НАЗНАЧЕНИЕ ДИРЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ СИЛОВЫХ АВИАКОНСТРУКЦИЙ ПО КРИТЕРИЯМ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ

На основе проведенного в течение ряда лет анализа и синтеза директивной технологии выбора покрытий в ответственных высоконагруженных агрегатах, узлах и деталях авиационных конструкций по предложенным критериям долговечности и экономической целесообразности, обобщенного в [1 - 5] разработаны и внедрены на ГП «Антонов» технологические рекомендации по научно обоснованному назначению покрытий изделий из титановых сплавов и высокопрочных нержавеющей сталей, применяемых в самолетах марки «АН». Ниже изложены основные положения этих рекомендаций.

Шасси и системы управления самолета являются элементами конструкции, которые в максимальной степени подвержены износу и коррозионным поражениям. Так числа отказов в эксплуатации по этим причинам в конструкции планера самолета составляет 8%, а на шасси, системы управления и гидросистемы приходится 36% отказов.

Шасси самолета является особо ответственным и высоконагруженным агрегатом, который в эксплуатации подвержен динамическим нагрузкам высокой интенсивности, вибрациям, воздействию коррозионно-активных сред, абразивному износу. Механизмы, обеспечивающие функциональное назначение шасси, работают в условиях взаимного перемещения деталей при действии внешних нагрузок с большим количеством циклов срабатывания. При эксплуатации самолетов с грунтовых аэродромов эти агрегаты подвержены воздействию таких неблагоприятных факторов, как пыль, агрессивные аэрозоли, воздушно-песчаные потоки, которые ускоряют износ и коррозию трущихся пар.

Применение высокопрочных титановых сплавов и нержавеющей сталей в конструкции шасси и системах управления позволяет решить эти проблемы. Однако титановые сплавы и нержавеющей стали имеют низкие триботехнические характеристики, склонны к схватыванию и налипанию в узлах трения. Обеспечение необходимых триботехнических характеристик может быть достигнуто путем нанесения на трущиеся поверхности защитных износостойких покрытий.

Для выбора оптимальных видов защитных антикоррозийных и износостойких покрытий был проведен системный анализ их существующих видов. На рис. 1 показаны основные методы защиты от коррозии и износа элементов конструкции.

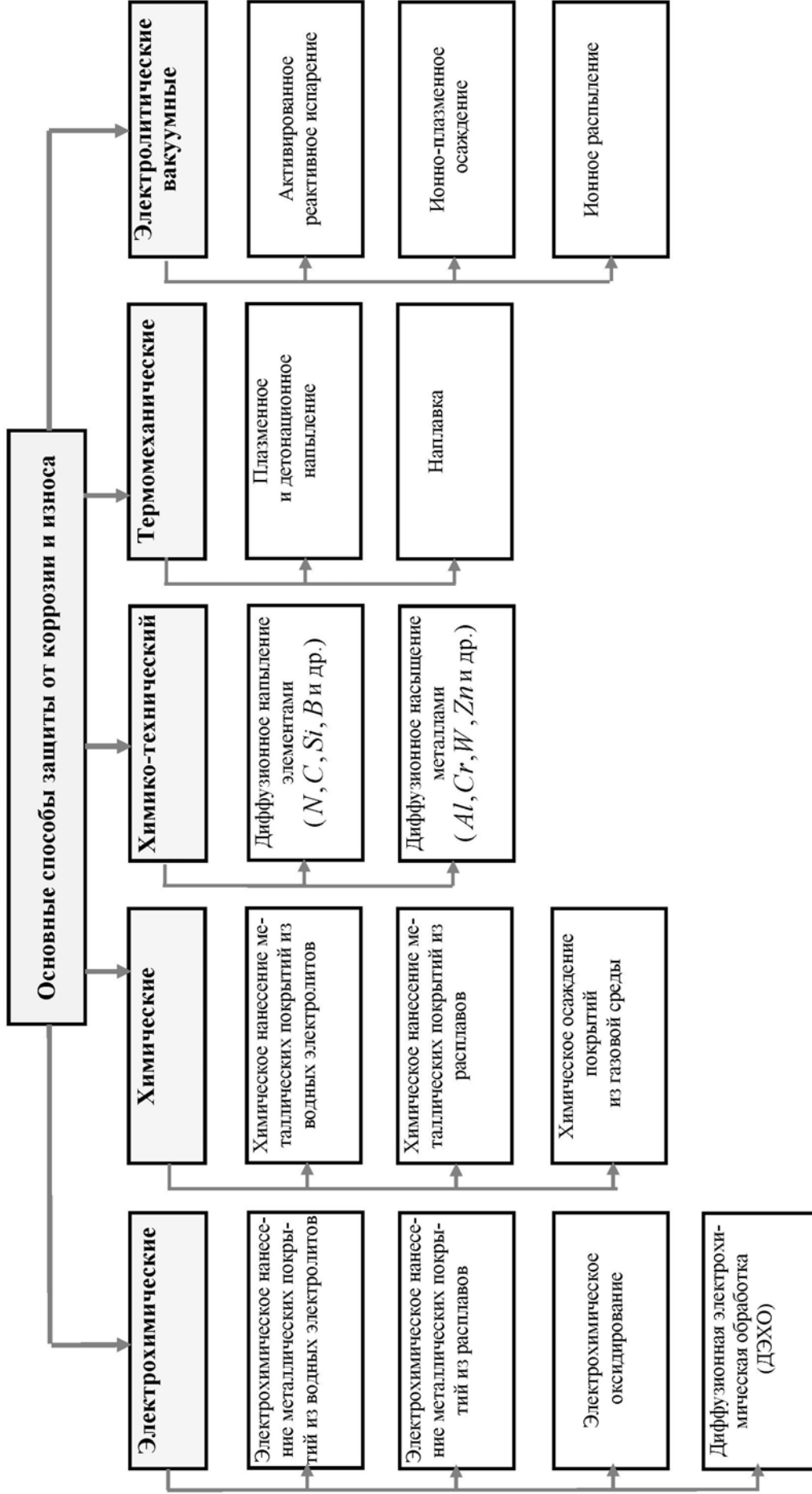


Рисунок 1 – Основные методы защиты конструкционных материалов от коррозии и износа

Как видно из рис. 1, существует большое количество электрохимических, химических, химико-термических, термомеханических, электрофизических методов нанесения защитных и износостойких покрытий, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Благодаря малой теплопроводности, эти покрытия защищают подложку от нагрева, исключают схватываемость и налипание в узлах трения.

С целью реализации новых видов покрытий и обработки поверхности деталей и узлов самолетов на ГП «Антонов» была разработана целевая программа их исследования и применения, которая включала:

- паспортизацию и аттестацию деталей и узлов самолета;
- выбор материала для нанесения покрытия;
- выбор способа и оборудования для нанесения покрытия;
- разработку технологии и системы контроля качества покрытия.

Паспортизация и аттестация деталей и узлов самолета позволили определить характер и причины их износа, необходимость применения покрытия и его тип. Паспорт содержит конструктивные характеристики, эксплуатационные параметры и эскиз узла трения. Все паспортизируемые и аттестуемые детали классифицированы по следующим показателям: интенсивность изнашивания, степень влияния на безопасность полетов, степень влияния на экономические показатели.

По результатам паспортизации и аттестации все исследованные детали и узлы разделены на 3 группы: I группа – детали и узлы самолета, износ которых за межремонтный период превышает допустимый или близок к нему; II группа – детали и узлы наиболее ответственных систем и агрегатов самолета, потеря работоспособности которых может привести к отказу в полете; III группа – дорогостоящие детали и узлы самолета значительно влияющие на экономические показатели самолета.

Были обследованы детали и узлы самолетов Ан-26, Ан-70, Ан-124, Ан-140, Ан-225 (шасси, гидравлические системы, системы управления). На рис. 2 показаны типовые представители I, II и III групп деталей самолетов ГП «Антонов». На основе паспортизации и аттестации деталей произведен выбор и оценка эффективности методов нанесения покрытий.

Условия газотермического напыления (высокие скорости охлаждения материала покрытия и ударные нагрузки, малый размер напыляемых частиц) создают предпосылки для образования аморфного состояния металлических сплавов. Аморфные покрытия характеризуются состоянием высокой износостойкости, коррозионной стойкости, прочности сцепления с основной и повышением усталостной прочности основы.

Сравнение аморфизированных покрытий с гальваническим хромированием показало, что первые превосходят хромовые покрытия по стойкости к износу и сопротивлению коррозии.

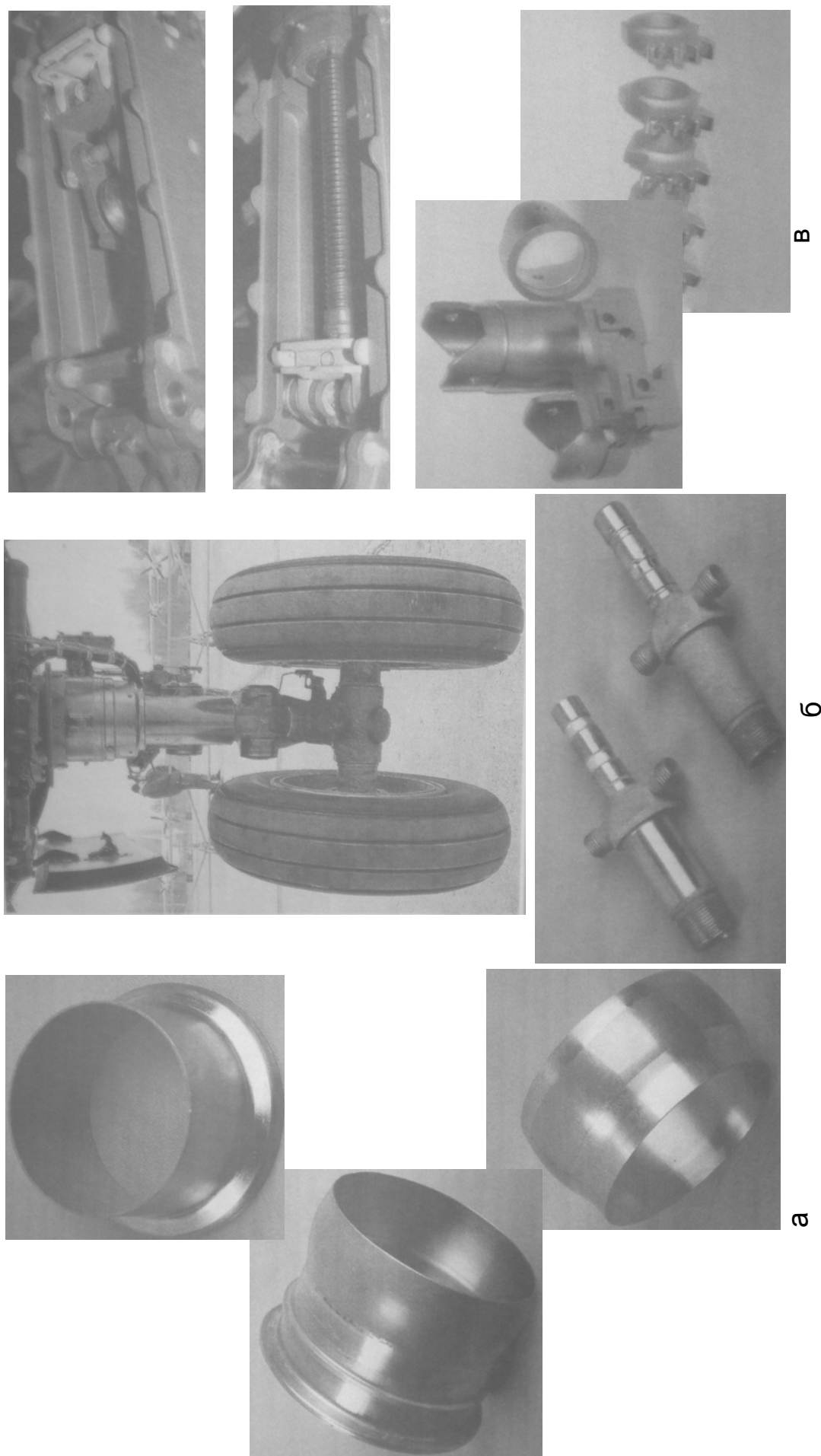


Рисунок 2 – Типовые представители трех групп деталей самолетов марки «АН»:
 а – детали и узлы, износ которых за межремонтный период превышает или близок к допустимому;
 б - детали и узлы наиболее ответственных систем и агрегатов самолета;

в – детали и узлы, существенно влияющие на экономические показатели самолета

Так хромовые покрытия на титановых сплавах имеют плохую сцепляемость с основной, слущиваются в эксплуатации и снижают усталостную прочность, в то время как аморфизируемые покрытия имеют хорошее сцепление с основной и повышают усталостную прочность основы. Следует отметить большую экологическую безопасность технологии газотермического напыления по сравнению с технологией хромирования.

Проведенные нами и другими авторами исследования показали перспективность формирования квазиаморфных структур на поверхности деталей из титана и его сплавов толщиной до 40 мкм, путем их электролитической обработки переменным током. Получаемые структуры увеличивают твердость поверхности на 20...30 МПа, не отслаиваются, не растрескиваются и характеризуются низким коэффициентом трения.

Исследования статических и усталостных характеристик деталей с такими покрытиями показали, что их прочностные и пластические характеристики остаются без изменений, а усталостная прочность увеличивается на образцах без концентратора напряжений на порядок, а на образцах с концентратором напряжения в 3...4, 5 раза.

Ионное осаждение в плазме электродугового разряда нитрида титана характеризуется высокой степенью ионизации парового потока и обеспечивает равномерность толщины покрытия независимо от формы детали. Благодаря высокой кинетической энергии осаждаемых ионов (до 200 эВ) достигаются высокая адгезия и плотность покрытия. Структура покрытия легко контролируется поддержанием параметров процесса в заданных пределах. Ионно-плазменная технология позволяет в широких пределах регулировать характеристики покрытия, причем их твердость выше, чем у покрытий газофазного осаждения. Ионно-плазменные покрытия широко применялись для поверхностного упрочнения стального режущего инструмента и состояли из одного слоя TiN или TiC . Для покрытий на сплавах титана впервые были разработаны и применены многослойные ионно-плазменные покрытия.

Для проверки эффективности газотермических покрытий проведены экспериментальные, конструкторские и технологические работы, которые позволили отработать конструкцию деталей, технологию и материалы для нанесения покрытия.

На основе паспортизации было установлено, что газотермические покрытия наиболее эффективно применять для деталей взлетно-посадочных устройств и систем управления, в том числе для различных видов соединений, узлов редукторов, криволинейных механизмов, титановых штоков гидроцилиндров и других деталей из титановых сплавов, имеющих низкие триботехнические свойства. Было установлено, что основным назначением этих покрытий является защита от износа при трении скольжения при нормальной и умеренно высокой температуре (до 530°C). Эти покрытия превосходят традиционно используемые электрохимическое хромирование и химическое никелирование.

Совместно с Институтом электросварки им. Е.О. Патона было организовано производство необходимых материалов для покрытий, оборудования и технологии для его нанесения.

Например, для напыления порошка АМОТЕК 7 с помощью сверхзвуковой воздушно-газовой установки «Киев-С» с использованием плазмотрона мощностью 116 кВт формируется покрытие, содержащее 80...90% аморфной фазы при пористости 1,15...2%. Производительность напыления на сверхзвуковой установке «Киев-С» при толщине покрытия 400 мкм составляет 6...10 м²/час.

С целью объективной оценки эксплуатационных характеристик деталей и узлов с различиями видами антикоррозионных и износостойких покрытий из высокопрочных сплавов и нержавеющей сталей были проведены триботехнические испытания традиционных и новых электрохимических, химических, химико-термических, термомеханических и электрофизических вакуумных покрытий в аналогичных условиях по разработанной методике торцевого трения.

Адекватность результатов испытаний и работы натуральных деталей и узлов обеспечивалась соблюдением механико-химического подобия процессов. Для этого изучались условия работы конкретных узлов трения; уровень статических и динамических нагрузок; характер и скорость перемещения в контакте; материалы, которые используются для узлов данного типа; рабочие среды и температуры; условия смазки и загрязненность смазок; параметры шероховатости поверхности в исходном состоянии и после наработки; структурные изменения; дисперсность и химический состав продуктов износа; статистические данные по износу. Анализ этих результатов позволяет определить, основные процессы при работе узлов трения и смоделировать их в лабораторных условиях.

Проведенные исследования конкретных узлов трения самолетов позволили сформировать требования к лабораторным испытаниям: трение в условиях предельной смазки на кольцевых образцах в интервале нагрузок 210 МПа и скоростей 0,05...0,25 м/с. Образцы с покрытиями испытывались в паре с бронзой БрАЖМц 10-3-1,5. Интенсивность износа выражена в безразмерных величинах $1 \cdot 10^{-9}$ мкм/км. Результаты испытаний приведены в таблице.

Результаты испытаний показывают, что традиционные покрытия (за исключением гальванического хрома) значительно уступают по своим характеристикам новым видам покрытий. С учетом триботехнических испытаний, конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов для повышения надежности, долговечности, износостойкости и коррозионной стойкости рекомендованы к применению покрытия высокопрочных титановых сплавов и нержавеющей сталей: газотермические (плазменные) покрытия, диффузионные, электрохимическая обработка титановых сплавов, многослойные ионно-плазменные покрытия.

Таблица – Триботехнические характеристики покрытий при их трении по БрАЖМц 10-3-1,5

| Вид покрытия | Микротвердость, ГПа | Толщина покрытия, мкм | Давление, МПа | Интенсивность износа | | Коэффициент трения |
|--|---------------------|-----------------------|---------------|----------------------|-------------|--------------------|
| | | | | покрытия | контртела | |
| Гальванический хром | 6 | 45 | 6 | 0,2 | 8 | 0,18 |
| | | | 10 | 0,25 | 12 | 0,19 |
| | | | 14 | 0,25 | 14 | 0,18 |
| Химический никель | 6 | 25 | 2 | 2,3 | 22 | 0,26 |
| | | | 4 | 4,1 | 108 | 0,27 |
| | | | 6 | 4,8 | 126 | 0,27 |
| ДЭХО сплава ВТ22 | 5 | 20 | 2 | 1,54 | 39 | 0,22 |
| | | | 4 | 2,2 | 37 | 0,24 |
| | | | 6 | 2,8 | 41 | 0,24 |
| Анодирование сплава ВТ22 | 5,2 | 25 | 2 | 1,0 | 102 | 0,25 |
| | | | 4 | | схватывание | |
| | | | 6 | | схватывание | |
| Электроискровое легирование сплава ВК-2 | 10 | 15 | 2 | 2,2 | 7,3 | 0,18 |
| | | | 4 | 1,65 | 13,4 | 0,19 |
| | | | 6 | 6,7 | 140 | 0,19 |
| Термическое оксидирование ВТ22 | 4,5 | 60 | 2 | 2,4 | 12,5 | 0,25 |
| | | | 4 | 2,4 | 18,6 | 0,23 |
| | | | 6 | 5,3 | 53 | 0,23 |
| Ионно-плазменное (нитрид титана) | 18 | 8 | 4 | 0,4 | 18 | |
| | | | 8 | 0,4 | 28 | 0,3 |
| | | | 12 | 0,6 | 68 | 0,28 |
| Ионно-плазменное, многослойное $Ti - Ti_2 - TiN$ | 11 | 8 | 4 | 0,2 | 10 | 0,27 |
| | | | 8 | 0,3 | 20 | 0,3 |
| | | | 12 | 0,4 | 48 | 0,29 |
| Плазменное $TiC - Co$ | 25 | 250 | 4 | 0,83 | 2 | 0,14 |
| | | | 6 | 1,95 | 2,32 | 0,14 |
| | | | 8 | 2,25 | 3,2 | 0,14 |
| Плазменное $TiC - Ni$ | 23 | 250 | 4 | 0,73 | 2,2 | 0,16 |
| | | | 6 | 1,65 | 4,1 | 0,15 |
| | | | 8 | 2,3 | 6,2 | 0,16 |
| Плазменное $Al_2O_3 - 2\%TiO_2$ | 10 | 300 | 4 | 3,38 | 14,1 | 0,2 |
| | | | 6 | 4,3 | 19,6 | 0,22 |
| | | | 8 | 7,2 | 33,8 | 0,2 |
| Плазменное $Ti - 5\%Al - 20\%Mo$ | 8,15 | 250 | 4 | 0,86 | 10,4 | 0,2 |
| | | | 6 | 1,56 | 19,3 | 0,22 |
| | | | 8 | 5,6 | 43,2 | 0,2 |
| Плазменное АМОТЕК-1 | 9 | 300 | 4 | 0,8 | 2,7 | 0,16 |
| | | | 6 | 0,61 | 3,0 | 0,17 |
| | | | 8 | 1,3 | 8,2 | 0,16 |
| Плазменное АМОТЕК-2 | 10,1 | 300 | 4 | 0,9 | 3,1 | 0,18 |
| | | | 6 | 0,8 | 3,7 | 0,17 |
| | | | 8 | 1,5 | 9,6 | 0,17 |
| Плазменное АМОТЕК-3 | 9 | 300 | 4 | 0,7 | 2,1 | 0,17 |
| | | | 6 | 0,8 | 2,9 | 0,16 |
| | | | 8 | 1,0 | 3,0 | 0,16 |
| Плазменное ЭП-1 | 8,2 | 250 | 4 | 1,2 | 2,7 | 0,18 |
| | | | 6 | 1,4 | 3,6 | 0,18 |
| | | | 8 | 1,4 | 3,6 | 0,18 |
| Плазменное ЭП-2 | 7,4 | 250 | 4 | 1,4 | 3,2 | 0,24 |
| | | | 6 | 2,0 | 9,8 | 0,24 |
| | | | 8 | 4,0 | 9,6 | 0,21 |
| Плазменное ЭП-3 | 15 | 250 | 4 | 1,8 | 4,0 | 0,23 |
| | | | 6 | 2,9 | 6,2 | 0,26 |
| | | | 8 | 5,5 | 8,2 | 0,20 |

Обоснована также экономическая целесообразность применения органо-композиционных покрытий [3] в тяжелонагруженных узлах самолета Ан-70. Все материалы, включающие методики выбора покрытий по критериям долговечности и экономической эффективности, полученные в наших исследованиях [1 – 5], а также реализующие их технологические рекомендации используются в соответствующих службах ГП «Антонов».

Список использованных источников

1. Быков, М.Н. Причины и виды разрушения покрытий деталей и узлов самолетных конструкций [Текст] / М.Н. Быков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: ХАИ. – Вып. 2(49), 2007. – С. 38 – 45.

2. Быков, М.Н. Разрушения покрытий деталей и узлов самолетных агрегатов и их определяющие параметры [Текст] / М.Н. Быков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: ХАИ. – Вып. 3(50), 2007. – С. 101 – 113.

3. Быков, М.Н. Определение предельных параметров работоспособности и оценка экономической эффективности применения покрытий самолетных конструкций [Текст] / М.Н. Быков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: ХАИ. – Вып. 4(55), 2008. – С. 171 – 184.

4. Быков, М.Н. Оценка экономической эффективности использования покрытий при доработках и в процессе эксплуатации самолета [Текст] / М.Н. Быков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: ХАИ. – Вып. 4(60), 2009. – С. 108 – 121.

5. Быков, М.Н. Эквиваленты унификации, серийности производства и отделочных операций обработки покрытий самолетных конструкций при их директивном назначении [Текст] / М.Н. Быков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: ХАИ. – Вып. 4(64), 2010. – С. 156 – 169.

Поступила в редакцию 10.12.2011.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Ю. Русин,
Обнинское научно-производственное объединение
«Технология», РФ, г. Обнинск*