

УДК 621.79

В.Е. Гайдачук, д-р техн. наук,
В.А. Коваленко, канд. техн. наук,
Н.М. Московская, канд. техн. наук

ОБЗОР И АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ НАЗНАЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Известно, что конструкции авиационной и ракетно-космической техники (АРКТ) являются наиболее затратными по применяемым материалам и комплектующим, энергоемкости, трудоемкости и времени создания, а следовательно, и самыми дорогостоящими техническими объектами. Поэтому стоимость 1 кг полезного груза при авиационных перевозках составляет 1 – 1,5 тыс. \$ США, а для ракетно-космической отрасли вывод на орбиту 1 кг массы обходится в 10 – 100 тыс. \$ США [1].

В связи с этим при создании объектов АРКТ особенно остро стоит проблема снижения собственной массы конструкции путем применения новых высокоэффективных материалов – сплавов и полимерных композиционных материалов (ПКМ) [2–3], современных технологических энергосберегающих процессов изготовления [4–5] и использования компьютерных и информационных технологий оптимального проектирования и создания изделий [6–8].

В решении этой комплексной проблемы традиционно несколько обособленно стоит проблема защиты объектов АРКТ от воздействия как факторов самой среды, так и условий их эксплуатации. Как известно, эта защита реализуется весьма разнообразными видами покрытий и способами их нанесения на поверхности изделия, контактирующие с теми или иными внешними воздействиями или элементами непосредственно взаимодействующими между собой.

Различным видам покрытий и технологиям их нанесения посвящена обширная литература, включающая в себя сотни статей и десятки монографий, например [9–17] и др.

Роль покрытий в ответственных изделиях АРКТ трудно переоценить:

- они предохраняют детали от вредных воздействий среды эксплуатации, приводящих к деструктивным процессам, снижающим статическую и усталостную прочность изделия;
- служат упрочняющим поверхностным слоем в узлах трения, предотвращающим износ деталей;
- обеспечивают декоративный вид изделию;
- в ряде случаев повышают герметичность изделия, обеспечивая его специальные характеристики;

– в гиперзвуковых летательных аппаратах теплозащитные покрытия (ТЗП) служат единственным средством обеспечения сохранности объекта и его жизнедеятельности [15–17].

На рис. 1 показаны основные области применения системы тепловой защиты и типичный вид ТЗП в ракетно-космической технике [16].

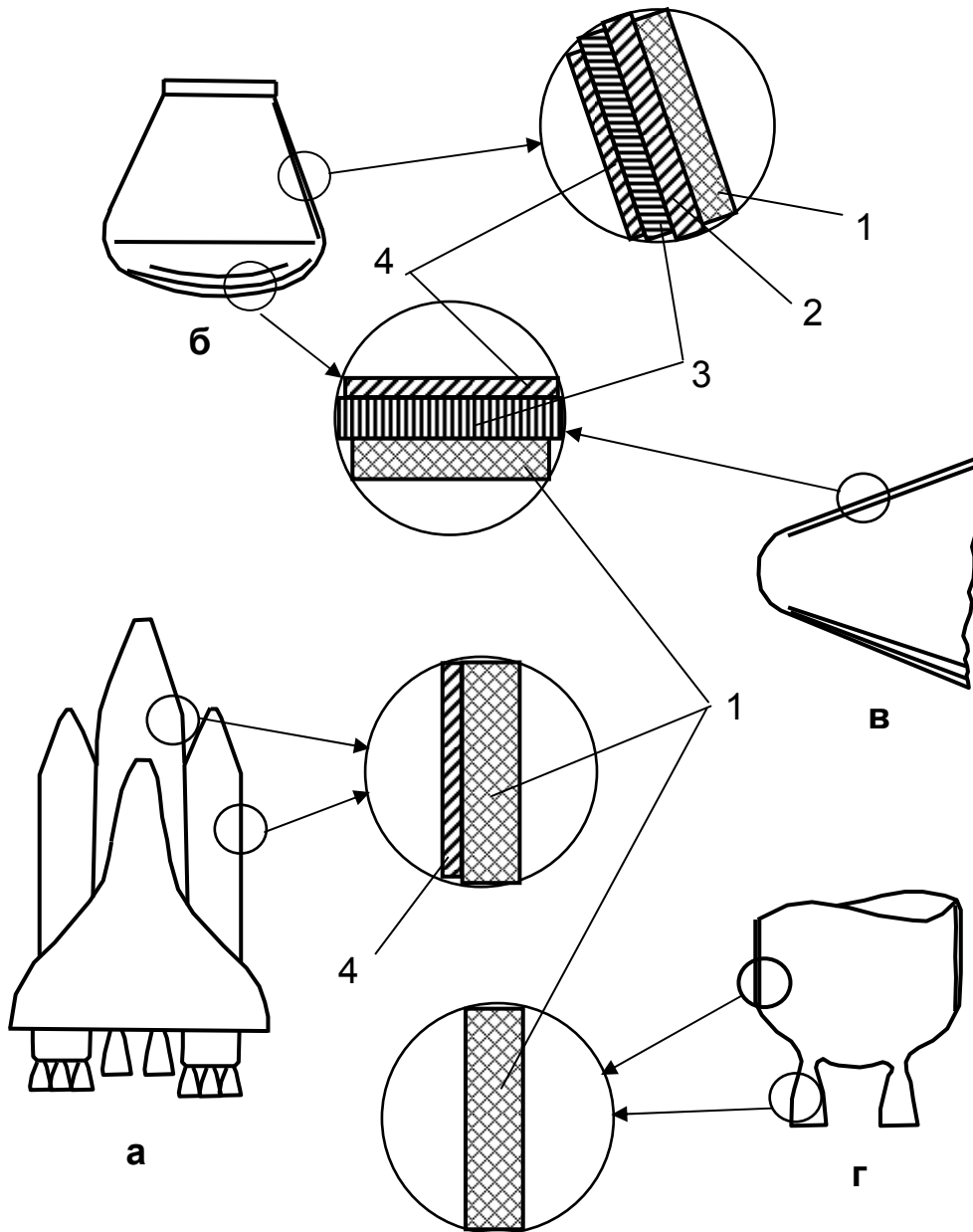


Рисунок 1 – Основные области применения системы тепловой защиты и типичный вид теплозащитных покрытий в ракетно-космической технике:

а – ракета-носитель; б – спускаемый аппарат; в – головная часть;

г – двигательная установка;

1 – композиционный теплозащитный материал; 2 – теплоизоляционный материал; 3 – сотовая конструкция; 4 – силовая оболочка

В изделиях АРКТ из ПКМ полимерное связующее является химически стойким материалом, в определенной степени выполняя функции защитного покрытия. Кроме того, в последние годы в изделиях АРКТ из ПКМ начали применять комплексные добавки, вводимые в связующее, обеспечивающие не только увеличение физико-механических характеристик (ФМХ) и прочности материала, но и уровень его герметичности [19], от которого зависят функциональные возможности и безопасность отсеков ракетно-космической техники, заполненных агрессивными жидкостями и газами [20].

Актуальность синтеза новых высокоэффективных покрытий изделий АРКТ и совершенствования процессов их формирования определяют достаточно обширный уровень исследований, проводимых в этой области.

Любое покрытие, как и основной (несущий) материал конструкции, является функциональным, обеспечивающим этой конструкции восприятие ею всей гаммы воздействий, регламентированных условиями ее эксплуатации. Поэтому не корректно решать задачи оптимизации конструкции в процессе ее проектирования и (или) изготовления по критерию минимума массы или стоимости при тех или иных ограничениях изолированно без учета покрытия как функциональной части (составляющей) несущего материала, так как последний принципиально не существует (не реализуется) в комплексе своих эксплуатационных свойств без свойств покрытия.

В этом аспекте представляет интерес монография [21], в которой реализуется попытка разработки универсальных принципов повышения стабильности процессов реакции изделий с покрытиями* и созданию на этой основе оптимальных технологий формирования покрытий с заданными свойствами.

Авторы выделяют ряд общих классификационных признаков при рассмотрении конструктивных параметров поверхностного слоя, а также механизмов поведения покрытий при воздействии на них различных внешних факторов в целях разработки единого подхода к процессам конструирования и формирования новых видов поверхностных слоев с

* Авторы употребляют термин «устойчивость» процессов, понимая под ним «устойчивость» функционирования, т.е. сохранение некоторого свойства процесса по отношению к возмущениям или неопределенности некоторых параметров системы или ее математической модели [21]. В данном случае нам представляется более оправданным исходный термин – «стабильность» процесса (*stabilis* (лат.) – устойчивый), не «перегруженный» математическими ограничениями. Кроме того, в монографии повсеместно используется термин «деформирование» системы, отражающий реакцию последней на силовое воздействие. Поскольку воздействия на изделие с покрытием могут быть более широкого спектра – среды эксплуатации (тепло, влага, облучение, абляция, трение и т.д.), то более общим представляется термин «реакция» изделия с покрытием на любое внешнее воздействие.

требованиями, наиболее полно отвечающими условиям эксплуатации объектов с покрытиями.

Взаимосвязь параметров поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами объектов с покрытиями иллюстрирует рис. 2 [21]. Для анализа покрытий функционального назначения в [21] выделено три основных классификационных признака:

- способ формирования поверхностного слоя;
- область применения объекта с покрытием;
- конструкция покрытия, вид и состояние материала (материалов) покрытия.

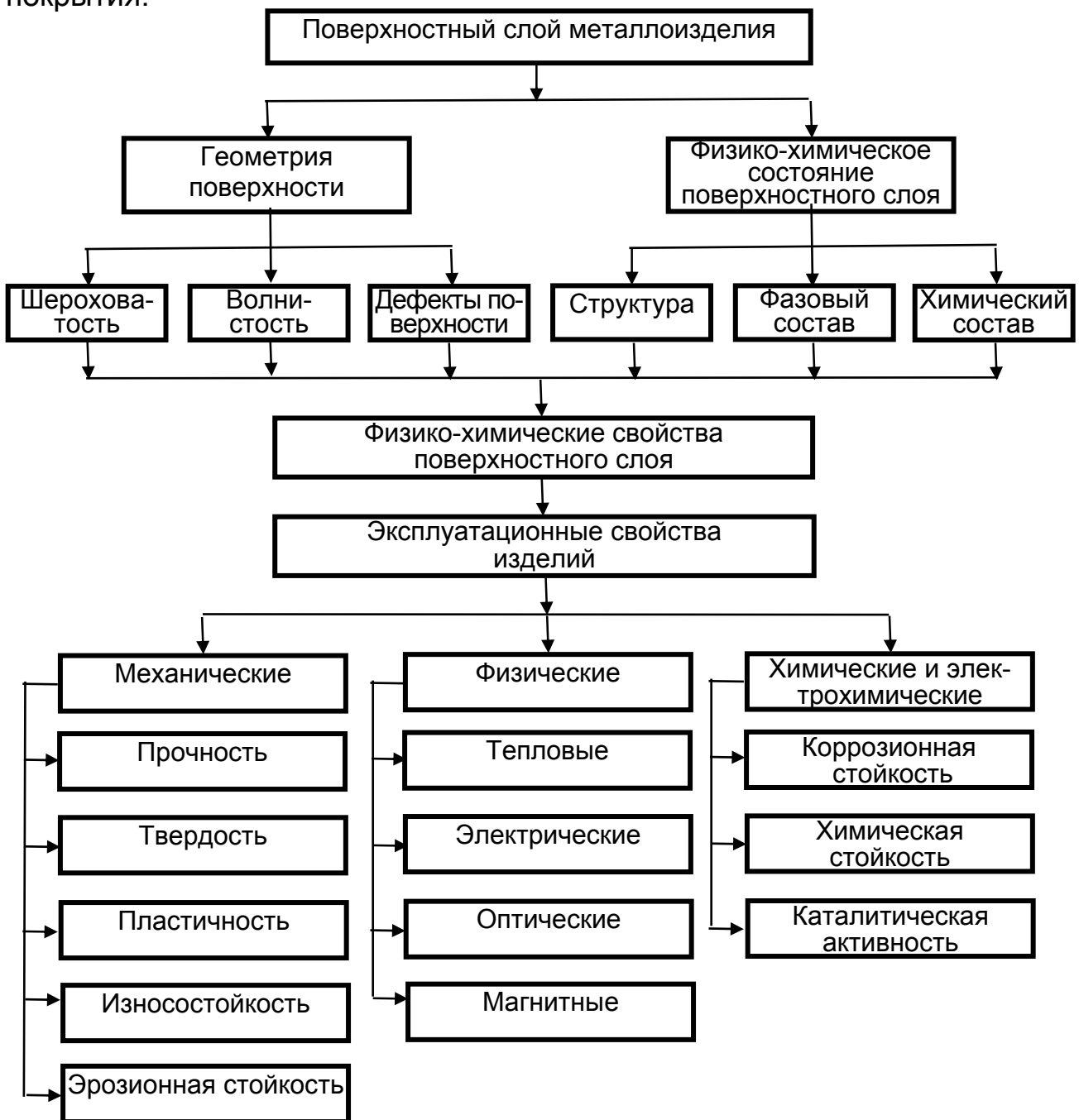


Рисунок 2 – Взаимосвязь свойств поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами всего объекта

Первый классификационный признак во многом определяет уровень формируемых свойств поверхностного слоя и конструкции покрытия, а также технико-экономические показатели ее производства. Второй характеризует функциональность вновь образованного комплекса свойств объектов применительно к условиям эксплуатации. Третий признак характеризует конструктивные особенности формируемого покрытия, вид и состояние его материала, т.е. уровень его ФМХ, прочностных и химических свойств.

Первый классификационный признак реализуется разделением всех технологических процессов формирования покрытий на два класса: способы формирования собственно покрытий (рис. 3) и способы придания необходимых поверхностных свойств основному материалу (рис. 4). Последние, как правило, не могут быть использованы для восстановления изношенных поверхностей объектов до требуемых геометрических форм и размеров изделия. Кроме того, возможность формирования необходимого комплекса свойств данными методами ограничена составом материала, из которого изготовлен объект [21].

По механизму воздействия на обрабатываемый материал при его поверхностной обработке можно условно выделить следующие способы [9]:

- химические и электрохимические;
- физические;
- механические.

Выделенные в данные группы способы можно, в свою очередь, подразделить по схемам и технологическим особенностям поверхностей обработки.

Следует однако отметить, что данный подход [21] к классификации как способов формирования покрытий, так и модифицирования поверхностных слоев, является достаточно условным. Например, процесс плакирования сопровождается сложными многостадийными физико-химическими процессами, а эффективность любого из способов порошкового напыления во многом определяется возникновением ударного и напорного давлений на контактной поверхности частицы с основой, то есть механическими составляющими процесса. Однако предлагаемая классификация позволяет достаточно просто и наглядно отнести тот или иной способ к группе процесса, превалирующее влияние которого очевидно и приводит к прочному соединению покрытия с основой или достижению требуемого градиента механических свойств.

Выбор способа формирования покрытия во многом определяет качество соединения разнородных материалов в композицию, сохраняющую достаточную адгезионную связь в условиях дальнейшей технологической обработки и эксплуатации детали с покрытием. При этом от механизма воздействия на соединяемые материалы зависит их структура и, следовательно, финишные свойства всей композиции.

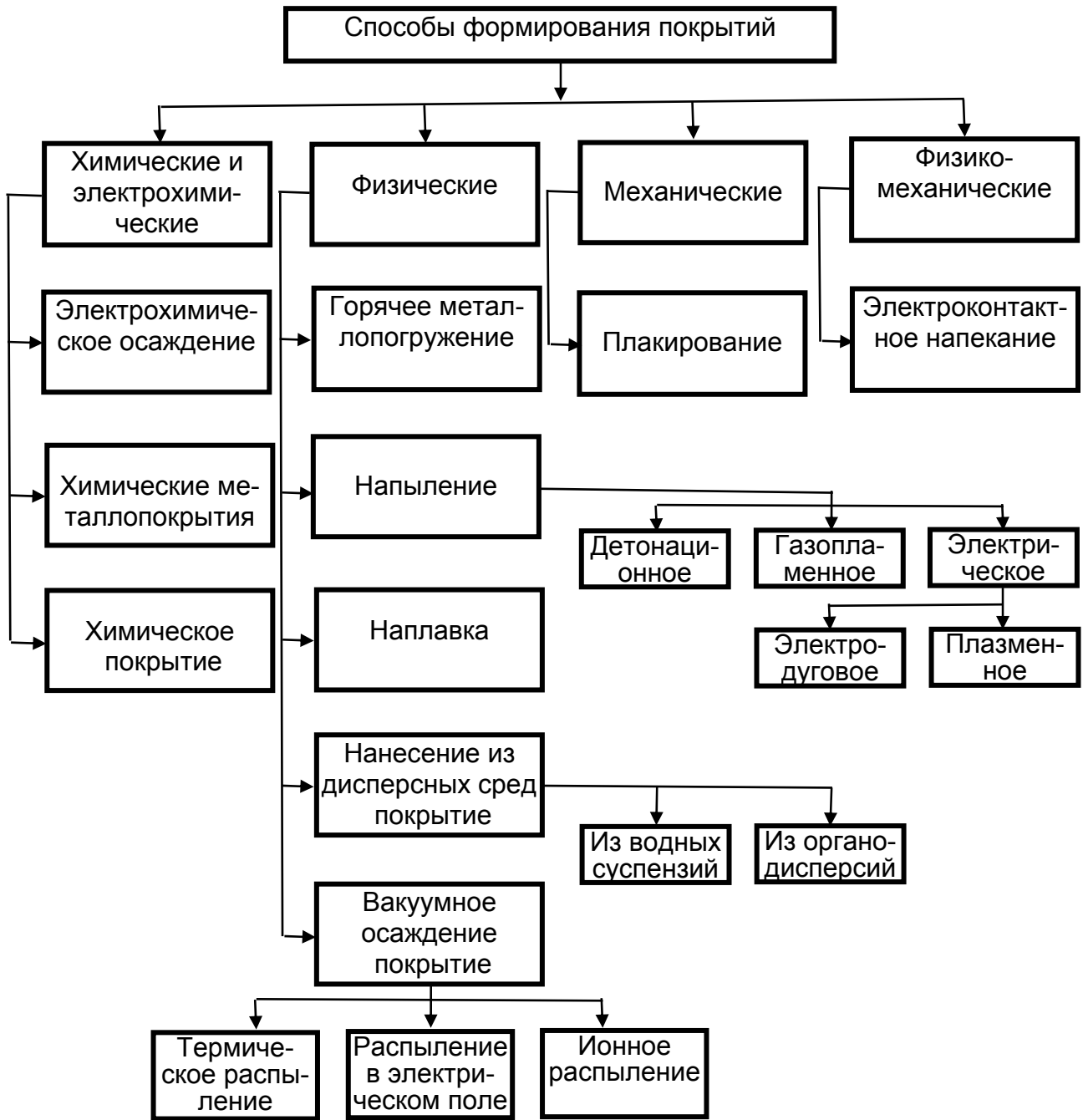


Рисунок 3 – Способы формирования покрытий

Способы соединения различных материалов в процессах формирования покрытий в [21] представлены тремя группами (рис. 5):

- соединение в присутствии жидкой фазы (сварка плавлением);
- соединение твердых фаз (сварка давлением);
- конденсация покрытия из газовой (жидкой) фазы.

При таком широком спектре технологических процессов и схем модифицирования поверхностных слоев необходимо научно обосновать правильность и целесообразность выбора той или иной технологической схемы обработки изделия, а также материала покрытия. Это невозмож-

но без оценки комплекса эксплуатационных воздействий на обрабатываемый объект с покрытием.

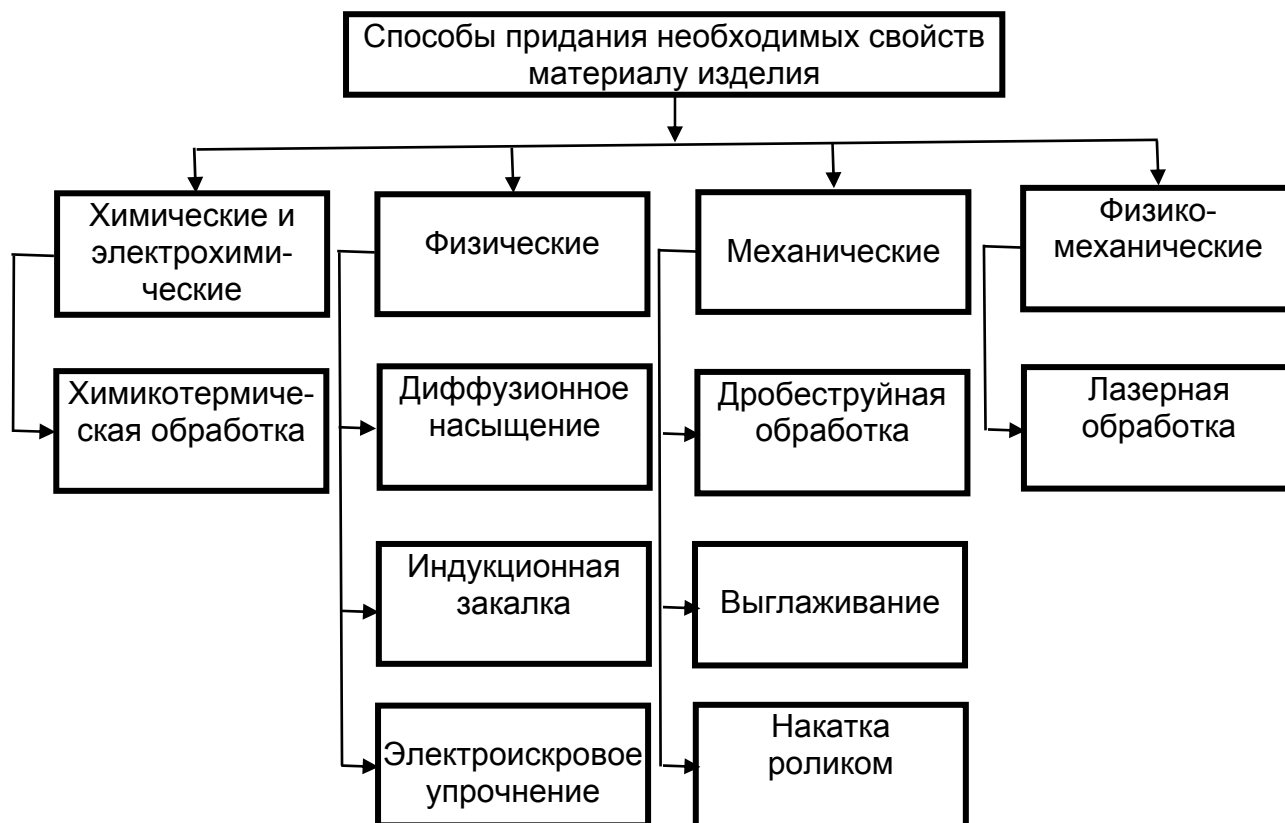


Рисунок 4 – Способы придания необходимых поверхностных свойств основному материалу

В настоящее время отсутствуют строгая классификация и систематизация параметров эксплуатационных воздействий, что связано с широким спектром как самих изделий АРКТ, так и различием взаимодействия их узлов, деталей, так как каждый объект подвергается определенному, свойственному только ему комплексу внешних воздействий. Поэтому целесообразно выделить наиболее характерные эксплуатационные воздействия и структурные признаки поверхностных слоев, от которых зависит способность объекта сохранять требуемые функциональные свойства [21].

При анализе особенностей слоистых (композиционных) покрытий в [21] приводится их классификация по конструктивным признакам, состоянию материала и его природе (рис. 6).

Возможность оценки оптимальных конструктивных параметров покрытия при соответствующих эксплуатационных воздействиях на изделие осуществляется только при наличии единого научно обоснованного подхода, устанавливающего взаимосвязь показателей необходимого и достаточного условий решения задачи обеспечения требуемого уровня свойств изделий с покрытиями [21].

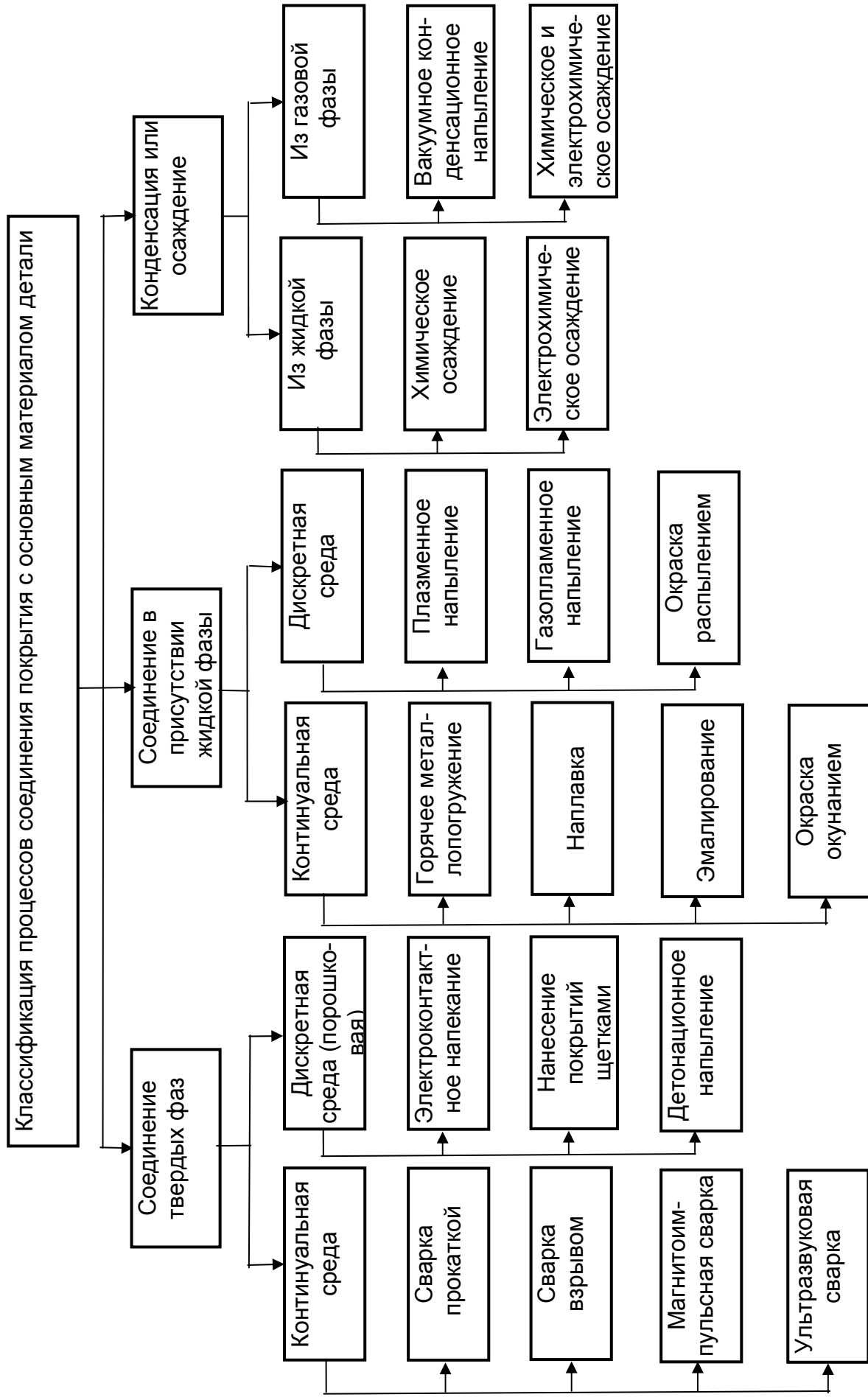


Рисунок 5 – Классификация процессов формирования покрытий по агрегатному состоянию присадочных материалов

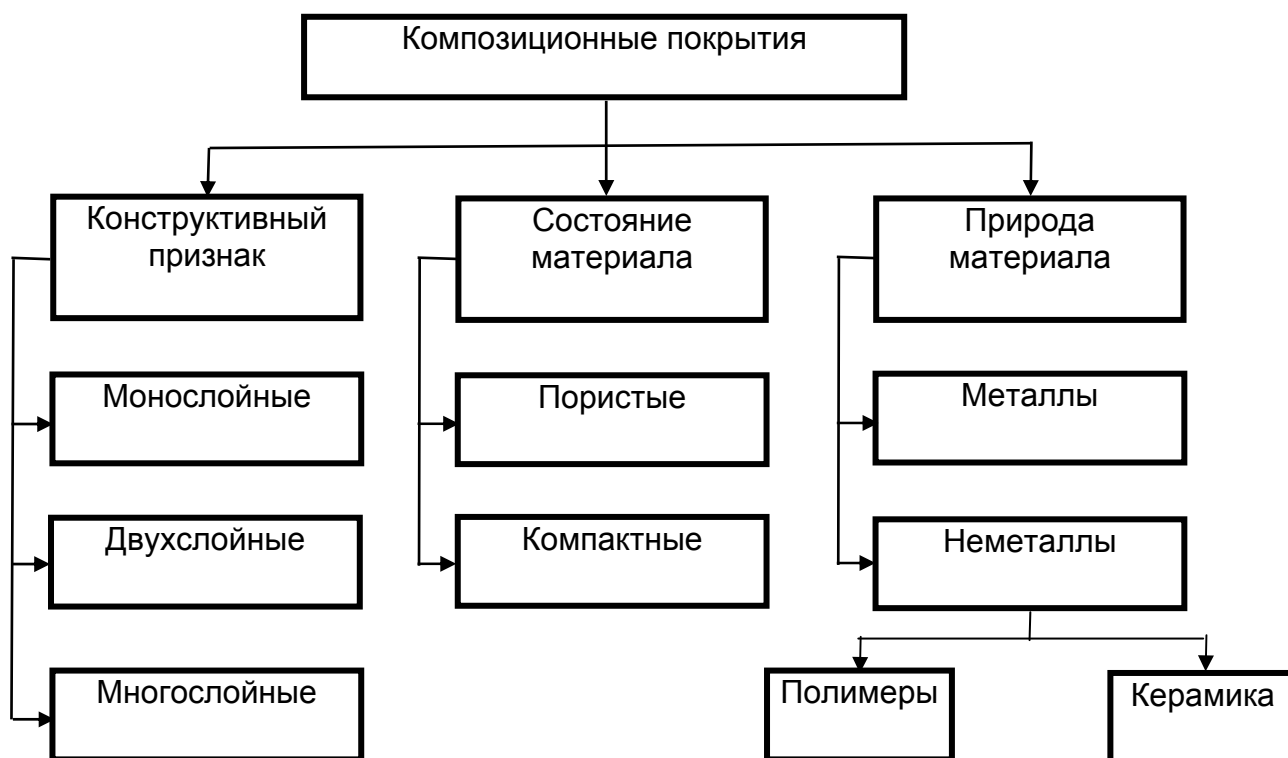


Рисунок 6 – Классификация композиционных покрытий по конструктивным признакам, виду и состоянию материала

Результатом решения поставленной задачи, в зависимости от конкретных предъявляемых технологических проблем, могут быть: оптимальная конструкция поверхностного слоя, соответствующая свойственным данному изделию эксплуатационным воздействиям, или оптимальный режим обработки основного материала с модифицированным поверхностным слоем, соответствующий заранее заданной конструкции покрытия (рис. 7).

Таким образом, широта цитируемых прежде всего классификационных результатов монографии [20] свидетельствует об их приемлемости и для объектов, анализируемых в данной статье, хотя сам источник и ориентирован его авторами на объекты металлургической и машиностроительных отраслей промышленности, далеких от АРКТ.

Остановимся несколько подробнее на анализе существующих отечественных функциональных покрытий для АРКТ. Известно, что в авиационном строении наиболее широко применяемым конструкционным материалом являются алюминиевые сплавы [22].

Несмотря на общую высокую коррозионную стойкость, учитывая, что алюминиевые сплавы эксплуатируются в различных условиях, они, как правило, нуждаются в специальной защите от коррозии. Методы защиты могут быть: металлургические, охватывающие вопросы легирования плавки, деформации, термической обработки, а также гальванохимические и лакокрасочные, охватывающие вопросы анодного и хими-

ческого оксидирования, нанесения гальванических и лакокрасочных покрытий, эмалирования и эматолирования.

Выбор метода защиты от коррозии определяется многими факторами: климатическими условиями, рабочими средами, размещениями деталей и узлов в конструкции, способом хранения, действующими нагрузками на конструкцию, длительностью эксплуатации, системой и маркой сплава, конструктивными особенностями, видом соединения, контакта с другими материалами и т.п., а также экономическими факторами.

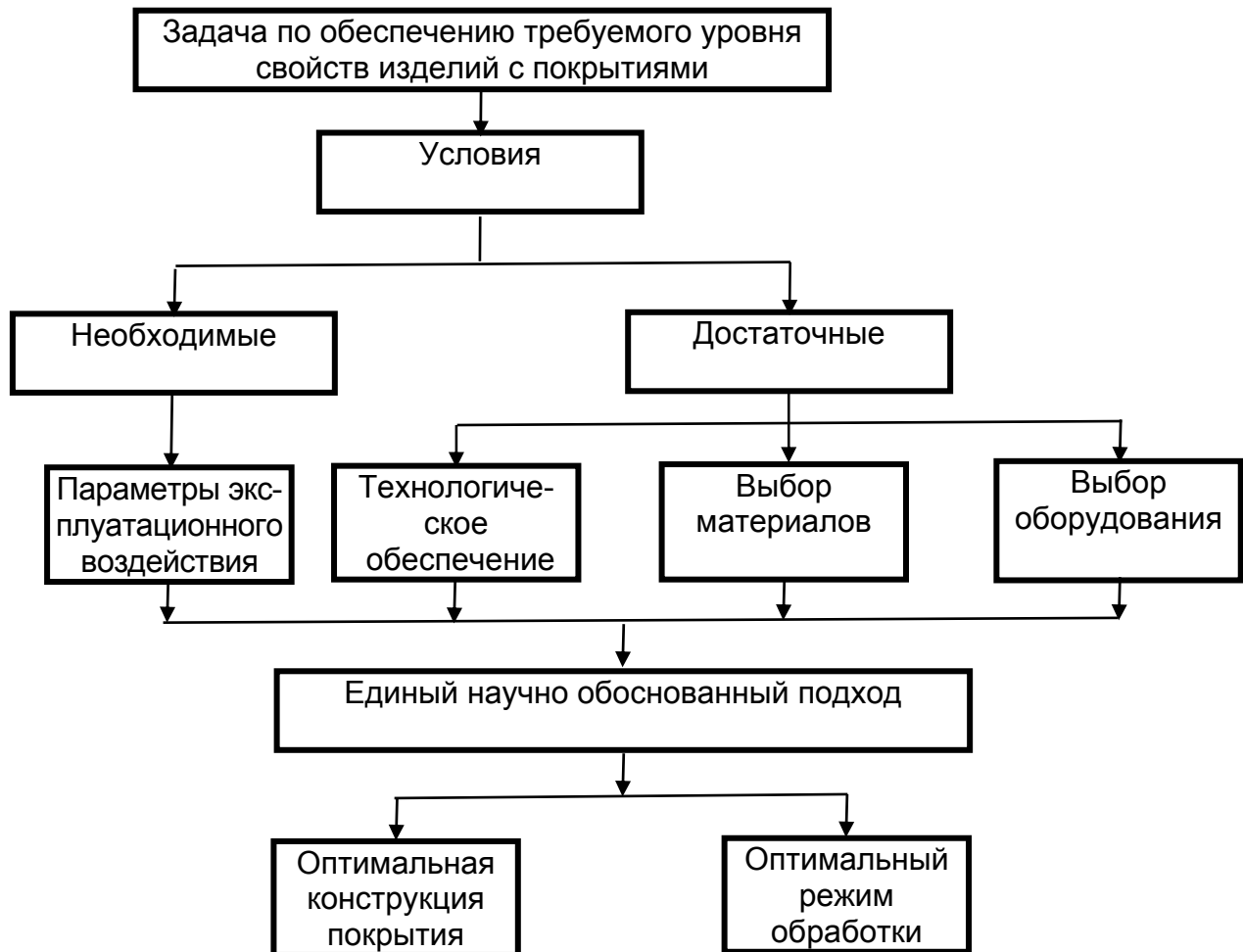


Рисунок 7 – Схема решения задачи обеспечения качественных показателей объектов с покрытиями

Наиболее эффективным методом защиты от коррозии является легирование. Оптимальное соотношение легирующих элементов является основой высокой коррозионной стойкости алюминиевых сплавов. Эффективным и широко применяемым методом защиты от коррозии листов из алюминиевых сплавов является плакирование сплавом с электронным потенциалом, более отрицательным, чем основной сплав. Плакирование заключается в нанесении прокаткой тонкой пленки на лист. Плакировка не только предохраняет сердцевину основного сплава от непо-

средственного воздействия коррозионной среды, но и осуществляет его электрохимическую (катодную) защиту в случае нарушения сплошности плакировки (отверстия, торцы и т.п.). Такой эффект высок в морской воде и низок в атмосфере [22].

Для предотвращения возникновения фреттинг-коррозии алюминиевых сплавов при контакте с другими металлами применяют между ними изолирующие прокладки, слои лакокрасочных покрытий или грунтов. В ряде случаев наносят на защищаемую поверхность кадмий или цинк. Применяемые для защитных слоев неметаллические материалы не должны быть агрессивными, гигроскопичными и не выделять активных веществ.

Анодное и химическое оксидирование с образованием анодноокисных пленок толщиной 5...20 мкм является эффективным методом защиты от атмосферной коррозии. Примерно 90% алюминиевых сплавов подвергаются анодному оксидированию. Схема технологического процесса анодного оксидирования следующая: очистка и обезжиривание → травление → полирование → анодное окисление → уплотнение пор покрытия (пористость анодной пленки достигает 30%) в растворе бихромата калия или деминерализованной воды.

Серноокисное анодное окисление – наиболее распространенная серийная технология, позволяющая получать на плакированном листе пленки толщиной 6...12 мкм, а на неплакированных заготовках – толщиной 5...8 мкм.

Анодно-окисные покрытия кроме защиты от коррозии применяют для подготовки поверхности перед нанесением лакокрасочных покрытий, клеев, герметиков и др., изменения цвета, повышения твердости, износа. Толщина анодных пленок для деталей, работающих на трение, составляет 30...60 мкм, для электроизоляции – 20...40 мкм, для теплоизоляции – 100 мкм.

Декоративное анодное окисление с предварительным полированием применяется с последующим электрохимическим и адсорбционным окрашиванием или с получением окраски покрытия в процессе формирования анодной пленки.

Химическое оксидирование обеспечивает образование окисной пленки без наложения внешнего тока в растворах, содержащих активаторы. В [22] приведены типовые растворы и режимы анодного окисления и химического оксидирования алюминиевых сплавов.

Для надежной защиты от коррозии алюминиевых сплавов только анодного окисления или химического оксидирования недостаточно. Надежной защитой от коррозии алюминиевых сплавов является сочетание анодного или химического окисления с окраской поверхности алюминиевых сплавов. Существующая система лакокрасочных покрытий для окраски конструкционных алюминиевых сплавов включает в себя 1 – 2 слоя грунтовки и 2 – 3 слоя эмали. Иногда для защиты внутренних по-

верхностей изделий используется только покрытие грунтовкой. Для грунтовки используют только пассивирующие (хроматные) покрытия, обладающие хорошей адгезией к алюминиевым сплавам, марок: АК-069, АК-070, ФЛ-086, ФЛ-ОЗЖ, ЭП-0215, ЭП-0208, ЭП-076, ЭП-0232, ВЛ-02, ВЛ-023, АК-0209 и др.

Лаковые покрытия применяют для конструкций из плакированных алюминиевых сплавов, предварительно подвергнутых анодному окислению с последующим уплотнением в воде анодно-оксидной пленки. Лакировку осуществляют лаками марок АК-113, АК-113Ф, АС-16, АС-82 по схеме: один слой лака АК-113Ф или АК-113 и двух слоев лака АС-16 или АС-82.

Современная авиация характеризуется большими скоростями, эксплуатационными температурами, высокими удельными нагрузками на узлы и агрегаты, продолжительным ресурсом работы в различных климатических условиях. Требованиям прочности, надежности и коррозионной стойкости отвечают высокопрочные титановые сплавы, которые в то же время имеют наихудшие из применяемых в авиастроении металлов антифрикционные свойства. В [14] достаточно подробно изложены методы повышения прочности отечественных титановых сплавов: гальванические покрытия, газоплазменное напыление, электроискровое поверхностное легирование, наплавка, ионная имплантация, термодиффузионное насыщение кислородом и азотом, азотирование в молекулярном азоте и др. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики эффективности антифрикционных покрытий на сплаве ВЕ22, полученных различными способами их нанесения.

Таблица 1 – Характеристики покрытий на сплаве ВТ22

№ п/п	Вид покрытия и способ нанесения	Толщина, мкм	Микротвердость, ГПа	Прочность адгезии, МПа
1	Электролитическое хромирование	80...100	0,9...1,0	700
2	Химическое никелирование	20...30	5,0...6,0	200
3	Электрохимическая обработка	40...50	5,0...6,0	-
4	Анодирование	10	4,5...5,0	80...90
5	Электроискровое легирование	25	9,0...10,0	85
6	Термооксидирование	30	7,5...8,0	-
7	Ионное азотирование	100...150	8,6...9,5	-
8	Ионно-плазменное покрытие TiN	2...4	9,6...12,0	100
9	Детонационное (TiC)/ $NiCu$	200	21,0...5,4	70...80
10	Плазменное (TiC)/ Ni	300	23,7...5,0	30...40

В [17] приведены сведения о характеристиках и технологии нанесения ТЗП внутренних поверхностей ракетных двигателей на твердом топливе, головных обтекателей ракет, а также для экранно-вакуумной теплоизоляции РКТ, длительное время работающей в условиях открытого космоса.

Специфическими видами разрушения агрегатов ракетно-космической техники при гиперзвуковых скоростях, как уже отмечалось выше, является тепловое разрушение в виде абляции. В [18] приводится краткая характеристика материалов ТЗП, используемых в отечественных и зарубежных РКТ (таблица 2).

Таблица 2 – Краткая характеристика материалов, используемых в качестве ТЗП отечественных и зарубежных изделий РКТ

Марка	Плотность, кг/м ³	Состав	Назначение, разработчик
АП	1500	Асботекстолиты Асботкань АТ-1, фенольно-формальдегидная (ФФ) смола	Тепловая защита спускаемых аппаратов и т.д. НПО «Энергия»
ТЗМКТ-8	1620...1650	Стеклопластики Кремнеземная ткань МКТ-5,25; эпоксидное связующее ЭДТ-10	Тепловая защита спускаемых аппаратов и т.д. ОКБ «Новатор»
СТКТ-ТЛ	1620	Кремнеземная трикотажная лента; связующее ЛБС-4	Тепловая защита ЛА КБ «Южное»
УСС-2	1440	Углепластики Угольная ткань УУТ-2-14, пропитанная стеклонитью, ФФ смола	Тепловая защита ЛА НПО «Энергия»
УП-ТВТМ	1420	Материал на основе угольной нити УПН и связующего ЛБС-4	Тепловая защита ЛА КБ «Южное»
УП-УН-2	1300	Трикотажная лента, пропитанная полиамидным связующим ЛБС-4	Тепловая защита ЛА КБ «Южное»
УП-УТЛ	1400	Трикотажная лента УТЛ, пропитанная полиамидным связующим ЛБС-4	Тепловая защита ЛА КБ «Южное»
УП-СТКТ	1460	Комбинированная трикотажная лента из угольных и кремнеземных нитей, пропитанная полиамидным связующим ЛБС-4	Тепловая защита ЛА КБ «Южное»
УПЭ	880...1000	Трикотажная угольная лента УТЛ, кремнийорганический эластомер «Стиросил»	Тепловая защита ЛА КБ «Южное»
Органит-6ТЗ	1290	Органоволокниты Ткань из гетероциклического полиамидного волокна марки СВМ, эпоксидное связующее ЭДТ-10	Исследование влияния связующего на скорость разрушения органоволокнитов НПО ВИАМ

В таблице 3 приведены материалы для аблирующих и многоразовых ТЗП летательных аппаратов, заимствованные из указанных в ней источников.

Таблица 3 – Материалы для аблирующих и многоразовых ТЗП ЛА

Марка	Плотность, кг/м ³	Состав	Назначение материала, основные свойства	Источник, разработчик
Гравимол	1700...2000	Углеродный наполнитель – плоская ткань марки ТКК-2	Носовой обтекатель ОК «Буран». Теплопроводность при 20°C: перпендикулярно к слоям – 10,5...18,0 Вт/(м·К); параллельно слоям – 30...45 Вт/(м·К). Предел прочности при 20°C: на сжатие – 100...130 МПа; на сдвиг – 32...45 МПа; на растяжение – 24...30 МПа; на изгиб – 90...100 МПа. Вязкость разрушения – 1,5...2,0 МПа·м ^{1/2}	[23] НИИ «Графит», НПО ВИАМ, НПО «Молния»
Гравимол-В	1700...2000	Углеродный наполнитель – ткань объемного плетения марки ТНУ-2	Секции крыла ОК «Буран». Теплопроводность при 20°C: перпендикулярно к слоям – 17...22 Вт/(м·К); параллельно слоям – 26...38 Вт/(м·К). Предел прочности при 20°C: на сжатие – 90...130 МПа; на сдвиг – 25...33 МПа; на растяжение – 35...50 МПа. Предел прочности на изгиб: при 20°C – 118...140 МПа; при 1500°C – 130...160 МПа. Вязкость разрушения – 4,5...5,2 МПа·м ^{1/2}	[23] НИИ «Графит», НПО ВИАМ, НПО «Молния»
Карбосил	1850	Высокопрочный углерод-углеродный материал	Рабочая температура – 1850°C. Предел прочности: на сжатие – 300 МПа; на растяжение – 300 МПа; на изгиб – 400...500 МПа	[23] НИИ «Графит», НПО ВИАМ, НПО «Молния»
ЭВЧ-2	-	Покрытие на основе боросиликатного стекла с добавками диоксида молибдена	Защита от окисления углерод-углеродных материалов при высоких температурах. Теплопроводность при 20°C – 1,71 Вт/(м·К); электрическое сопротивление – 10 ⁴ Ом; скорость уноса – 10 ⁻⁵ (кг/(м ² ·с))	[23] НИИ «Графит», НПО ВИАМ, НПО «Молния»

Продолжение таблицы 3

Марка	Плотность, кг/м ³	Состав	Назначение материала, основные свойства	Источник, разработчик
Высокотемпературная теплоизоляция поверхности многоразовых космических систем				
ТЗМК-10	150	Супертонкое кварцевое волокно, аморфная кремнеземная связка и соединения бора	Рабочая температура – 1250°С. Теплопроводность при 20°С – 0,05 Вт/(м·К). Прочность при сжатии в «слабом» направлении – 0,4 МПа; в «сильном» – 0,6 МПа. Прочность при растяжении в «слабом» направлении – 0,2 МПа; в «сильном» – 0,35 МПа. Прочность при изгибе (в плоскости плитки) – 0,6 МПа	[23] ОНПП «Технология»
АТМ-11	150...240	На основе супертонких кремнеземных волокон и кремнийорганического или неорганического связующего	Теплоизоляция конструкций. Рабочая температура – от – 150°С до 1000 °С. Теплопроводность при 465°С – 0,093 Вт/(м·К)	[23] ОНПП «Технология»
ІМІ	352	Отражающая фольга, кремнеземное волокно	Тепловая защита космических кораблей. Теплопроводность: при 200°С – 0,02 Вт/(м·К); при 1400°С – 0,042 Вт/(м·К)	[24]
ГТЗИ	1780	Состав пакета: внешний слой – карбидокремниевая ткань; изолирующий слой – кварцевые нити; слой алюмоборосиликатной ткани; металлизированная полимерная пленка; подстилающий слой из алюмоборосиликатной ткани	Теплоизоляция для тормозных экранов. Теплоизоляция выдерживает тепловые потоки до 350 кВт/м ² при температуре 1690 К	[25]

Продолжение таблицы 3

Марка	Плотность, кг/м ³	Состав	Назначение материала, основные свойства	Источник, разработчик
АТМ-6	150...240	На основе супертонких стеклянных волокон и кремнийорганического или неорганического связующего	Теплоизоляция конструкций. Рабочая температура – от – 150°С до 300°С. Теплопроводность при 300°С – 0,062 Вт/(м·К); теплоемкость – 0,84 кДж/(кг·К)	[24]
АТА-9	200 400 500	На основе супертонких стеклянных волокон и кремнийорганического или неорганического связующего	Теплоизоляция конструкций. Рабочая температура – от – 150°С до 300 °С. Теплопроводность при 300°С – 0,067...0,075 Вт/(м·К); теплоемкость – 0,84...0,86 кДж/(кг·К)	ЗАО «Экспоцентр» [26]
Композиционные материалы для теплонапряженных элементов летательных аппаратов				
ФОСТ	-	Кварцевая стеклоткань, алюмофосфатная связка	Изготовление изделий и узлов конструктивно-радиотехнического назначения, длительно работающих при температурах 600...800°С. Предел прочности при изгибе, растяжении и сжатии с учетом анизотропии – 50...130 МПа. Ударная вязкость – 15 кДж/м ²	[27]
$Si_3N_4 - I$	-	Реакционно-связанный нитрид кремния	Изготовление обтекателей для длительной работы при температурах 1300...1500°С и кратковременной – при 1300...1500°С. Прочность в интервале температур 20...1400°С – 200...250 МПа. Выдерживает темп. нагрева с 150°С до 900...1300°С без видимых разрушений. Изменение диэлектрической постоянной в диапазоне 20...1320°С – не более 10%	[28]

Продолжение таблицы 3

Марка	Плотность, кг/м ³	Состав	Назначение материала, основные свойства	Источник, разработчик
$Si_3N_4 - Y$	-	Реакционно-связанный нитрид кремния, уплотненный при повышенных температурах	Изготовление обтекателей для длительной работы при температурах 1300...1500°C и кратковременной при 1300...1500°C. Прочность в интервале температур 20...1300°C – 430...500 МПа. Выдерживает темп. нагрева с 150°C до 900...1300°C без видимых разрушений. Изменение диэлектрической постоянной в диапазоне 20...1320°C – не более 10 %	[28] ОНПП «Технология»

В заключение отметим, что проведенный выше краткий обзор и анализ состояния проблемы назначения покрытий конструкций АРКТ свидетельствует о ее актуальности, а также необходимости решения ряда связанных с ней задач. К числу таковых следует, по-видимому, отнести прежде всего экономический анализ покрытий, который позволит существенно сократить затраты на создание дорогостоящей АРКТ. Представляются также весьма актуальными задачи разработки и внедрения моделей выбора для последующего обязательного назначения директивной технологии создания покрытий конструкций АРКТ с учетом критериев их долговечности (ресурса) и экономической эффективности.

Список использованных источников

1. Оборонно-промышленный комплекс Украины – современное состояние и реконструкция [Текст] / В.П. Горбулин, А.С. Довгополь, О.Н. Приходько и др. // Технологические системы. – 2001. – №2(8). – С. 5 – 20.
2. Авиационные материалы на рубеже XX-XXI веков [Текст] / под ред. Р.Е. Шалина. – М.: ВИАМ, 1994. – 602 с.
3. Коваленко, В.А. Применение полимерных композиционных материалов в изделиях ракетно-космической техники как резерв повышения ее массовой и функциональной эффективности [Текст] / В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2001. – № 5 (82). – С. 14 – 20.
4. Братухин, А.Г. Технологическое обеспечение высокого качества, надежности, ресурса авиационной техники [Текст] / А.Г. Братухин. – М.: Машиностроение, 2011. – 297 с.
5. Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ)

(Theory and Practice of Technologies of Manufacturing Products of Composite Materials and New Metal Alloys (TPSMM)) [Текст] / под ред. К.В. Фролова, И.Ф.Образцова, О.С. Сироткина, В.С. Боголюбова. – М.: Знание, 2004. – 806 с.

6. Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение [Текст] / под ред. А.Г. Братухина. – М.: ОАО «НИЦ АСК», 2008. – 608 с.

7. CALS-технологии в технологической подготовке производства авиакосмической техники [Текст] / В.Д. Костюков, Э.М. Годин, В.П. Соколов и др.; под ред. Э.М. Година. – М.: Изд-во МАИ, 2005. – 552 с.

8. Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов. Корпоративные нано- и CALS-технологии в наукоемких отраслях промышленности [Текст] / под ред. К.В. Фролова, О.С. Сироткина, В.С. Боголюбова. – М.: Знание, 2006. – 864 с.

9. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения [Текст]: справ. / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомысельский и др.; отв. ред. И.М. Федорченко. – К.: Наук. думка, 1985. – 624 с.

10. Борисов, Ю.С. Плазменные порошковые покрытия [Текст] / Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова. – К.: Техника, 1986. – 223 с.

11. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учебник для вузов [Текст] / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др. – М.: Металлургия, 1987 – 729 с.

12. Технологические процессы получения деталей самолетов методом порошковой металлургии [Текст] / В.П. Семенченко, С.Г. Кушнаренко, С.А. Бычков, О.Ю. Нечипоренко. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1992. – 64 с.

13. Современные технологические процессы с использованием порошковых и слоистых материалов [Текст] / Е.П. Носков, Г.С. Гунн, В.Л. Стеблянко, Ю.Ф. Бахматов и др. – Магнитогорск: МГМИ, 1993. – 260 с.

14. Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій [Текст] / О.П. Осташ, В.М. Федирко, В.М. Учанін та ін.; т. 9; за ред. О.П. Осташа і В.М. Федірко. – Л.: Сполох, 2007. – 1068 с.

15. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее: в 3 т. – Т. 1. Прогнозирование и анализ экстремальных воздействий [Текст] / Ю.В. Полежаев, С.В. Резник, Э.Б. Василевский и др.; под ред. С.В. Резника. – М.: Изд-во МТТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 224 с.

16. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее: в 3 т. – Т. 1. Экспериментальные исследования [Текст] / Ю.В. Полежаев, С.В. Резник, А.Н. Баранов и др.; под ред. Ю.В. Полежаева и С.В. Резника. – М.: Изд-во МТТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 264 с.

17. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці: підруч. [Текст] / Є.О. Джур, Л.Д. Кучма, Т.А. Манько та ін. – К.: Вища школа, 2003. – 399 с.
18. Полежаев, Ю.В. Тепловое разрушение материалов [Текст] / Ю.В. Полежаев, Г.А. Фролов; под ред. акад. НАН Украины В.В. Скорохода. – К.: ИД «Академпериодика», 2006. – 354 с.
19. Creation of energy-saving technologies of forming articles made of polymeric composite materials [Текст] / V. Slyvyns'kyu, N. Verbitskaya, V. Gajdachuk, V. Kirichenko, O. Karpicova // 60-th International Astronautical Congress 2009. – Daejeon, South Korea. – IAC-09.C2.4.9. – P. 1 – 8.
20. Герметичність у ракетно-космічній техніці: підручник [Текст] / Ф.П. Санін, Є.О. Джур, Л.Д. Кучма, В.А. Найдьонов. – Дніпропетровськ: Вид-во ДДУ, 1995. – 168 с.
21. Гун, Г.С. Оптимизация процессов технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями [Текст] / Г.С. Гунн, М.В. Чукин. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – 323 с.
22. Аллюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение) [Текст]: справ. / В.М. Белецкий, Г.А. Кривов; под общ. ред. акад. РАН И.Н. Фридляндера. – К.: КОМИНТЕХ, 2005. – 365 с.
23. Гофин, М.Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции много-разовых космических аппаратов [Текст] / М.Я. Гофин. – М.: ЗАО «ТО»МИР», 2003. – 672 с.
24. Keller, K. High temperature insulation [Текст] / K. Keller, H. Weber. - ESA Bulletin 80, November, 1994. – P.50.
25. Kourtides Demitrius, A. Composite flexible insulation for thermal protection of space-vehicles [Текст] / A. Kourtides Demitrius, K. Tran Huy, S. Chiu. – Amanda cent., Anancim., Calif., March, 9-12, 1992: Covina (Calif.), 1992. – P. 147 – 158.
26. Теплоизоляционные материалы марки АТМ [Текст] / 3-й между-народ. форум «Высокие технологии оборонного комплекса». – 22-26 апреля 2002 г. – М.: ВК ЗАО «Экспоцентр».
27. Подобеда, Л.Г. Работоспособность неорганического компози-ционного материала в экстремальных условиях [Текст] / Л.Г. Подобеда, В.В. Василенко, М.Ю. Русак // 3-я междунар. конф. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях»: тр. конф. – 2004. – С. 439.
28. Перспективы создания керамических оболочек из нитрида кремния [Текст] / И.Ю. Келина, М.Ю. Русин, А.С. Шаталин и др. // 3-я междунар. конф. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях»: тр. конф. – 2004. – С. 245 – 246.

Поступила в редакцию 16.01.2012.

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